

Russian Academy of Sciences  
Siberian Branch

Melnikov Permafrost Institute

# **PERMAFROST ENGINEERING**

Proceedings of the IX International Symposium  
3 – 7 September 2011  
Mirny, Russia

Edited by R.V. Zhang

Yakutsk  
Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press  
2011

УДК 624.139  
ББК 38.79  
П78

Permafrost Engineering, Proceedings of the IX International Symposium, 3-7 September 2011, Mirny, Russia (ed. R.V. Zhang). Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press, 2011, pp. 560.  
ISBN 978-5-93254-102-9

The Proceedings contain contributions to the Ninth International Symposium on Permafrost Engineering (3-7 September 2011, Mirny, Russia) from Russia, China, Poland, Denmark, USA, Iran, Sweden, Germany and Canada. The papers focus mostly on the physics and mechanics of frozen ground, frost action, and theoretical and experimental studies of the thermal and mechanical interaction between engineering structures and frozen ground. The Proceedings also contain papers on the thermal, geophysical, hydrogeological and geocological aspects of cold regions development in a changing climate.

The Proceedings will be of interest to researchers, engineers and designers involved in construction and operation of engineering structures in permafrost and seasonal frost regions.

#### Reviewers

Balobaev V.T., RAS Corr. Member  
Grigoriev M.N., Dr. Sci. (Geogr.)  
Zheleznyak M.N., Dr. Sci. (Geol.&Miner.)  
Kuzmin G.P., Dr. Sci. (Eng.)  
Kunitsky V.V., Dr. Sci. (Geogr.)  
Makarov V.N., Dr. Sci. (Geol.&Miner.)  
Razumov S.O., Dr. Sci. (Geogr.)  
Shepelev V.V., Dr. Sci. (Geol.&Miner.)  
Shesternev D.M., Dr. Sci. (Eng.)  
Efremov V.N., Cand. Sci. (Eng.)  
Velikin S.A., Cand. Sci. (Eng.)  
Guryanov I.E., Cand. Sci. (Eng.)  
Neradovsky L.G., Cand. Sci. (Eng.)

Российская академия наук  
Сибирское отделение

Учреждение Российской академии наук  
Институт мерзлотоведения  
им. П. И. Мельникова  
Сибирского отделения РАН

# ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ

Материалы  
IX Международного симпозиума

3 – 7 сентября 2011 г.,  
г. Мирный, Россия

Ответственный редактор  
доктор технических наук Р. В. Чжан

Якутск  
Издательство Института мерзлотоведения СО РАН  
2011

УДК 624.139  
ББК 38.79  
П78

Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, 3-7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия / [отв. ред. Р. В. Чжан] ; Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова. – Якутск : Издательство Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. – 560 с.

ISBN 978-5-93254-102-9

П78

В сборнике представлены доклады участников IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения (3-7 сентября 2011 г., г. Мирный) из России, Китая, Польши, Дании, США, Ирана, Швеции, Германии и Канады. Основная часть докладов посвящена вопросам исследований физико-механических свойств мерзлых грунтов, криогенных процессов, теоретическим и экспериментальным исследованиям теплового и механического взаимодействия мерзлых грунтов и инженерных сооружений в криолитозоне. В сборнике также представлены доклады по теплофизическим, геофизическим, гидрогеологическим и геоэкологическим аспектам освоения криолитозоны в условиях меняющегося климата.

Сборник предназначен для ученых, инженеров-строителей, проектировщиков и исследователей, связанных со строительством и эксплуатацией различных инженерных сооружений в криолитозоне.

УДК 624.139  
ББК 38.79

**Рецензенты:**

член-корреспондент РАН **В.Т. Балобаев**,  
доктор географических наук **М.Н. Григорьев**,  
доктор геолого-минералогических наук **М.Н. Железняк**,  
доктор технических наук **Г.П. Кузьмин**,  
доктор географических наук **В.В. Куницкий**,  
доктор геолого-минералогических наук **В.Н. Макаров**,  
доктор географических наук **С.О. Разумов**,  
доктор геолого-минералогических наук **В.В. Шепелёв**,  
доктор технических наук **Д. М. Шестернёв**,  
кандидат технических наук **С.А. Великин**,  
кандидат технических наук **И.Е. Гурьянов**,  
кандидат технических наук **В.Н. Ефремов**,  
кандидат технических наук **Л.Г. Нерадовский**



## PREFACE

Mirny, known as the center of the Russian diamond-mining industry, is located on the Irelyakh River (Vilyui's basin, western Yakutia) in the northernmost part of the Northern Temperate Zone, 1207 kilometers west of Yakutsk. It was founded in 1955 after the discovery of a kimberlite pipe which was named Mir ('peace') and since then it has grown into a city of about 36,000 people.

The Mirny area is unique in geocryological terms, having multi-layer permafrost which extends to a depth of as much as 1,500 m. It hosts large diamond mining and processing facilities, hydroelectric power stations, dams, reservoirs, and communities. The area is known for underground nuclear tests performed in the past and for extensive efforts made today to cope with highly mineralized water. Engineering costs to maintain the stability of foundations and infrastructure are increasing in the changing climate.

The Ninth International Symposium on Permafrost Engineering will facilitate cooperation within the Russian and international permafrost community on finding engineering solutions that would lead to comfortable living conditions and effective resource management in frozen-ground areas.

Mirny welcomes participants from around the world and it is hoped that the Symposium will serve to strengthen international cooperation.

*Ildar R. SULTANOV,  
Head of Mirny District Municipal Administration*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Город Мирный по праву считается алмазной столицей России. Расположен он на реке Ирелях (бассейн Вилюя), в 1207 км от г. Якутска, на самом севере умеренного пояса Северного полушария. Своим существованием и названием город обязан открытию в 1955 году кимберлитовой трубки «Мир». В 1959 году Мирный получил статус города.

Мирнинский район Западной Якутии известен в мире как уникальный в геокриологическом отношении регион, где мощность криолитозоны, имеющей здесь сложное многоярусное строение, достигает 1,5 км. Здесь построены крупные горнообогатительные комбинаты, населенные пункты, подземные рудники, гидроэлектростанции и гидроузлы с водохранилищами, хвостохранилища, осуществляется откачка высокоминерализованных вод в значительных объемах, проведены подземные ядерные взрывы. Всё больших затрат требуется для обеспечения сохранности мерзлых оснований зданий и инженерных сооружений в условиях меняющегося климата.

Работа IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения будет способствовать объединению усилий геокриологов России и зарубежных стран в решении инженерных геокриологических проблем, в обеспечении комфортных условий жизни и высокой эффективности использования криогенных ресурсов Земли.

В работе симпозиума примут участие ученые из многих стран мира, что послужит дальнейшему расширению и укреплению сотрудничества между учеными всех стран.

*Ильдар Рифович СУЛТАНОВ,  
глава Администрации МО «Мирнинский район».*

## INTRODUCTION

This Symposium is the 9th in a series of meetings on permafrost engineering organized by the Melnikov Permafrost Institute (Yakutsk, Russia), the Cold and Arid Regions Engineering and Environmental Research Institute (Lanzhou, China), and the Heilongjiang Institute of Cold Region Engineering (Harbin, China) with support of the Russian Academy of Sciences Council on Earth Cryology and the International Permafrost Association. Since the first meeting in Chita in 1993, the symposiums have been held alternately in Russia and China (the 2nd in Harbin in 1996, the 3rd in Chita in 1998, the 4th in Lanzhou in 2000, the 5th in Yakutsk in 2002, the 6th in Lanzhou in 2004, the 7th in Chita in 2007). The 8th symposium was held in Xian in 2009, at which Mirny was chosen as the place for the next symposium to be held in 2011.

The purpose of the symposium series is to provide a forum for discussion of permafrost engineering issues, as well as for exchange of practical experience in construction and maintenance of engineering structures on frozen ground. It aims to bring together researchers and engineers who work in cold/permafrost regions to discuss the ways and means for early detection of adverse frost-related processes that may cause economic losses and environmental damage. Special attention is given to development of climate change adaptation measures.

The Ninth International Symposium on Permafrost Engineering will be held in Mirny, Yakutia, Russia, during September 3–7, 2011. Participants at the Symposium will have the opportunity of taking part in technical excursions before and after the meeting to visit the Mir Pipe, Mir underground mine, Irelyakh dam and reservoir, Diamond Sorting Centre, Kimberlite museum, Alrosa museum of diamond mining history, diamond processing plant no. 3, Svetlinskaya and Vilyui hydropower plants, and Vulyui reservoir.

The Proceedings of the Symposium contain about 90 papers authored by scientists and engineers from Russia, China, USA, Great Britain, Iran, Denmark, Canada, Poland and Sweden on the physics and mechanics of frozen ground, frost action, modeling, thermal and mechanical interaction between engineering structures and frozen ground, as well as on the thermal, geophysical, hydrogeological and geoecological aspects of cold regions development in a changing climate.

The Organizing Committee for the Ninth International Symposium on Permafrost Engineering welcomes all participants and hopes that the meetings and excursions will prove to be useful and enjoyable.



**Rudolf V. Zhang,**  
*Co-Chairman, Organizing Committee*  
*Ninth International Symposium on Permafrost Engineering.*

## ВВЕДЕНИЕ

Международные симпозиумы по инженерному мерзлотоведению проводятся при поддержке Совета по криологии Земли РАН и Международной ассоциации по мерзлотоведению с 1993 г. Инициаторами этих научных форумов являются Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, Россия), Институт инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР (г. Ланьчжоу, Китай) и Хэйлуцзянский научно-исследовательский институт по строительству в холодных регионах (г. Харбин, Китай). Традиционно они проводятся поочередно в России и Китае. Первый симпозиум состоялся в России в 1993 г. (г. Чита), второй – в 1996 г. (г. Харбин), третий – в 1998 г. (г. Чита), четвертый – в 2000 г. (г. Ланьчжоу), пятый – в 2002 г. (г. Якутск), шестой – в 2004 г. (г. Ланьчжоу), седьмой – в 2007 г. (г. Чита) и восьмой в 2009 г. в г. Сиани (Китай), на котором было принято решение о проведении IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения в 2011 г. в г. Мирном.

Целью симпозиумов является обсуждение проблем и обмен опытом исследований по прогнозу развития криогенных процессов и их влиянию на инженерные сооружения, построенные и эксплуатирующиеся в условиях многолетней мерзлоты, обсуждение проблем ранней диагностики возникновения геокриологических процессов, ведущих к катастрофическим последствиям, экономическому и экологическому ущербу. Большое внимание уделяется разработке превентивных практических рекомендаций по обеспечению устойчивости инженерных объектов в криолитозоне при изменении климата.

Симпозиум будет проходить с 3 по 7 сентября 2011 г. в г. Мирном. Перед симпозиумом и после него состоятся экскурсии по многим инженерным объектам Мирнинского района: карьер трубки «Мир»; подземный рудник «Мир»; Иреляхский гидроузел; цех сортировки алмазов; Музей кимберлитов и историко-производственный музей АК «АЛРОСА», г. Мирный; обогатительная фабрика № 3; Светлинская ГЭС; каскад Виллойских ГЭС-1,2; Виллойское водохранилище и др.

Труды симпозиума включают порядка 90 докладов участников из России, Китая, США, Англии, Ирана, Германии, Дании, Канады, Польши и Швеции по следующим направлениям: физико-механические свойства мерзлых грунтов, криогенные процессы, моделирование; тепловое и механическое взаимодействие мерзлых грунтов и инженерных сооружений в криолитозоне; теплофизические, геофизические, гидрогеологические и геоэкологические аспекты освоения криолитозоны в условиях меняющегося климата.

Оргкомитет IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения приветствует всех его участников и выражает надежду, что заседания, тематические экскурсии и другие мероприятия симпозиума окажутся плодотворными и интересными.

**Рудольф Владимирович Чжан,**  
сопредседатель Оргкомитета

*IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения.*

## ACKNOWLEDGMENTS

The Organizing Committee for the Ninth International Symposium on Permafrost Engineering wishes to express its gratitude to the President and the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) for supporting this meeting. A governmental committee was established by Executive Order of Sakha (Yakutia) President Egor Borisov. This committee was chaired by Feodosia Gabysheva, Deputy Prime Minister of the Republic of Sakha (Yakutia), and included representatives from Yakutian ministries, companies, and the City of Mirny and Mirny District municipalities.

The Organizing Committee is grateful to the following people for organizational, technical and advisory support: V.Y. Fridovsky, Vice-Chancellor, North-Eastern Federal University; O.V. Tarasov, CEO, Yakutskenergo Co.; O.I. Matveeva, Director, OAO YakutPNIIS; P.A. Remigailo, Director, Institute for Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS; N.I. Andreev, General Manager, FGU Vilyui Federal Road; V.G. Shpan, Deputy Head, Mirny District Municipality; and I.V. Zyryanov, Vice Director, and I.F. Bondarenko, Academic Secretary, Yakutniiproalmaz Institute, Alrosa Co.

## ORGANIZING COMMITTEE

### Co-Chairmen

Rudolf Zhang, Director, Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

Ma Wei, Vice Director, CAREERI, Lanzhou, China

Zhu Weizhong, Director, Heilongjiang Institute of Cold Region Engineering, Harbin, China

### Members

Permafrost Institute

Georgy Kuzmin, Igor Rasstegaev, Dmitry Shesternev, Vladimir Makarov, Igor Guryanov,

Sergey Velikin, Vladimir Efremov, Leonid Neradovsky, Lev Li

*CAREERI*

Lai Yuanming, Wu Qingbai, Niu Fujun

*Heilongjiang Institute of Cold Region Engineering*

Wang Jiliang, Zhu Lei, Zhu Guangxiang

*Beijing Jiaotong University*

Liu Jiankun

### *Secretariat*

Olga Alekseeva, Permafrost Institute

Zhao Shuping, CAREERI

Lilia Prokopieva, Permafrost Institute

## БЛАГОДАРНОСТИ

Оргкомитет IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения выражает благодарность Президенту и Правительству Республики Саха (Якутия), которые оказали всемерную поддержку в подготовке симпозиума. Указом Президента Республики Саха (Якутия) Е.А. Борисова был образован республиканский Оргкомитет под председательством заместителя Председателя Правительства Республики Саха (Якутия) Ф. В. Габышевой, в который вошли руководители министерств, крупных хозяйствующих субъектов, а также муниципальных образований «г. Мирный» и «Мирнинский район».

Оргкомитет выражает благодарность проректору по научной работе Северо-Восточного Федерального Университета В. Ю. Фридовскому, генеральному директору АК «Якутскэнерго» О. В. Тарасову, директору ОАО «ЯКУТПНИИС» О. И. Матвеевой, директору Института биологических проблем криолитозоны СО РАН П. А. Ремигайло, директору ФГУ «Автомобильная дорога «Виллой» Н. И. Андрееву, заместителю главы муниципального образования «Мирнинский район» В. Г. Шпану, заместителю директора Института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» И. В. Зырянову и ученому секретарю этого института И. Ф. Бондаренко за поддержку, всемерное содействие, организационную и консультативную помощь в подготовке и проведении симпозиума.

---

## ОРГКОМИТЕТ

### Сопредседатели

Чжан Р.В., директор Института мерзлотоведения СО РАН (г. Якутск, Россия)  
Ма Вэй, зам. директора Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР (г. Ланьчжоу, Китай)  
Чжу Вэй Чжун, директор Хэйлунцзянского научно-исследовательского института по строительству в холодных регионах (г. Харбин, Китай)

### Члены

*Институт мерзлотоведения СО РАН*

Кузьмин Г.П., Расстегаев И.К., Шестернев Д.М., Шепелев В.В., Макаров В.Н.,  
Гурьянов И.Е., Великин С.А., Ефремов В.Н., Нерадовский Л.Г., Ли Л.Г.

*Институт инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР*

Ню Фу-цзюнь, Лай Юаньмин, У Цинбай

*Хэйлунцзянский научно-исследовательский институт по строительству в холодных регионах*

Ван Цзи Лян, Чжу Лэй, Чжу Гуан Сян

*Пекинский транспортный университет*

Лю Цзянькунь

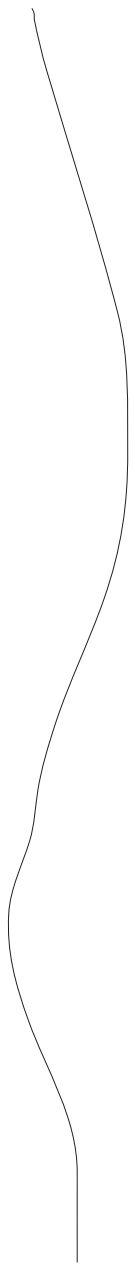
### Секретариат

Алексеева О.И., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Чжао Шупин, Институт инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов

Прокопьева Л.В., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

**PLENARY PAPERS**  
**ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ**





## **Melnikov Permafrost Institute investigations in support of the mega-projects in Yakutia, East Siberia**

R.V. Zhang

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

**Abstract.** A number of federal mega-projects are taking place in permafrost regions of Yakutia and adjacent territories. These major industrial developments include the South Yakutian hydropower complex, the Talakan oil and gas condensate field; the Elkon uranium deposit; the iron ore and coal fields in southern Yakutia; and the Ulak – Elge and Tommot – Kerdem – Yakutsk railroads. During the period from 2006 to 2011 the Melnikov Permafrost Institute has been actively involved in permafrost and geotechnical investigations for the projects undertaken as part of the regional investment programs. The investigations included studies of regional and site permafrost conditions; mapping of permafrost, terrain and environment; modeling; and compilation of geocryological inventories and databases for designing and maintaining large, complex projects. The studies emphasize the importance of integrated geocryological monitoring in preventing degradation of frozen foundation materials that may lead to catastrophic failures. Monitoring programs should involve comprehensive and detailed studies by permafrost professionals through the engineering investigation, construction and operation stages of a project in order to predict occurrence and intensity of detrimental permafrost-related processes. Permafrost investigations in the resource development regions need to be brought up to a higher level, both in scope and funding.

**Keywords:** cryogenic processes; degradation of frozen foundations; ice-rich permafrost; geocryological monitoring; mega-projects.

### **Участие Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в научном сопровождении мегапроектов в Восточной Сибири**

Р. В. Чжан

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: zhang@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** На территории Республики Саха (Якутия) и сопредельных территориях криолитозоны ведется реализация федеральных мегапроектов. Это проекты Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса, Талаканского нефтегазоконденсатного месторождения, Эльконского уранового месторождения, железорудных и угольных месторождений Южной Якутии, алмазонасных рудников «Мир», «Айхал» и «Удачный», нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», железных дорог «Улак – Эльга» и «Томмот – Кердем – Якутск». В период с 2006 по 2011 гг. Институт мерзлотоведения СО РАН активно ведет исследования по их инженерно-геокриологическому сопровождению в рамках региональных инвестиционных программ, сотрудничая с различными хозяйствующими субъектами. Выявлены региональные и локальные особенности геокриологических условий территорий расположения инженерных сооружений, составлены геокриологические, мерзлотно-ландшафтные и экологические карты разного масштаба, выполнены прогнозные расчеты мерзлотной обстановки, созданы каталоги и базы геокриологических данных, являющиеся основой проектных решений и прогноза устойчивости комплексов сооружений. Результаты исследований показали, что для предотвращения деградации мерзлых оснований, ведущих к катастрофическим последствиям, необходим комплексный геокриологический мониторинг по изучению закономерностей развития и прогнозирования интенсивности опасных криогенных процессов с обязательным привлечением специалистов-мерзлотоведов, занимающихся их всесторонним и углубленным изучением на стадиях изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. Геокриологические исследования в осваиваемых регионах криолитозоны необходимо поднять на более высокий уровень, как по масштабности, так и по материально-технической оснащенности этих работ.

**Ключевые слова:** криогенные процессы; деградация мерзлых оснований; ледовый комплекс; геокриологический мониторинг; мегапроекты.

## Участие Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в научном сопровождении мегапроектов в Восточной Сибири

Р. В. Чжан

### Введение

Мерзлотоведение (геокриология) сформировалось в двадцатых годах прошлого века на стыке геологических, географических, геофизических и инженерно-технических дисциплин в ответ на запросы практики в связи с началом освоения огромных территорий, занятых мерзлыми толщами горных пород (криолитозоной). Роль геокриологической науки на современном этапе развития России определяется перспективой расширения и интенсификации хозяйственного освоения северных и восточных территорий, находящихся в криолитозоне. В связи с этим уже создана и продолжает развиваться достаточно мощная и дорогостоящая, но уязвимая в отношении устойчивости сооружений инфраструктура: нефтегазопромысловые объекты, магистральные нефте- и газопроводы протяженностью в тысячи километров, шахты и карьеры, гидроэлектростанции, возведены крупные города и поселки, построены автомобильные и железные дороги, аэродромы и порты.

Институт всегда осуществлял геокриологические исследования при строительстве и эксплуатации различных зданий и сооружений в сложных геокриологических условиях. Наиболее значимыми объектами, где проводились инженерно-геологические, инженерно-геокриологические и мерзлотно-гидрогеологические исследования, являются каскады Вилюйских и Курейских гидроэлектростанций, Хантайская, Амгуэмская и Усть-Среднеканская ГЭС, Амуро-Якутская железнодорожная магистраль, Ленский золоторудный комплекс, ГОКи «АЛРОСА» и др.

В разные годы разработаны и реализованы на практике следующие способы и методы строительства зданий и сооружений в условиях криолитозоны: свайные фундаменты с проветриваемым подпольем; свайные фундаменты с «холодными сваями» – железобетонными сваями с встроенными в них охлаждающими устройствами; свайные фундаменты с буронабивными сваями; поверхностные фундаменты (фундаменты-оболочки, фундаменты структурного типа и плоские фундаментные плиты с сотовым заполнителем); подземный способ

прокладки трубопроводов; метод строительства подземных емкостей (аккумуляторы холода, емкости для хранения различных продуктов, газов и ГСМ); метод обеспечения фильтрационной и статической устойчивости мерзлых плотин; метод сохранения мерзлых оснований инженерных сооружений с помощью сезоннодействующих охлаждающих систем; метод сохранения мерзлых оснований инженерных сооружений за счет использования тепловых насосов.

Устойчивое экономическое и социальное развитие во многом зависит от осуществления федеральных мега-проектов, реализуемых на территории Республики Саха (Якутия) и сопредельных территориях. Это – проекты Южно-Якутского гидроэнергетического комплекса, Талаканского нефте-газо-конденсатного месторождения, Эльконского уранового месторождения, железорудных и угольных месторождений Южной Якутии, алмазонасных рудников «Мир», «Айхал» и «Удачный», проект нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан», проекты железных дорог «Улак – Эльга» и «Томмот-Кердем-Якутск» и др. Успешная реализация этих проектов связана с безаварийной эксплуатацией различных инженерных сооружений. Учитывая, что специфика мерзлых грунтов определяется динамикой их свойств в зависимости от температуры, давления и других факторов, геокриологический прогноз является важнейшим компонентом в оценке устойчивости сооружений в условиях потепления климата. Объектами мониторинговых исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов, мерзлотные процессы и явления. Изучаются состав, физические и теплофизические свойства пород, их тепловой режим, условия теплообмена с атмосферой, характеристики температурообразующих факторов (климата, растительного, напочвенного и снежного покровов), проводятся измерения дебита источников, уровенные и гидрохимические наблюдения. Результаты этих работ дают основу для разработки методик прогноза, необходимых для научно обоснованных и экономически целесообразных рекомендаций по управлению мерзлотным процессом.

## Состав работ и результаты научного сопровождения мега-проектов

В период с 2006 по 2011 гг. Институт мерзлотоведения СО РАН активно ведет исследования по инженерно-геокриологическому сопровождению мега-проектов, сотрудничая с различными хозяйствующими субъектами на стадиях изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. Проведены следующие исследования:

1. По Южно-Якутскому гидроэнергетическому комплексу: дана характеристика природной среды (криолитозона, подземные воды, ландшафты, климат, атмосферный воздух, геоморфология) территории проектируемого каскада ГЭС на р. Тимптон; инженерно-экологические исследования в створах проектируемых ГЭС на р. Тимптон.

2. По нефтепроводу «Восточная Сибирь – Тихий Океан» (ВСТО): геокриологические исследования участка трассы ВСТО Алдан-Тында (рис. 1); мониторинг геологической среды (криолитозона, экзогенные процессы, поверхностные воды и донные отложения) в период строительства нефтепровода ВСТО на участках Алдан-Тында, Тында-Сковородино; разработка системы экологического мониторинга трассы нефтепровода ВСТО на участке Алдан-Нагорный; аэровизуальное обследование коридора трассы ТС ВСТО-1; инженерно-геологическая характеристика участков трассы ТС ВСТО-1 со сложными геологическими условиями.



Рис. 1. Мониторинг геологической среды в период строительства трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан» (участки: Алдан – Тында, Тында – Сковородино).

3. Геокриологические исследования с использованием дистанционных методов зондирования криолитозоны железорудных

месторождений Алданского щита: «Таежное», «Дёс», «Тарыннах» и «Горкит» (Южная Якутия). Геокриологические исследования на территориях Таежного и Тарыннахского месторождений (со сдачей раздела в ГК СССР по подсчетам запасов полезных ископаемых).

4. Многолетний мониторинг Эльгинского месторождения каменного угля со сдачей раздела в ГК СССР по подсчетам запасов полезных ископаемых; эколого-геокриологические и мерзлотно-ландшафтные исследования территории месторождения и железнодорожного подъездного пути; геотермические и эколого-геохимические исследования на участках Чульмакан, Денисовский, Холодникан, Локучакит (рис. 2).

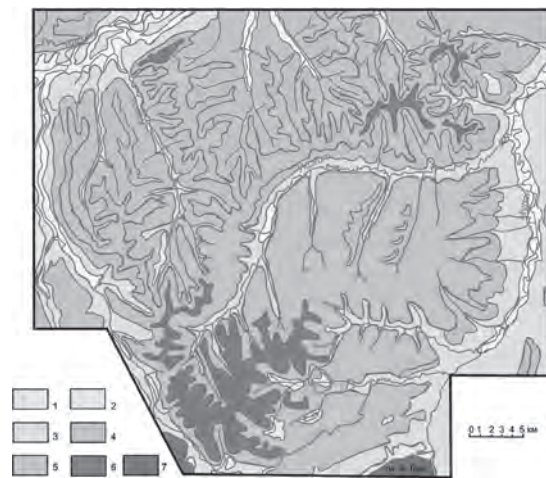


Рис. 2. Геокриологическая карта Эльгинского месторождения:

1 – талики; 2-7 мощность (м) и температура (тп, °С) многолетнемерзлых пород:  
2 – от 0 до 50 м, тп – от 0 до -1,5;  
3 – от 0 до 100 м, тп – от 0 до -2,5;  
4 – от 20 до 50 м, тп – от -0,2 до -1,0;  
5 – от 50 до 100 м, тп – от -0,5 до -1,5;  
6 – от 100 до 200 м, тп – от -1,5 до -2,5;  
7 - > 200м, тп – ниже -2,5.

5. По рудникам «Интернациональный», «Мир», «Айхал», «Удачный» (Западная Якутия): исследование и оценка состояния грунтов методами геофизики; эколого-геохимические исследования (рис. 3).

Созданы системы геотермического контроля на подземных рудниках «Интернациональный» и «МИР» в Западной Якутии. Эти системы представляют собой комплекс расчетных и прогнозных программ по регулированию режима замораживания свайного основания в соответствии с данными термо



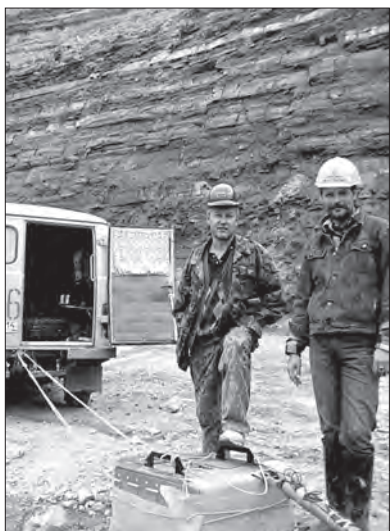


Рис. 3. Сотрудники института при проведении геофизических исследований внутри трубки «Удачная».

метрических наблюдений по скважинам. Использование систем геотермического контроля позволит оперативно управлять мерзлотными условиями оснований, что обеспечит устойчивость сооружений (рис. 4).

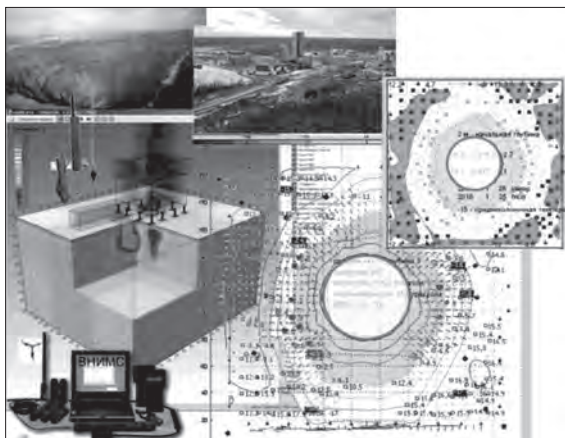


Рис. 4. Интерпретация системы геотермического контроля подземного рудника «Мир» в Западной Якутии.

С 1965 г. Вилюйская научно-исследовательская мерзлотная станция (ВНИМС) института ведет наблюдения на крупных гидротехнических сооружениях, в том числе Вилюйских ГЭС 1 и 2, Светлинской ГЭС (Вилюйской ГЭС-3), ряде водохранилищ Западной Якутии, а также в основаниях сооружений шахтных копров и других объектов. Создана долговременная система геофизических натурных наблюдений (скважинного геофизического мониторинга) для оперативного контроля и прогноза состояния массивов горных пород в береговых примыканиях и приплотинной

части водохранилищ в период строительства и эксплуатации. Ведется разработка и внедрение программно-аппаратного комплекса для геокриологического мониторинга крупных гидротехнических сооружений в зоне вечной мерзлоты (рис. 5).

а)



б)

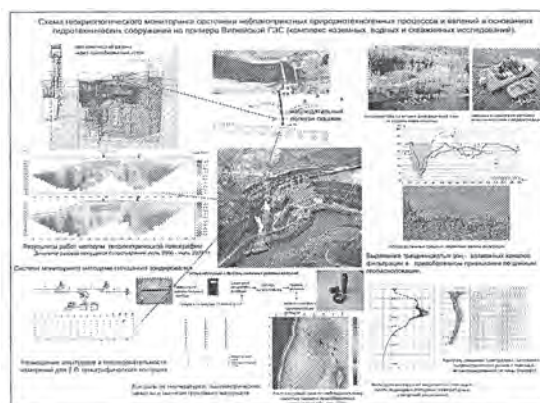


Рис. 5.

а) Вилюйская ГЭС-1 – первое в мире крупное гидротехническое сооружение на вечной мерзлоте; б) схема геокриологического мониторинга состояния неблагоприятных природно-технических процессов в основаниях гидротехнических сооружений на примере Вилюйской ГЭС.

7. В сфере освоения и развития золотодобывающей промышленности: исследования теплового режима Нежданнинского месторождения, выдача исходных данных для проектирования; криогенные процессы Южного Верхоянья; геотемпературное поле и криогенные процессы в среднем течении р. Кючус.

8. По освоению Эльконского месторождения: характеристика деятельного слоя и геотемпературного поля многолетнемерзлой толщи в пределах Эльконского горста для оценки устойчивости тяжелых конструкций на земной поверхности; характеристика со-

временного состояния мерзлотных условий, климатических характеристик и подземных вод в рамках комплексных экологических исследований на территории Эльконского горста.

9. Проведены геокриологические исследования в зоне воздействия Эвенкийской (Туруханской) ГЭС на реке Нижняя Тунгуска. Выделены Туруханская, Ногинская, Нидымская и Юктайская геокриологические зоны на территории проектирования Эвенкийского гидроузла. Охарактеризованы протекающие здесь процессы сезонного оттаивания и промерзания грунтов. Приведены данные об их составе, мощности и температуре в горизонте годовых теплооборотов. Рассмотрены особенности криогенного строения поверхностных отложений. Дана оценка объемной льдистости представительных типов и разновидностей мерзлых толщ.

10. Геокриологический мониторинг на Ванкорском месторождении нефти (Красноярский край) (рис. 6): составлена карта ландшафтной основы в масштабе 1 : 25 000 с оцифровкой для ГИС-проекта «ВАНКОР», необходимого для дальнейших геокриологических исследований; собраны материалы по геомерзлотным исследованиям скважин, содержащие серию мерзлотно-геотермических разрезов до глубины 1500-2500 м, характеристику инженерно-геокриологических условий территории месторождения, а также теплофизические параметры основных типов горных пород Хетско-Енисейской области Западно-Сибирской низменности.

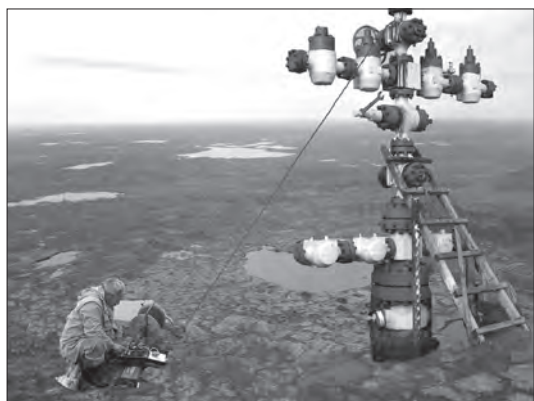


Рис. 6. Геомерзлотное исследование скважин.

11. По железным дорогам Якутии: научное сопровождение инженерно-геологических изысканий и строительства Амуро-Якутской железной дороги на участке Томмот - Кердем; геокриологический мониторинг; эколого-геохимические исследования; мониторинг состояния насыпи, выемок, искусственных сооружений. Обследована трасса железной

дороги от Беркакита до Томмота. На эксплуатируемой части трассы так же, как на всей дороге обнаружены неблагоприятные для её эксплуатации участки (размыв откосов насыпей, разрушение снегоудерживающих щитов, формирование наледей, наклонение столбов электрической сети и др.) (рис. 7). Разработаны рекомендации по устранению негативных проявлений криогенных процессов.



Рис. 7. Крен опор ЛЭП.

В результате работ по мега-проектам выявлены региональные и локальные особенности геокриологических условий территорий расположения инженерных сооружений. Составлены геокриологические, мерзлотно-ландшафтные и экологические карты разного масштаба. Выполнены прогнозные расчеты мерзлотной обстановки, созданы каталоги и базы геокриологических данных, являющиеся основой проектных решений и прогноза устойчивости комплексов сооружений.

### Заключение

Результаты исследований показали, что для предотвращения деградации мерзлых оснований, ведущих к катастрофическим последствиям, необходим комплексный геокриологический мониторинг по изучению закономерностей развития и прогнозирования интенсивности опасных криогенных процессов с обязательным привлечением специалистов-мерзловедов, занимающихся их всесторонним и углубленным изучением на стадиях изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. Геокриологические исследования в осваиваемых регионах криолитозоны необходимо поднять на более высокий уровень, как по масштабности, так и по материально-технической оснащенности этих работ.

## **Engineering and geocryological map of the Sakha Republic (Yakutia) and adjacent areas, scale 1:2,500,000**

R.V. Zhang, V.B. Spektor, O.I. Alekseeva, Ya.I. Torgovkin,  
A.A. Shestakova, L.D. Ivanova, V.V. Spektor

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: vspektor@mail.ru

**Abstract.** A new overview Engineering and Geocryological Map, scale 1:2,500,000, was compiled for the territory of the Sakha Republic (Yakutia), Magadan Region and small adjacent areas. The map reflects ground, geocryological, dynamic, climatic, and engineering-geological conditions of the territory. The main visual element of the map – the color, is given to ground conditions. The territory characteristics include almost everywhere occurring of the class of natural frozen ground, everywhere occurring of active cryogenic processes, extensively wide occurring of the active layer ground water, and, rarer, talik ground water, and association of the territory with anomalously low air temperatures. The map is compiled in hard copy and electronic format. Due to an intensive exploration of this territory in recent time and lack of contemporary information on engineering-geological characteristics we suggest publishing the Engineering-Geocryological Map in hard copy and electronic format.

**Keywords:** map; engineering geocryology; geology; ground; processes.

## **Инженерно-геокриологическая карта РС(Я) и прилегающих территорий м-ба 1:2 500 000**

Р. В. Чжан, В. Б. Спектор, О. И. Алексеева, Я. И. Торговкин,  
А. А. Шестакова, Л. Д. Иванова, В. В. Спектор

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: vspektor@mail.ru

**Аннотация.** Построена обзорная Инженерно-геокриологическая карта масштаба 1:2 500 000 территории Республики Саха (Якутия), Магаданской области и небольших участков прилегающих областей. На карте отражены грунтовые, геокриологические, динамические, климатические и инженерно-геологические условия территории. Основной изобразительный элемент карты – цвет отдан грунтовым условиям. К особенностям территории относятся: практически повсеместное распространение класса природных мерзлых грунтов, повсеместное распространение активных криогенных процессов, чрезвычайно широкое распространение вод деятельного слоя и, реже, вод таликов, приуроченность территории к области распространения аномально низких температур приземного слоя воздуха. Карта составлена на твердом и электронном носителях. В связи с интенсивным освоением данной территории в самое последнее время и дефицитом современной информации об инженерно-геологических особенностях этой территории предлагается издать Инженерно-геокриологическую карту на бумажном и электронном носителях.

**Ключевые слова:** карта; инженерная геокриология; геология; грунты; процессы.



## Инженерно-геокриологическая карта РС(Я) и прилегающих территорий м-ба 1:2 500 000

Р. В. Чжан, В. Б. Спектор, О. И. Алексеева, Я. И. Торговкин,  
А. А. Шестакова, Л. Д. Иванова, В. В. Спектор

### Введение

В 2011 г. в Институте мерзлотоведения было завершено составление макета Инженерно-геокриологической карты РС(Я) и прилегающих территорий масштаба 1:2 500 000. Эта карта охватывает, кроме территории РС(Я), Магаданскую область и небольшие, прилегающие к РС(Я) участки Красноярского края, Иркутской области, Хабаровского края. Суммарно площадь карты охватывает около 5 млн. кв. км, что составляет около 1/4 площади России. Предлагаемая карта является продолжением и вариантом соответствующей части завершенной в 2010 г. Инженерно-геологической карты России м-ба 1:2 500 000 (редакторы д.г.-м.н. В.С. Круподеров и д.г.-м.н. В.Т. Трофимов). Рассматриваемая карта сохраняет некоторые принципы, положенные в основу карты-предшественницы, но отличается по содержанию.

Необходимо констатировать, что крупнейший по размерам и динамичный регион России – Северо-Восток, к настоящему времени оказался не обеспеченным необходимой современной информацией по инженерно-геологическим условиям. В настоящее время здесь уже функционируют, возводятся и планируются крупные инженерные сооружения, которым, при хорошо спланированной стадийности работ, должны предшествовать обзорные аналитические и специальные инженерно-геологические карты. Несомненно, также, что проекты от части функционирующих сооружений таких, как трубопровод ВСТО, железная дорога Томмот-Якутск, продолжение каскада ГЭС на р. Вилюй и др., не претерпят существенных изменений и после издания предлагаемой Инженерно-геокриологической карты. Однако в проекты, находящиеся в самой начальной стадии разработки: продолжение железной дороги в сторону Мирного и Магаданскую область, каскад Тимптонских ГЭС, комплекс горнодобывающих предприятий в Южной и Центральной Якутии и др., может быть внесена соответствующая корректировка, учитывающая новую информацию, сконцентрированную в обзорных инженерно-геологических картах. В число первых картографических продуктов, освещающих специфические инженерно-геологические условия Северо-

Востока, должна войти представляемая Инженерно-геокриологическая карта масштаба 1:2 500 000

Предлагаемая карта является актуальной для прогноза устойчивости возводимых и эксплуатируемых сооружений, взаимодействия этих сооружений с окружающей средой и оценки экологических последствий эксплуатации этих сооружений в условиях меняющегося климата.

По своим основополагающим принципам предлагаемая карта представляет собой обобщенную графическую модель инженерно-геологических условий, совмещенную с топографической основой [1, с. 5]. Отдельные компоненты карты, отражающие виды или группы видов инженерно-геологических условий, а также топографическая основа представлены в виде цифровых моделей в формате ArcGis 9. По своему содержанию предлагаемая карта является *синтетической специальной*, то есть такой, на которой инженерно-геологические условия характеризуются комплексно, но делается упор на один из компонентов условий. В данном случае *специальный* акцент придается геокриологическим условиям, поскольку эти условия определяют специфику грунтового субстрата, гидрогеологии и ведущих экзогенных процессов. Другими важнейшими из инженерно-геологических условий, показанными на карте, являются рельеф, и современные эндогенные геологические процессы и явления, некоторые климатические параметры. Ряд из этих факторов (сейсмические, климатические) отражен на картах-врезках. По широте охвата факторов инженерно-геологических условий составленная карта близка к *синтетическому общему* типу карт. По этим же признакам, предлагаемая карта отличается от *аналитических и специальных* карт, на которых дается характеристика одного или нескольких компонентов инженерно-геологических условий для какого-либо конкретного вида строительства.

По своему масштабу 1:2 500 000 представляемая карта является обзорной.

В качестве источника информации для блока составленной инженерно-геологической карты были использованы имеющиеся картографические обобщения более крупного масштаба. В частности, для отражения грунтовых

условий территории использовались геологические карты масштаба 1:1 500 000 [2-5], а на наиболее сложные участки - карты масштаба 1: 1 000 000 и даже масштаба 1:500 000. Определенная часть информации о грунтовых условиях была почерпнута из многотомного издания «Геологии СССР» [6-9 и др.] и из более поздних обобщающих работ [10]. При составлении карты была учтена информация и методические приемы районирования грунтовых условий, помещенные в многотомнике «Инженерная Геология СССР» [11, 12 и др.]. Основными источниками геокриологической информации являлись опубликованные и фондовые данные Института Мерзлотоведения. Определенная часть информации и методические подходы ее отображения на карте были почерпнуты из обобщающих работ [13-15 и др.] и, в частности, по территории РС(Я) [16]. В основу гидрогеологической информации о рассмотренной территории были положены исследования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Московского государственного университета, научно-исследовательского института геологии Арктики и Антарктики и др. научных организаций и высших учебных заведений. Значительная часть фактического материала о составе и свойствах грунтовых и надмерзлотных вод была почерпнута из записок к картам среднего масштаба и обобщающих работ [17-20 и др.]. Сведения о современных геологических процессах в значительной степени были получены в результате многолетних исследований территории сотрудниками Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, а также из обобщающих работ [21, 22 и др.]

### Структура карты

Предлагаемая карта состоит из нескольких самостоятельных компонент, которые объединяются по принципу общей цели, общности территории, общности масштаба и увязаны по содержанию. Каждый самостоятельный компонент карты инженерно-геологических условий представлен в виде отдельной электронной карты или карты-врезки, отражающей один из главных видов инженерно-геологических условий (рельеф, грунтовые, геокриологические, экзогенные и эндогенные процессы, климат). В электронном формате синтетической карте соответствует *папка комплекта*, которая содержит папки элементов цифровой модели комплекта. В каждой *папке элементов* цифровой модели содержатся *пакеты*, содержащие описание набора геолого-картографических объектов

цифровой модели компоненты, объединенных по смысловой нагрузке. Пакет состоит из одного и более *слоев*. *Слои* – это основные структурные элементы, из которых строится цифровая модель. Каждый слой содержит описание набора атрибутов, относящихся к одному геометрическому типу. Различаются полигональные, линейные и точечные слои.

Слои цифровой модели карты сопровождаются атрибутивными таблицами, в которых содержатся все данные оформления и подписи, изображенные на карте. Предполагается издание синтетической карты на твердой основе, но рабочий вариант карты может и должен использоваться в электронной форме.

### Содержание карты

На представляемой карте приоритетными являются следующие компоненты инженерно-геологических условий: грунтовые, геокриологические, гидрогеологические, экзогенные процессы, эндогенные процессы, климатические, рельеф.

*Грунтовые условия* являются важнейшим атрибутом любой инженерно-геологической карты. Поэтому грунтовой основе отдано наиболее выразительное изобразительное свойство картографической продукции – цвет. При этом каждый цвет соответствует классу грунтов, а оттенки цвета их инженерным свойствам. Наиболее устойчивые грунты выделены мягкими, а наиболее опасные в инженерном отношении – яркими оттенками цвета. Подавляющая часть приповерхностного (инженерно-геологического) слоя территории сложена грунтами III класса, к которым относятся природные мерзлые грунты с криогенными структурными связями [23]. В классе мерзлых грунтов выделяются (аналогично немерзлым) группы скальных, полускальных и связных и ледяных грунтов. Криогенные текстуры скальных пород связаны с трещинами, заполненными водой. В пределах рассматриваемой территории скальные грунты, выходящие на дневную поверхность, повсеместно трещиноваты на глубину до первых десятков метров. Это тектонические трещины и трещины отдельности, а также карстово-трещинные полости в карбонатных скальных грунтах. В большинстве случаев трещины заполнены инфильтрационным или инъекционным типом льда. В полускальных грунтах, кроме того, встречаются пластово-трещинные и пластово-трещинно-поровые криогенные текстуры. Дисперсные мерзлые грунты показаны в двух вариантах: 1 - цветом, если мощность их превышает 10 м и в виде



знака двухслойного разреза, если их мощность составляет 3-10 м. Покровы дисперсных отложений менее 3 м на карте не показаны. Буквенными обозначениями на карту вынесен возраст грунтов (до отдела), а для дисперсных грунтов и генезис.

*Геокриологические факторы* показаны на карте цветной штриховкой. При этом разной густотой и направленностью штриховки выделены площади островной, прерывистой и сплошной криолитозоны. Сплошная мерзлота разделена по температуре в слое нулевых годовых колебаний: ниже  $-5^{\circ}$ ,  $-3^{\circ} \div -5^{\circ}$ ,  $-1^{\circ} \div -3^{\circ}$ ,  $0^{\circ} \div -1^{\circ}$ . Кроме того, разной толщиной штриховки показаны сильно льдистые и слабо льдистые грунты. Специальными знаками показаны распространение повторно-жильных льдов, пластовых льдов, площади распространения криопэгов, максимальные мощности криолитозоны, частое чередование по площади талых и многолетнемерзлых пород, площади распространения несливающейся мерзлоты и др.

*Среди проявлений экзогенных геологических процессов* наибольшим распространением на территории пользуются криогенные процессы. Повсеместно распространено криогенное выветривание, чрезвычайно широко распространены солифлюкция и сплывы, термокарст, морозное пучение, наледность. Площади развития этих и других процессов (лавин, обвалов, оползней и пр.) или их сочетаний показаны в виде полигонов, в центре которых буквами обозначены виды преобладающих процессов. Степень развития процесса или их групп: менее 5%, 5-25% и более 25% площади, определяется в буквенной подписи. Линейные проявления процессов (термоабразия, термоэрозия) и точечные (отдельные термосуффозионные, карстовые воронки, лавины обвалы, оползни, и пр.) показаны специальными знаками.

*Проявления эндогенных геологических процессов* (направления современных движений, разломы, вулканы) показаны знаками, а площадные (зоны сейсмических воздействий) оконтурены с вынесением балльности.

*Гидрогеологические факторы* показаны на карте крапом. Грунтовые (на участках прерывистой и островной мерзлоты) и надмерзлотные воды разделены по глубине залегания и агрессивности (углекислотная, сульфатная, разной агрессивности и неагрессивные).

*С климатическим фактором* связаны показанные на карте (в форме врезок) площади распространения процессов, обусловленных чрезвычайно низкими температурами, наледей и заторных явлений.

*Рельеф и гидросеть* показаны также как, и на Физико-географической карте России м-ба 1:2 500 000, без изменений, группирования и классификации.

### **Обсуждение результатов**

Предлагаемая карта существенно отличается от составленных ранее инженерно-геологических карт содержанием (специальной направленностью, детальностью), формой (на электронном и бумажном носителях), наличием базы данных, и широкими возможностями работы в диалоговом режиме.

На первой из обзорных инженерно-геологических карт России [24] в качестве основного и, практически единственного, элемента картирования, который выделен цветом, была принята геологическая формация. Знаками выделены разрывные нарушения и особо активные экзогенные процессы. Инженерно-геологические группы (рыхлые, скальные и полускальные) и подгруппы (глинистые, песчаные, крупнообломочные и т.д.) грунтов, а также преобладающий их состав (например, супеси, суглинки с песком, гравием и валунами) были показаны штриховкой. С точки зрения авторов предлагаемой карты, «формация» – это субъективная категория, относящаяся к области тектоники и исторической геологии, не имеет прямой связи с инженерно-геологическими условиями территории и не несет необходимой информации о свойствах грунтов. Большим недостатком рассматриваемой карты является отсутствие геокриологической характеристики грунтов, хотя площадь распространения многолетнемерзлых пород в пределах предлагаемой карты составляет 98%, на территории России составляет 65%, а в мире - 25% [25]. К числу недостатков карты можно отнести также отсутствие на ней отображения рельефа местности. Тем не менее, эта карта для своего времени стала крупным событием в инженерной геологии, поскольку на ней впервые были представлены в обобщенном виде инженерно-геологические условия всей территории современной России и сопредельных государств.

Как было отмечено выше, в последнее время завершена Современная Инженерно-геологическая карта России м-ба 1:2 500 000, которая в настоящее время передается в Российские геологические фонды. Генеральным заказчиком работ является Министерство природных ресурсов РФ, а в качестве подрядчика выступил Всероссийский институт инженерной геологии и гидрогеологии (ФГУП «ВСЕГИНГЕО», Москва). В работе приняли участие несколько крупных производствен-

ных и научных организаций, в том числе и данный авторский коллектив ИМЗ СО РАН. К сожалению, издание этой карты в ближайшее время не ожидается. Данная карта является непосредственной предшественницей предлагаемой нами Инженерно-геокриологической карты и воплощает основные принципы современного инженерно-геологического картирования. Недостатком карты, в отличие от предлагаемой, является то, что на ней не показаны грунты III класса («Природные мерзлые грунты»). Это не позволяет в полной мере оценить инженерно-геологические особенности картируемых территорий и ведет к завышению оценки инженерной устойчивости грунтов. Подобная ошибка была совершена при проектировании Вилюйского водохранилища, когда вмещающие водохранилище траппы были неверно отнесены к I классу природных скальных грунтов. При правильной оценке эти грунты должны быть отнесены к природным скальным мерзлым грунтам III класса. Неверная оценка привела к тому, что трещины в траппах, заполненные льдом, не были своевременно изолированы, и, в результате, на правобережном примыкании плотины Вилюйского водохранилища возникли значительные утечки воды.

Все перечисленные элементы содержания карты в принципе могут быть совмещены и отпечатаны на бумажном носителе. Однако такой совмещенный вариант карты будет трудно читаем. Возможно сокращенное совмещение двух или трех элементов инженерно-геологических условий, например, грунтового и геокриологического факторов или геокриологического и гидрогеологического. Такой сокращенный вариант карты, отпечатанный на бумажном носителе, безусловно, дает необходимую информацию о главных факторах инженерно-геологических условий, и позволяет определить основные направления инженерно-геологических изысканий, выполнять определенные образовательные функции. Однако анализ всего собранного в представляемой инженерно-геологической карте материала возможен только в электронном варианте.

### Заключение

Предлагаемая карта несет важную, необходимую информацию об инженерно-геологических условиях значительной части Северо-Востока России. По своему содержанию она отражает основное свойство данной территории – практически повсеместное распространение многолетнемерзлых грунтов, чрезвычайную активность криогенных про-

цессов, повсеместное распространение абсолютных минимумов температур ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ , широкое развитие сейсмических явлений. Простое перечисление этих особенностей территории указывает на исключительную сложность присущей ей инженерно-геологических условий. Дальнейшее экономическое освоение такой территории немыслимо без составления серии общих, специальных, аналитических и обзорных инженерно-геологических карт. Предлагаемая нами работа в определенной степени заполняет существующий пробел в инженерно-геологическом обеспечении территории Северо-Востока России. Авторы считают необходимым в ближайшем будущем рассмотреть составленную Инженерно-геокриологическую карту м-ба 1:2 500 000 компетентными экспертами и, в случае одобрения, издать ее на твердом и электронном носителе.

### Список литературы

1. Трофимов, В. Т. Инженерно-геологические карты: учебное пособие / В. Т. Трофимов, Н. С. Красилова. - М. : КДУ, 2007. - 384 с.
2. Геологическая карта Северо-Востока СССР. Масштаб 1:1500000 / Ред. М. Е. Городинский. 1980.
3. Геологическая карта Северо-Востока СССР. Масштаб 1:1500000. Таблицы региональной легенды. - Магадан, 1982.
4. Геологическая карта региона Байкало-Амурской магистрали. Масштаб 1:1500000.- Л. : ВСЕГЕИ, 1977.
5. Геологическая карта РС(Я). Масштаб 1:1500000. - СПб., 2002.
6. Геология СССР. Том XIX. Хабаровский край и Амурская область. Книга 1. Геологическое описание. - М. : Недра, 1966. - 732 с.
7. Геология СССР. Том XXX. Северо-Восток СССР. Книга 1. Геологическое описание. М. : Недра, 1970. - 548 с.
8. Геология СССР. Том XVIII. Западная часть Якутской АССР. Книга 1. Геологическое описание. - М. : Недра, 1970. - 535 с.
9. Геология СССР. Том XLII. Южная Якутия. Геологическое описание. - М. : Недра, 1972. - 495 с.
10. Геология Якутской АССР. - М. : Недра, 1981. - 300 с.
11. Инженерная геология СССР. Т. 3 / Ред. Г. С. Савельева. - М.: Изд-во МГУ, 1977.
12. Инженерная геология СССР. Т. 4 / Ред. Г. С. Савельев. - М.: Изд-во МГУ, 1977.
13. Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:2500000. Картпредприятие, 1997.
14. Геокриология СССР. Т. III. Средняя Сибирь. - М. : Недра, 1989. - 414 с.
15. Геокриология СССР. Т. IV. Восточная Сибирь и Дальний Восток. - М. : Недра, 1989. - 515 с.

16. Федоров, А.Н. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутии / А. Н. Федоров, Т. А. Ботулу, С. П. Варламов. - М.: ГУГК, 1991.

17. Карта надмерзлотных вод Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:2 500 000 / Ред. П. И. Мельников. - Якутск : Аэрогеодез. предпр., 1993. - 6 л.

18. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири. Масштаб 1:2 500 000. / Ред. П. И. Мельников. - Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1980. - 4 л.

19. Гидрогеологическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000 / Ред. Д. И. Жив. - М. : ГУГК, 1969. - 16 л.

20. Гидрогеологическая карта Якутской АССР. Масштаб 1:2 500 000 / Ред. А. И. Ефимов, И. К. Зайцев. - Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР; Изд-во Якутского гос. ун-та, 1967. - 4 л.

21. Основы геоэкологии. Ч. 4. Динамическая геоэкология / Ред. Э. Д. Ершов. - М. : Изд. МГУ, 2001. - 688 с.

22. Карта экзогенных геологических процессов России. Масштаб 1:2 500 000 / Гл. ред. А. И. Шеко. Подготовка к изданию АООТ «ВНИИЗАРУБЕЖ-ГЕОЛОГИЯ», 2000, отпечатан ООО «Кор Тэс+», 2000.

23. ГОСТ 25100-95. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. Межгосударственная комиссия по стандартам и нормированию. - М. : ИИК, Изд-во стандартов, 1996. - 21 с.

24. Инженерно-геологическая карта СССР. Масштаб 1:2500000. 1968 г. отпечатана в типографии ВАГТ. - М., 1972.

25. Ершов, Э. Д. Общая геоэкология : учебник / Э. Д. Ершов. - М. : Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

### References

1. Trofimov, V.T., Krasilova, N.S. 2007. *Engineering-Geological Maps: textbook*. Moscow: KDU. 384 pp. (in Russian)

2. Gorodinski, M.E., ed. 1980. *Geological map of the North East of the USSR*. Scale 1:1,500,000 (in Russian)

3. 1982. *Geological map of the North East of the USSR*. Scale 1:1,500,000. Tables of the regional legend. Magadan (in Russian)

4. 1977. *Geological map of the Baikal-Amur railroad region*. Scale 1:1,500,000. Leningrad: VSEGEI (in Russian)

5. 2002. *Geological map of the Sakha Republic (Yakutia)*. Scale 1:1,500,000. St.Petersburg (in Russian)

6. 1966. *Geology of the USSR*. Volume XIX. Khabarovski krai and Amurskaya oblast. Book 1. Geological description. Moscow: Nedra. 732 pp. (in Russian)

7. 1970. *Geology of the USSR*. Volume XXX.

North East of the USSR. Book 1. Geological description. Moscow: Nedra. 548 pp. (in Russian)

8. 1970. *Geology of the USSR*. Volume XVIII. Western part of the Yakutian ASSR. Book 1. Geological description. Moscow: Nedra. 535 pp. (in Russian)

9. 1972. *Geology of the USSR*. Volume XLII. Southern Yakutia. Geological description. Moscow: Nedra. 495 pp. (in Russian)

10. 1981. *Geology of the Yakutian ASSR*. Moscow: Nedra. 300 pp. (in Russian)

11. Savel'ev, G.S., ed. 1977. *Engineering geology of the USSR*. Volume 3. Moscow: Moscow State University (in Russian)

12. Savel'ev, G.S., ed. 1977. *Engineering geology of the USSR*. Volume 4. Moscow: Moscow State University (in Russian)

13. 1997. *Geocryological map of the USSR*. Scale 1:2,500,000. Kartpredpriyatiye (in Russian)

14. 1989. *Geocryology of the USSR*. Volume III. Middle Siberia. Moscow: Nedra. 414 pp. (in Russian)

15. 1989. *Geocryology of the USSR*. Volume IV. East Siberia and Far East. Moscow: Nedra. 515 pp. (in Russian)

16. Fedorov, A.N., Botulu, T.A., Varlamov, S.P. 1991. *Permafrost and landscape map of Yakutia*. Moscow: GUGK (in Russian)

17. Melnikov, P.I., ed. 1993. *Map of suprapermafrost water of the Republic Sakha (Yakutia)*. Scale 1:2,500,000. Yakutsk: Aerogeodezicheskoye predpriyatiye. 6 sheets (in Russian)

18. Melnikov, P.I., ed. 1980. *Map of permafrost and hydrogeological zoning of Eastern Siberia*. Scale 1:2,500,000. 4 sheets (in Russian)

19. Zhiv, D.I., ed. 1969. *Hydrogeological map of the USSR*. Scale 1:2,500,000. 16 sheets (in Russian)

20. Efimov, A.I., Zaitsev, I.K., ed. 1967. *Hydrogeological map of the Yakutian ASSR*. Scale 1:2,500,000. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR; Yakutsk State University. 4 sheets (in Russian)

21. Ershov, E.D., ed. 2001. *Fundamentals of geocryology*. Volume IV. Dynamic geocryology. Moscow: Moscow State University. 688 pp. (in Russian)

22. Sheko, A.I., ed. 2000. *Map of exogenous geological processes of Russia*. Scale 1:2,500,000. Vniizaru-bezhgeologiya; OOO Kortess (in Russian)

23. 1996. GOST (All-Union State Standard) 25100-95. Interstate standard. Ground. Classification. Interstate commission on standards and standartization. Moscow: IIK; Standard publishing. 21 pp. (in Russian)

24. 1972. *Engineering and Geological map of the USSR*. Scale 1:2,500,000. Moscow: VAGT (in Russian)

25. Ershov, E.D. 2002. *General geocryology: Manual for high school*. Moscow: Moscow University Press. 682 pp. (in Russian)

# Status and prospects of pile foundation engineering in the Earth cryozone in view of global warming

I.K. Rastegaev, S.A. Velikin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: rastegaev2009@yandex.ru

**Abstract.** This paper summarizes the results of long-term investigations in the Norilsk, Yakutsk and Mirny permafrost regions. The history of pile foundation engineering in different regions of the Russian North is examined. The basic pile installation technologies, as well as the latest theoretical and practical results are described. A method for selecting the principle of construction in permafrost is demonstrated which is based on average annual air temperature at a building site varying with warming climate. It is shown that under a warming climate it is necessary to use piles, which are adapted to changes in soil properties. Recommendations are proposed to improve pile designs, installation methods and adaptation to climate warming.

**Keywords:** permafrost and seasonal frost; warming; adaptation of pile designs; recommendations.

## Состояние и перспективы свайного фундаментостроения в криозоне Земли в связи с потеплением климата

И. К. Растегаев, С. А. Великин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: rastegaev2009@yandex.ru

**Аннотация.** В работе обобщены результаты многолетних исследований в Норильском, Якутском и Мирнинском районах криолитозоны. Анализируется история свайного фундаментостроения в разных регионах Севера России. Даны сведения об основных технологиях свайных работ и о последних теоретических и практических результатах. Продемонстрирован метод определения принципа использования многолетнемерзлых грунтов как оснований сооружений, рассчитываемый по среднегодовой температуре воздуха в месте строительства, изменяющейся при потеплении климата. Показано что, при потеплении климата необходимо использовать сваи, которые адаптируются к изменению свойств грунтов. Даны предложения по совершенствованию свай, технологии свайных работ и адаптации фундаментных сооружений к потеплению климата.

**Ключевые слова:** криолитозона; потепление; адаптация конструкций свай; рекомендации.



# Состояние и перспективы свайного фундаментостроения в криозоне Земли в связи с потеплением климата

И. К. Растегаев, С. А. Великин

## Введение

Криозона охватывает целиком зоны пространства грунтов многолетнемёрзлого состояния и сезонного промерзания грунтов талого состояния. Под последней понимают территорию распространения грунтов талого состояния, температура которых хотя бы на непродолжительное время опускается ниже 0 °С.

## Строительство на территории грунтов многолетнемёрзлого состояния

Эта территория составляет около половины площади России. Строительство здесь наиболее трудоёмко, а себестоимость работ «нулевого цикла» при возведении современных многоэтажных жилых домов может достигать половины стоимости самого здания. Тип фундаментов здесь, как правило, свайный. Климатические условия суровые при продолжительном зимнем периоде (арктические районы, районы Крайнего Севера и приравненные к ним территории).

В России строительство свайных фундаментов на территории многолетнемёрзлых грунтов осуществляли сначала на основании СНиП II-Б.6-66, затем СНиП II-18-76 и, наконец, по СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Эти строительные нормы выделяют два принципа использования мёрзлых грунтов в качестве основания для фундаментов.

I принцип – грунты оснований используются в постоянно мёрзлом состоянии в течение всего срока строительства и эксплуатации сооружения, т.е. многолетнемёрзлое состояние грунта сохраняется. Так построены Норильск и Якутск на грунтах, имеющих, как правило, твёрдомёрзлое состояние.

II принцип – многолетнемёрзлые грунты оснований используются в талом (оттаянном) состоянии или допускается их оттаивание в период, предшествующий строительству, в процессе строительства или в процессе эксплуатации сооружений. Так построены Воркута и Магадан на территории островного распространения многолетнемёрзлых грунтов. Здесь грунты имеют незначительные отрицательные температуры. Иногда, хотя и не очень часто, здесь устраивают промораживание грунтов в скважинах до начала строительства или в процессе строительства

как в Норильске (на грунтах пластичномёрзлого состояния) или с помощью охлаждающих устройств после окончания строительства, как в Мирном (например, исследования специалистов Института мерзлотоведения – Р. М. Каменский, В. И. Макаров, А. М. Снегирев, С. А. Великин и др.).

## Строительство на территории грунтов талого состояния

Этот случай менее трудоёмок, а стоимость работ «нулевого цикла» здесь редко превышает десятой части стоимости сооружения. Тип фундамента может быть любой – ленточный, плитный и реже свайный. Климатические условия здесь относительно мягкие, а зимний период не превышает нескольких месяцев года. Строительство здесь осуществляется на основании СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений» и СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

Однако в талых грунтах глубокого, до нескольких метров, сезонного промерзания строительство нулевых циклов по экономическим соображениям целесообразно также вести по свайной технологии, аналогичной для многолетнемёрзлых грунтов. При этом сваи могут быть как висячими, так и стойками. Так построен город Чита на талых грунтах, имеющих глубокое сезонное промерзание. Аналогично устраиваются свайные фундаменты в грунтах редкоостровного распространения многолетнемёрзлых грунтов, например в Игарке.

На территории распространения талых грунтов неглубокого, до долей метра, сезонного промерзания осуществляется прямая забивка свай в грунт и далее эти процессы, как не характерные для криозоны Земли, не анализируются.

Таким образом, рассматриваемая в докладе проблема строительства свайных фундаментов в криолитозоне сводится к анализу способов строительства на территории сплошного и островного распространения многолетнемёрзлых грунтов и на территории глубокого сезонного промерзания талых грунтов в связи с глобальным потеплением климата.

Строительство свайных фундаментов в криолитозоне России насчитывает более восьмидесяти лет, а специфика свайных работ каждого промышленного района Севера

определяется его геокриологическими особенностями, в том числе характером распространения мёрзлых и талых грунтов на площади и глубине, различиями в составе и свойствах грунтов, инженерно-геокриологическими особенностями и другими факторами.

Наличие техники и творчески мыслящих инженеров также влияло на становление разных способов фундаментостороения в 1930-1940 годах. Например, в Норильске велись значительные геологоразведочные работы с помощью станков ударно-канатного бурения, использование которых положило начало буроопускному способу устройства свайных фундаментов. В Якутске паровые котлы использовались как источники пара при устройстве свай опускным способом; аналогичные свайные работы осуществлялись в Дудинке. В Воркуте имеющиеся в наличии секции буровых труб были использованы в качестве лидеров для устройства свай бурозабивным способом. Избыток взрывчатки, используемой при добыче золота и кассетирита, дал возможность строителям Магадана создавать взрывом уширения в грунте при устройстве свай камуфлетным способом. Из-за этих факторов в каждом крупном районе Севера России (Норильском, Якутском, Магаданском, Воркутинском, Мирнинском и др.) имелись отличия в способах погружения свай. Рассмотрим их.

### **Норильский район**

Наибольшие достижения в конце XX века имела практика строительного производства Норильского промышленного района, где ежегодный объём строительства жилых многоэтажных (от 9 до 12 этажей) домов достиг двести тысяч квадратных метров. Здесь к этому времени сложилась научная школа технологов-фундаментостроителей в криолитозоне, возглавляемая И. К. Растегаевым и представленная Бакшеевым Д. С., Райским О. А., Меженским В. И., Кушевым М. Ю., Нихотиным Н. И., Захаровым В. В., Галимовой Д. Х., Русановой Г. В. и др.. Формирование этой школы инженеров-геокриологов началось с работ Кима М. В. и было продолжено Кушневым А. П., Могильниковым Д. А., Максимовым Г. Н., Неклюдовым В. С., Березовским Б. И., Полуэктовым В. Е., Снежко О. В., Сиванбаевым А. В., Шишкановым Г.Ф. Существенное влияние на работы оказали научные воззрения Цытовича Н. А., Вялова С. С., Порхаева Г.Ф., Войтковского К. Ф., Мельникова П. И., Крупицы К. К., а позднее Каменского Р. М. и Гончарова Ю. М. Изучались работы выполненные Ушкаловым В. П., Колесниковым А. А., Докучаевым

В. В., Маркиным К. Ф., Таргуляном Ю.О., Велли Ю. Я. и др.

Впервые в практике строительства в криолитозоне России коллектив Норильских авторов разработал ведомственный региональный документ «Сборник инструкций по строительству оснований и фундаментов зданий и сооружений в Норильском промышленном районе» (Отв. редакторы: Растегаев И. К., Нихотин Н. И. – Норильск: Минцветмет СССР, Норильский ГМК, препринт КМЛ НГМК, 1981. – 136 с.). Этот сборник позднее был переработан и дополнен (Отв. редактор: Растегаев И. К. – Норильск: типогр. АО «Норильский комбинат», 1996. – 356 с.). В 1991 году коллектив Норильских авторов в составе: Растегаев И. К. (руководитель), Захаров В. В., Галимова Д. Х., Неклюдов В. С., Трубин В. С., Караваев В. М. и др. был выдвинут Государственным концерном по производству цветных металлов «Норильский никель» на соискание звания Лауреатов Государственной премии СССР в области науки и техники за работу «Создание и освоение индустриального фундаментостроения в Норильском промышленном районе».

В Норильском районе (Дудинка) первая деревянная свая была устроена в 1939 г. опускным способом, базирующемся на принципе паровой оттайки многолетнемёрзлого грунта. В 1952 г. в Норильске буроопускным способом была погружена свая, изготовленная из железобетона. Она имела длину шесть метров и была испытана статической вдавливающей нагрузкой. Это испытание продолжалось год с выдержкой на каждой ступени нагружения в течение четырёх месяцев. Однако буроопускной способ в то время был только инженерным решением, совершенно не исследованным с позиций влияния технологии устройства на несущую способность свай. Эти работы были выполнены в 1970-1985 гг., а первая инструкция по технологии устройства свай буроопускным способом разработана только в 1976 г. [2]. Положения этой инструкции были доведены далее до рекомендаций [3], разосланных строителям других северных регионов (Якутск, Магадан, Воркута, Мирный и др.) для внедрения.

В 1980 году были выделены следующие этапы строительного освоения территории распространения грунтов многолетнемёрзлого состояния [4, стр. 124-125]:

«- одноэтажные деревянные сооружения жилого назначения на лежневых опорах из дерева и на неventedилируемых подсыпках;

- одно-двухэтажные деревянные сооружения на деревянных сваях неглубокого заложения и с деревянными ростверками;

- малоэтажные жилые и промышленные деревянные и кирпичные сооружения на ленточных фундаментах с глубиной заложения 1,0 -1,5 м (1937-1940 гг.);

- промышленные и жилые трёх-пяти-этажные сооружения на столбовых бетонных фундаментах монолитного и сборного исполнения (1940-1958 гг.);

- строительство сооружений на буроопускных висячих сваях (Норильск) и сваях, установленных способом парооттайки (Якутск) (1958-1980 гг.)»

Далее можно выделить следующие этапы:

- создание буронабивного и буродобывного способов фундаментостроения и массовое освоение буроопускного способа (1980-1996 гг.);

- современное индустриальное свайное фундаментостроение [7 и др.].

### **Якутский район**

Этот район сегодня находится на подъёме, ежегодно растёт площадь построенного жилья, появляются интересные в архитектурном отношении многоэтажные общественные сооружения.

До 1980 годов основным способом свайного фундаментостроения в Якутии был способ парооттайки, осуществляемый паровыми иглами по опускной технологии [Растегаев, 1980, на стр. 69-77]. Иглы объединялись в блоки с таким расчётом, чтобы диаметр зоны оттаивания до полутора раз превосходил наибольший размер сваи (диагональ сечения квадратной сваи). Оборудование для парового оттаивания мёрзлых грунтов включало комплект паровых игл с наконечниками, подъёмно-транспортное средство (чаще кран на гусеничном ходу), источник пара и систему паропроводов.

Блок паровых игл погружался под действием собственного веса, т.к. мёрзлый грунт в зоне наконечников оттаивал под действием пара поднимающегося на поверхность. Затем в образовавшуюся зону оттаивания сбрасывали (погружали под действием собственного веса) сваю. «Сбрасывание» сваи в устье пропаренной зоны повторяли до её погружения на проектную отметку. Затем свая медленно (в течение месяцев) вмерзала в мёрзлый грунт. Темп установки свай длиной до шести метров довольно значителен, до трёх свай в смену, но процесс их вмерзания тянется месяцами. При этом сваи отклоняются от вертикального положения, что требует периодического их выравнивания, например лебедкой бульдозера.

Околосвайная зона при опускной техно-

логии перенасыщена влагой, что уменьшает прочность смерзания свай с грунтом из-за образования ледяных плёнок на поверхности свай. Несущая способность опускных свай меньше чем у буроопускных.

Значительные исследования по свайному фундаментостроению в Якутске были выполнены специалистами Института Мерзлотоведения СО РАН им П. И. Мельникова (Салтыков Н. И., Воляков И. Н., Гайдаенко Е. И., Жорницкий Е. Л., Кузьмин Г. П. [9] и др.), Якутского Промстройниипроекта (Гончаров Ю. М., Роман Л. Т. и др.), а также большим коллективом инженеров-практиков строительства. Среди последних выделим заместителя главного инженера Якутгэжстроя Полищук В. Л., по инициативе которого в 1978-81 годах в Якутске проводились ежегодные научно-практические конференции строителей Севера, на которых Растегаевым И. К. неоднократно докладывались результаты работ фундаментостроителей и исследователей по буроопускному и буронабивному способам устройства свай в Норильске. Затем делегация Якутских строителей была командирована в Норильск для ознакомления с буроопускной и свайной технологией и региональными нормативными документами и исследованиями. Середину 1980 годов и следует считать моментом массового перехода строителей Якутска на буроопускной способ устройства свайных фундаментов.

Отметим значительную научно-организационную работу основателя НИИ проблем строительства в Сибири и на Крайнем Севере (позднее Красноярский Промстройниипроект) Минтяжстроя СССР (позднее Минвостокстрой) Крупицы К. К., организовавшем комплексные научно-исследовательские отделы (лаборатории) в городах Норильск, Якутск, Магадан, Братск, Усинск и др., занимающиеся проблемами фундаментостроения в криолитозоне.

### **Магаданский и Воркутинский районы**

Наиболее сложны в инженерно-гео-криологическом отношении южные районы распространения многолетнемёрзлых грунтов и граничащие с ними области, где существуют посткриогенные образования, т.е. оттаявшие грунты, и талые грунты глубокого сезонного промерзания. На таких грунтах кроме Магадана расположены Воркута, Игарка и Чита. Здесь также, более экономичны свайные методы фундаментостроения. Для избежания неравномерных осадков осуществляют пропуск свай через верхний, слабый по несущей способности, слой мёрзлого грунта с после-

дующим опиранием свай и даже с их заглублением в нижележащий слой более прочных и менее сжимаемых грунтов.

Магадан – административный и промышленный центр золотоносной провинции России. Город основан в середине 30-х годов прошлого столетия на побережье Тайской губы Охотского моря.

Здесь исследования в области свайного фундаментостроения выполнены Конашем В. Е., Власовым В. П., Горским В. Ф., Гулым С. А., Поповым Ю. А., Щегольковым Ю. Г., Перлыштейном Г. З. и др. Доминирующей свайной технологией является устройство железобетонных буродобивных свай с острым концом сквозь толщу мёрзлых грунтов до упора в более прочный и менее сжимаемый талый грунт. Эта технология применяется также в Воркуте (исследования Ерошенко В. Н., Пономарёва В. Д., Федосеева Ю. Г., Хрусталёва Л. Н. и др.) При этом для проходки мёрзлого слоя грунта могут быть использованы бурозабивной или буроопускной способы, а для обеспечения надёжного опирания торца свай обсадной или забивной способы. Нижняя часть свай может быть изготовлена в бетонном варианте в цилиндрической или уширенной (перед опорным слоем талого грунта) скважине.

В 1960-1970 годы в Магадане применяли сваи с камуфлетными уширениями. Тело этих свай изготавливалось из монолитного бетона. Затем вместо бетона стали использовать железобетонные стойки заводского изготовления. Камуфлетное уширение устраивалось методом взрыва, а роль пригруза выполнял ствол железобетонной сваи, опущенной в скважину. В момент взрыва слышен первый звуковой удар, свая «подпрыгивала» вверх и падала обратно в скважину – слышен второй звук. Сочетание этих звуков и дало название свайной технологии – камуфлетная. Но эта технология была совершенно не надежна, так как несущая способность свай резко менялась и от неё отказались. Здесь также перешли к буроопускной свайной технологии. При этом вместо камуфлетных уширений в нижней части создавались щебёночные подушки, как это с 1976 года делается в Норильске по предложению Растегаева И. К. [2].

В Магадане свайные работы доведены до уровня региональных строительных норм ВСН-67-17478, развитые позднее до ВСН-110-010-87 «Инструкция по проектированию и устройству свайных фундаментов в талых и оттаивающих грунтах Магаданской области» (М.: Минвостокстрой СССР, 1980. - 38 с).

Воркута – промышленный центр угледобывающей провинции, расположенный на

Европейском Севере России. Город основан в начале 30-х годов прошлого столетия.

В Воркуте в грунтах пластичномёрзлого состояния без значительного содержания каменных включений реализуют бурозабивной способ погружения свай короткими или длинными лидерами по цикличной или непрерывной технологиям [4, на стр. 77 - 104]. При этом железобетонная свая с острым концом забивается в заранее пройденное лидером отверстие в мёрзлом грунте. Диаметр лидерной скважины меньше стороны сечения квадратной сваи. Конечно, такие сваи чаще используются как висячие, т.к. они имеют острый конец.

Проблемы устройства свайных фундаментов в талых грунтах глубокого сезонного промерзания Читинской области рассмотрены в работах Сальникова П. И., Торгашева В. В., Шестернева Д. М. и др. Здесь также использован Норильский опыт свайного фундаментостроения.

Таким образом, созданный и впервые освоенный в Норильске буроопускной способ и технологи устройства висячих свай и свай-стоек по I и II принципам российских СНиП в настоящее время используется строителями Воркуты, Магадана, Якутска, Мирного, Игарки и других городов криолитозоны. Сегодня буроопускной способ устройства свай доминирует в многолетнемёрзлых грунтах и грунтах глубокого сезонного промерзания как экономичный, надёжный и производительный. Разработанный в Норильске позднее бурозабивной способ устройства свай и свай-стоек также используют строители других регионов Севера.

Сегодня могут быть намечены следующие перспективы развития свайного фундаментостроения в криолитозоне в связи с потеплением климата за счёт совершенствования нормативной базы, конструкций и технологии устройства фундаментов, что позволяет осуществлять современное круглогодичное индустриальное фундаментостроение в криолитозоне. Кроме того, весьма важным является создание специального универсального оборудования и буровых станков для устройства скважин в грунтах криолитозоны и изготовления в них свай.

### **Совершенствование нормативной базы**

В Норильске из-за прихода «эффективного собственника» строительство жилья и промышленных объектов полностью остановлено, хотя необходимая нормативная база к середине 1990-х годов была создана. Поэтому сегодня для районов современного строитель-



ства (города Якутск, Мирный, Воркута, Магадан и др.) целесообразно разработать и утвердить региональные нормативные документы по технологии строительства фундаментов в виде временных строительных норм.

Например, если грунты оснований промораживают, т.е. придают им более низкую температуру по сравнению с естественной, предшествующей строительству, то это новый случай, возникший в результате исследований инженеров-геокриологов (Гапеев С. И., Коновалов А. А., Макаров В. И., Сиванбаев А.В., Растегаев И. К. и др.) и сформулированный нами в 1992 году как новый III принцип использования грунтов оснований сооружений в охлаждаемом или охлаждённом состояниях [5, на стр. 335].

Ниже мы приводим положения работы [8, на стр. 60] по совершенствованию нормативной базы свайного фундаментостроения на многолетнемёрзлых грунтах.

«Методология строительства фундаментов в грунтах криолитозоны заключается в последовательном использовании грунтов сначала как разрабатываемого материала, затем как основания для фундамента и потом как среды, вмещающей фундамент, с преимущественным сохранением естественного, предшествующего строительству, состояния грунтов, а именно: – в грунтах многолетнемёрзлого состояния необходимо исключить оттаивание; – в грунтах сезонного промерзания необходимо исключить промерзание талых грунтов оснований.

В развитие СНиП 2.02.04-88 принцип использования мёрзлых грунтов в качестве оснований для фундаментов сооружений рекомендовано рассчитывать по среднегодовой температуре воздуха в месте строительства (Т) на основании расчёта коэффициента сплошности криолитозоны по эмпирической формуле:

$$K_c = 0,138 [T]. \quad (1)$$

При  $K_c > 0,8$  многолетнемёрзлый грунт площади строительства имеет сплошное и преимущественно сплошное распространение, на котором строительство рекомендуется осуществлять по принципу I СНиП с сохранением мёрзлого состояния грунта в процессе строительства и эксплуатации сооружения. При этом температурная суровость климата составляет минус 2000 градусосуток и менее, что соответствует средней годовой температуре - 6° С и ниже.

При  $K_c < 0,5$  многолетнемёрзлый грунт площади строительства имеет островное и редкоостровное распространение, на котором строительство рекомендовано осуществлять

по принципу II СНиП, допускающему оттаивание мёрзлого грунта в процессе строительства и эксплуатации сооружения. При этом температурная суровость климата составляет минус 1000 градусосуток и менее, что соответствует среднегодовой температуре воздуха - 4° С и выше.

При  $K_c = 0,5 \dots 0,8$  необходимы дополнительные тщательные инженерно-геокриологические изыскания площадки строительства на предпроектной стадии строительства».

### **Совершенствование конструкции и технологии устройства свайных фундаментов при потеплении климата**

Универсальной технологией для криолитозоны следует считать самую распространённую буроопускную. Свою эффективность эта технология доказала как в грунтах твёрдомёрзлого и пластичномёрзлого состояний, так и в талых грунтах глубокого сезонного промерзания.

В Норильском районе буроопускные висячие сваи длиной до 10 м имеют несущую способность по грунту до 100 т.с. Буроопускные сваи-стойки в стыкованном варианте могут иметь длину до 20 м; они изготавливаются под защитой обсадных труб и имеют несущую способность по материалу до 150 т.с.

К специальным технологиям свайных работ в криолитозоне следует отнести бурозабивную, буронабивную и буродобивную.

В грунтах пластичномёрзлого состояния и грунтах глубокого сезонного промерзания может быть использована технология, созданная в Воркуте. Бурозабивная свая чаще работает как висячая, так как имеет острый конец, незначительную длину (до восьми метров по условиям транспортирования), а её несущая способность редко превышает 50 т.с. Завалуненность грунтов для этой технологии не должна превышать определённого предела. То есть бурозабивная технология приемлема только для пластичномёрзлых грунтов и грунтов глубокого сезонного промерзания с ограничением по содержанию и размеру валунных включений.

Буронабивная технология также может быть отнесена к специальной технологии, так как применяется для устройства свай глубокого заложения (до 20 м и более) и увеличенного диаметра (до 0,8 м и более) при строительстве промышленных (на сваях-стойках) и гражданских (на висячих сваях) сооружений с увеличенной до 200 - 300 т.с. несущей способностью.

Буродобивная технология также отне-

сена нами к специальным технологиям, так как предназначена для устройства комбинированных (буроопускных и бурозабивных) стыкованных свай-стоек с глубоким уровнем залегания опорного скального или малосжимаемого грунта (до 30 м).

Если буронабивной способ может быть реализован как для висячих свай, так и для свай-стоек, то буродобивной способ реализуется только для свай-стоек.

Для универсальных свай основным путём совершенствования при потеплении климата является адаптация (приспособление) их конструкции к изменяющимся мерзлотно-грунтовым условиям в связи с потеплением климата или из-за ошибок в эксплуатации сооружений, например сброса воды из систем отопления и водоснабжения.

Если это свая-стойка, то при оттаивании вышележащего над опорным пластом слоя мёрзлых грунтов увеличивается пригруз на сваю из-за бокового трения оттаявшего грунта. Если это висячая свая, то оттаивание грунта резко уменьшает несущую способность вплоть до обрушения сооружений. Так, например, в 1975 году в городе Кайеркан (Таймыр) из-за постоянного пролива воды произошло оттаивание мёрзлых грунтов и рухнуло двухэтажное отдельно стоящее сооружение, построенное на висячих сваях.

Другой пример. Из-за изменения температурного режима мёрзлых грунтов вследствие постоянных сбросов горячей и холодной воды произошло оттаивание боковой поверхности висячих свай, на которых были устроены несколько девятиэтажных жилых домов по ул. Лауреатов в Норильске. Людям пришлось выселить, а все жилые дома (квартал) разобрать.

Если бы конструкции этих свай имели опорные раскрывающиеся башмаки, или боковые уширения, раскрывающиеся при осадках, то такие адаптирующиеся свайные фундаменты приспособились бы к изменяющимся мерзлотно-грунтовым условиям без обрушения сооружений.

Адаптация боковой поверхности висячих свай осуществляется за счёт увеличения её площади, а адаптация торца сваи-стойки за счёт его расширения. Методология и принципиальные схемы адаптирующихся конструкций свай для криолитозоны рассмотрены в работе [6, на стр. 53-54], положения которой приведены ниже.

Статическую адаптацию, отражающую состояние системы «здание – основание» и характеризующую устойчивость сооружения к неизменным во времени геокриологическим

условиям, следует оценивать по параметрам мёрзлых грунтов оснований и запасу устойчивости (прочности) самого сооружения. Понятие статической адаптации близко к понятию надёжности сооружения, если сохраняются его функции в условиях изменения известных факторов, прогнозируемых и учитываемых в расчетах (снеговая и ветровая нагрузки и т.д.). Статическая адаптация обеспечивается принятием традиционных проектных решений и их реализацией в конструкции фундаментов сооружения и грунтов оснований.

Динамическая адаптация отражает приспособление системы «здание – основание» к изменяющимся во времени геокриологическим условиям, если устойчивость сооружения сохраняется в течение всего срока службы. Динамическая адаптация реализуется двойко: создаётся дополнительный запас устойчивости, что удорожает строительство, так как при этом осуществляется переход к статической адаптации и резко возрастает запас устойчивости; с помощью специальных устройств и механизмов, включающихся в работу (автоматически или по мере надобности) в зависимости от изменения геокриологических условий».

Следовательно, механизм адаптации определяется конструктивными особенностями фундаментов, параметрами внешней среды (климат и грунт) и механизмом взаимодействия системы «фундамент – грунт» между собой.

Несущая способность свай при оттаивании многолетнемёрзлого грунта повысится, если увеличить боковую поверхность свай (например, в их теле делают сквозные поперечные пустоты или местные уширения) и торцевой части (с помощью специальных уширений, шайб и т.д.). Причём свайные фундаменты при потере несущей способности по боковой поверхности должны восполнить общую несущую способность за счёт торца. Целесообразно включить в работу фундаментные балки, для чего нелишне вспомнить забытые сегодня мелкозаглубленные ростверки. Меры по повышению несущей способности грунтов при оттаивании нужно дополнительно выработать. Но уже сейчас можно рекомендовать различные способы упрочнения грунтовых массивов (силикатизация, цементация и т.п.), в том числе использование геотехнических тканых и нетканых материалов.

Цитируем далее [6]. «Можно выделить два генеральных типа стратегии адаптации: «спринтер», когда неблагоприятные факторы действуют быстро и резко, и «стайер», когда неблагоприятные факторы действуют

длительно и стадия нагружения (дестабилизации) существует продолжительное время. Применительно к изменению свойств многолетнемерзлых грунтов при потеплении климата мы скорее имеем дело со стратегией типа «стайер», когда фазы дестабилизации и адаптированности (нового состояния) существуют достаточно долго.

Инженерно-геокриологическое обеспечение строительства в грунтах криолитозоны включает: гидрометеорологические данные, экономико-географические показатели, технико-экономические сведения, а также инженерно-геокриологические условия (литолого-генетические характеристики грунтов, геоморфологическая и ландшафтная индексация участков строительства, условия проходимости строительной техники, существование водоводов и расположение уровня грунтовых вод, ведущие инженерно-геокриологические процессы, анализ динамики сезонного промерзания – протаивания в естественных и нарушенных условиях и среднегодовые температуры грунта). Цель таких работ – оконтуривание на картах участков строительства с одной системой конструктивных решений фундаментов и технологий работ нулевого цикла, наиболее целесообразных в этом районе с позиций экономики и экологии, и, главное, учитывающих возможное потепление климата».

В нашем случае это усовершенствованные конструкции свайных фундаментов и технологии работ, обеспечивающие адаптацию фундаментов к изменяющимся геокриологическим условиям. Другой путь – это создание принципиально новых, адаптирующихся конструкций фундаментов, например таких, как поверхностные фундаменты складчатого типа, использованные как альтернатива свайным. На этих фундаментах на Таймыре (город Оганер) построен четырёхэтажный административно-бытовой корпус.

### Выводы

Основной путь строительного освоения Севера России при потеплении климата Земли сохраняется. Это свайный тип фундаментостроения промышленных и гражданских сооружений со значительными нагрузками на фундамент.

Однако конструкции используемых в этих условиях свай должны быть оснащены адаптирующими устройствами, автоматически увеличивающими несущую способность

свай за счет боковых и торцевых уширений, срабатывающих при оттаивании мерзлого грунта.

Направление дальнейших исследований – практическая апробация разработанных в Институте мерзлотоведения СО РАН конструкций адаптирующихся свайных фундаментов.

### Список литературы

1. Великин, С. А. Электроротажа сопротивления мерзлых пород в сухих скважинах / С. А. Великин, А. М. Снегирев ; АН СССР, Сиб. отделение, Ин-т мерзлотоведения. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения, 1987. – 102 с.
2. Растегаев, И. К. Временная инструкция по устройству свайных, погружаемых в предварительно пробуренные скважины (буроопускных), свай в вечномёрзлых грунтах / И. К. Растегаев. – Норильск: препринт типогр. НГМК, 1976. – 17 с.
3. Растегаев, И. К. Рекомендации по технологии устройства буроопускных свайных свай в вечно-мёрзлых грунтах с помощью станков ударно-канатного бурения / И. К. Растегаев. – Красноярск: Красноярский Промстройинипроект, 1978. – 20 с.
4. Растегаев, И. К. Технология и механизация работ по строительству свайных фундаментов на вечномерзлых грунтах / И. К. Растегаев. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1980. – 128 с.
5. Растегаев, И. К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И. К. Растегаев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 351 с.
6. Растегаев, И. К. Об адаптации фундаментов на вечномерзлых грунтах / И. К. Растегаев // Строительство в России: прогресс науки и техники. – М.: Инженерная академия РФ, 1993. – №1. – С. 51–54.
7. Растегаев, И. К. Основы разработки грунтов и строительство фундаментов в криолитозоне. Часть I Строительные свойства грунтов криолитозоны. – 144 с.; Часть II. Разработка грунтов в криолитозоне. – 212 с.; Часть III. Земляные и свайные работы в криолитозоне. – 172 с.; Часть IV. Современное фундаментостроение в криолитозоне. – 152 с. – М.: Изд-во СИП РИА, 2001 – 2002. – 680 с.
8. Растегаев, И. К. Методология и перспективы строительного освоения криолитозоны России / И. К. Растегаев, Д. С. Бакшеев // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – № 3. – С. 54–60.

## References

1. Velikin, S.A., Snegirev A.M. 1987. *Electric Logging Resistance of Frozen Soils in Dry Boreholes*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press, 102 pp. (in Russian)
2. Rastegaev, I.K. 1976. *Temporary Instruction for Installing Friction Piles in Pre-drilled Holes in Permafrost*. Norilsk: Norilsk Mining and Metallurgical Plant Press, 17 pp. (in Russian)
3. Rastegaev, I.K. 1978. *Recommendations on Installation of Friction Piles in Pre-drilled Oversized Holes in Permafrost Using Cable-tool Drilling Rigs*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk PromstroySRIproekt, 20 pp. (in Russian)
4. Rastegaev, I.K. 1980. *Technology and Mechanization of the Construction of Pile Foundations in Permafrost*. Leningrad: Stroizidat, 128 pp. (in Russian)
5. Rastegaev, I.K. 1992. *Excavation of Frozen Soils in Northern Construction*. Novosibirsk: Nauka, 351 pp. (in Russian)
6. Rastegaev, I.K. 1993. Adaptation of Foundations in Permafrost. In: *Construction in Russia: Progress of Science and Technology* (1): 51 – 54. Moscow: Engineering Academy of the Russian Federation (in Russian)
7. Rastegaev, I.K. 2001 – 2002. *Fundamentals of Earthwork and Foundation Construction in Permafrost. Part I - Construction Properties of Frozen Soils*, 144 pp., Part II – Earthwork in Permafrost, 212 pp., Part III - Excavation and Piling in Permafrost, 172 pp., Part IV - Modern Foundation Engineering in Permafrost, 152 pp. Moscow: SIP RIA, 680 pp. (in Russian)
8. Rastegaev, I.K., Baksheev, D.S. 2006. Methodology and prospects of construction practice in Russian permafrost regions. *J. Nauka i Tekhnologia v Promyshlennosti* (3): 54 – 60. (in Russian)

## Engineering treatment of weak permafrost soils in seismic areas

F.E. Popenko

ООО Geotechnologia  
Vilyuisky Tract, 5 km, Yakutsk 678008, Russia

**Abstract.** The growing anthropogenic and climatic impacts on the geological environment, as well as the increasing seismic activity in north-eastern Russia have important implications for the safety of buildings and infrastructure. The lack of scientifically sound techniques for improving soil properties and for controlling permafrost-related impacts, natural or human induced, on engineering structures is the main reason for numerous failures and distress of foundations and supporting soils. The experience with strength improvement of weak foundation soils in Yakutsk confirms the need for the development of science-based methods for controlling the main mechanical and thermal characteristics of weak soils, as well as for improving their resistance to thermal, physical and chemical loads, including climate-related impacts.

**Keywords:** weak soils; engineering treatment; earthquake resistance; engineering protection.

## Техническая мелиорация слабых грунтов криолитозоны при строительстве на сейсмоопасных территориях

Ф. Е. Попенко

Россия, г. Якутск, ООО НВЦ «Геотехнология»

**Аннотация.** Проблема надежности объектов капитального строительства является актуальной в связи с возросшими техногенными и климатическими воздействиями на геологическую среду, усилением сейсмической активности в северо-восточных регионах России. Отсутствие научно-обоснованных методов улучшения строительных свойств грунтов и инженерной защиты сооружений от природных и инициированных инженерно-хозяйственной деятельностью криогенных процессов является основной причиной многочисленных отказов оснований и фундаментов зданий и сооружений, их аварийного состояния. Опыт работ по усилению слабых оснований на объектах г. Якутска подтверждает необходимость разработки научно обоснованных методов управления основными физико-механическими и теплофизическими характеристиками слабых грунтов и создания устойчивых к тепловым и физико-химическим нагрузкам, в том числе обусловленных влиянием климатических факторов.

**Ключевые слова:** слабые грунты; техническая мелиорация; сейсмостойкость; инженерная защита.



# Техническая мелиорация слабых грунтов криолитозоны при строительстве на сейсмоопасных территориях

Ф. Е. Попенко

## Введение

К слабым грунтам криолитозоны принято относить пластичномерзлые засоленные, заторфованные и высокотемпературные песчано-глинистые грунты, льдо-грунты и льды. Особую категорию представляют насыщенные минерализованными грунтовыми водами и криопэгами грунты меж- и надмерзлотных таликов техногенного происхождения, формирующиеся в основаниях аварийных зданий и сооружений, на территориях с нарушенными условиями подземного стока и поверхностного теплообмена.

В соответствии с классификацией СНиП 11-7-81 (Строительство в сейсмических районах) перечисленные виды грунтов относятся ко второй, а при полном оттаивании вечномерзлых грунтов на всю глубину активной зоны оснований инженерных сооружений, к третьей категории сейсмических свойств. Фоновая сейсмичность обширных территорий и отдельных строительных площадок, в строении которых участвуют слабые грунты, для объектов массового строительства в этих случаях увеличивается с шести до семи или восьми баллов в зависимости от степени нарушения природных мерзлотно-грунтовых условий и ответственности сооружений.

Устойчивость зданий и сооружений на таких площадках согласно требованиям СНиП 11-7-81 должна обеспечиваться за счет устройства систем сейсмоизоляции, динамического демпфирования или поясов жесткости, снижающих сейсмические нагрузки на здание, что технологически сложно и требует привлечения дополнительных финансовых и материальных ресурсов.

Поскольку определяющим фактором при оценке строительных площадок по условиям сейсмичности являются мерзлотно-грунтовые условия, то возможен подход направленного преобразования методами технической мелиорации физико-механических и теплофизических характеристик слабых грунтов, определяющих их несущую способность, из второй или третьей категории в первую, не требующую выполнения специальных антисейсмических мероприятий. Такой подход является менее затратным и обеспечивает формирование однородных по сейсмическим свойствам, прочностным и деформационным

характеристикам грунтовых структур, устойчивых к сейсмическим воздействиям определенной интенсивности.

Основным условием соответствия грунтов требованиям первой категории является их твердомерзлое состояние и отсутствие в разрезе постоянно действующих водонасыщенных таликов при среднегодовых значениях температур на глубине нулевых амплитуд не выше минус 2° С. Последнее справедливо только для незасоленных песчано-глинистых грунтов. При высоком уровне засоления температурная граница перехода мерзлого грунта в твердомерзлое состояние смещается в сторону более низких значений температур и должна определяться опытным путем, поскольку надежных расчетных методов определения температуры перехода грунта из пластичномерзлого в твердомерзлое состояние с практически завершенными фазовыми переходами не существует.

Очевидно, что эксплуатационная надежность оснований и фундаментов объектов капитального строительства обеспечивается при условии строгого учета в проектах инженерной подготовки строительных площадок всего комплекса циклично развивающихся природных криогенных процессов, трансформирующихся в ходе строительства в инженерно-геологические криогенные процессы затухающего или необратимо развивающегося характера. Технологические мероприятия на стадии инженерной подготовки территорий, таким образом, следует рассматривать как фактор, активно влияющий на динамику развития природных криогенных процессов в ходе инженерно-строительной и хозяйственной деятельности.

## Методы

Состав мероприятий по технической мелиорации слабых грунтов, определяется сложностью мерзлотно-грунтовых, гидрогеологических и гидрогеохимических условий, особенностями геологического строения, геометрией растепленных, засоленных и обводненных зон, химическим составом растворенных в грунтовых водах солей и их концентрацией, особенностями питания и разгрузки грунтовых вод надмерзлотных таликов и сезонноталого слоя.

Комплекс методов искусственного преобразования слабых грунтов криолитозоны при первом принципе использования вечномерзлых грунтов в качестве естественных оснований включает:

- управление температурными полями застраиваемых участков, мерзлотно-грунтовые условия которых по параметрам влагосодержания, засоленности, химического состава и концентрации поровых растворов позволяют формировать низкотемпературные ( $t_0 < -2^0$ ) грунтовые массивы высокой прочности и стабильности методами поверхностного или глубинного принудительного охлаждения:

- регулирование условий теплообмена под зданиями или сооружениями с проектируемыми подпольями искусственными покрытиями направленного действия с охлаждающими сезоннодействующими установками самостоятельного действия или в комплексе с теплоизоляционными экранами, снижающих глубину сезонного оттаивания грунтов под зданиями до 0,3-0,5 м, что позволяет включать в работу значительную часть сезонноталого слоя и ограничивает распространение тепла в вечномерзлую толщу ниже нормативной глубины сезонного оттаивания, увеличивая тем самым несущую способность свайных фундаментов без увеличения глубины их заложения и количества;

- управление массообменными процессами в грунтах сезонноталого слоя путем понижения их влажности до значений, меньших критических, исключающих развитие процессов пучения при их промерзании; солифлюкции, термопросадок и термокарста при оттаивании; снижающих интенсивность миграции поровых растворов в подстилающую вечномерзлую толщу;

- устройство систем вертикальных и горизонтальных дренажей, регулирующих надмерзлотный водообмен на территориях с нарушенным подземным стоком и позволяющих производить откачку криопэгов из оснований строящихся зданий и сооружений, повышая несущую способность слагающих их грунтов путем принудительного охлаждения;

- механическое уплотнение оттаявших и талых маловлажных песчано-глинистых грунтов методами трамбования, виброуплотнения и пневмоударного уплотнения с армированием жесткими смесями (щебень, гравий);

- химическое закрепление водопроницаемых оттаявших и талых грунтов методами силикатизации или инъекцией цементирующих суспензий типа ОТДВ «Микродур», при твердении которых формируются прочные грунтовые структуры, равные или превышаю-

щие прочностные показатели вечномерзлых грунтов на контактных поверхностях фундаментов в диапазоне отрицательных температур от минус  $0,3^0$  С до минус  $5^0$  С и ниже;

- замена сильнозасоленных и заторфованных грунтов сезонноталого слоя в основаниях строящихся зданий и сооружений на незасоленные, с низким содержанием органических включений крупнозернистые или гравелистые песчаные грунты с устройством противofильтрационных завес, препятствующих фильтрации минерализованных грунтовых вод под строящиеся здания с окружающей территории.

### **Требования к методам по инженерной защите оснований сооружений**

Выбор метода технической мелиорации определяется свойствами подлежащих закреплению грунтов, характером передаваемых нагрузок на основания строящихся зданий и сооружений, типом реакций геологической среды на техногенные воздействия.

Широкому внедрению перечисленных выше методов направленного преобразования строительных свойств слабых грунтов криолитозоны препятствует отсутствие соответствующей нормативной базы по разработке проектов технической мелиорации грунтов в составе мероприятий по инженерной подготовке и защите территорий от опасных криогенных процессов, а также специализированного технологического оборудования.

Несмотря на очевидный характер влияния глобальных климатических изменений на мерзлотную обстановку в северных регионах данный факт при разработке проектов ответственных инженерных сооружений и объектов жилищно-гражданского назначения в расчетах не учитывается. Последнее относится и к обеспечению сейсмостойкости объектов, невзирая на то, что большая часть территории России находится в сейсмоопасной зоне (6 баллов и выше).

Как известно, деградационный мерзлотный процесс является следствием нарушений исходных (природных) температурно-влажностных и геохимических равновесий, сформировавшихся до инженерно-хозяйственного освоения территорий.

Повышение температуры вечномерзлых грунтов при их искусственном растеплении или нарушении условий теплообмена на дневной поверхности, как правило, сопровождается изменением химического состава и минерализации грунтовых вод, заболачиванием территорий.

При нарушениях условий поверхност-

ного и подземного (надмерзлотного) стока, что характерного для г. Якутска, создаются оптимальные условия для развития криогенных процессов, обусловленных высокой предзимней влажностью грунтов сезонноталого слоя.

Состав работ по инженерной подготовке строительных площадок и осваиваемых строительством территорий, таким образом, должен обеспечивать не только повышение несущей способности оснований и фундаментов, что бесспорно важно, но и гарантировать защиту территорий от воздействия опасных инженерно-геологических криогенных процессов, инициированных строительством, устраняя негативные факторы, влияющие на сейсмоустойчивость объектов капитального строительства. В известной степени, должны учитываться и особенности региональных климатических изменений, влияющих на температурно-влажностный режим грунтов сезонноталого слоя, являющегося передаточным звеном в системе «климат-вечномерзлые горные породы», определяющим тип и интенсивность развития природных криогенных процессов на территориях, не затронутых техногенезом.

Традиционно состав мероприятий по инженерной подготовке ограничивается вертикальной планировкой строительных площадок и организацией поверхностного стока, в некоторых случаях - предпостроечным охлаждением высокотемпературных грунтов сезоннодействующими установками. Несущая способность фундаментов на площадках с нарушенным водно-тепловым режимом в подавляющем большинстве обеспечивается случаев за счет увеличения длины свай или их количества.

Сформировать в оттаявших вечномерзлых грунтах, содержащих минерализованные грунтовые воды и криопэги, сплошные массивы однородных по своим прочностным свойствам твердомерзлых грунтов методами принудительного охлаждения без выполнения опережающих работ по водопонижению и регулированию надмерзлотного стока не представляется возможным по следующим соображениям.

При промерзании замкнутых водонасыщенных таликов в условиях невозможности бокового расширения отмечается рост давления на вмещающие мерзлые грунты, величина которого при охлаждении до минус  $5^{\circ}\text{C}$ , т.е. до температуры, которую можно обеспечить сезоннодействующими охлаждающими установками, согласно эмпирической зависимости

Бриджмена-Тамма может достигать 60 МПа. При таких давлениях кристаллизация влаги не происходит, водонасыщенный охлажденный грунт остается в талом состоянии. При понижении температуры в замкнутом массиве водонасыщенного грунта отмечается рост внутриобъемных напряжений, сопоставимых или превышающих структурную прочность вмещающих мерзлых грунтов и силы смерзания с боковой поверхностью фундаментов. Известны случаи разрушения свай и бетонных отмолок секущими вертикальными или наклонными трещинами, по которым происходит разгрузка внутриобъемных напряжений в переохлажденном водонасыщенном надмерзлотном талике. Усилия разрыва в данном случае составляют не менее 30 – 40 МПа (прочность железобетона).

Промерзание минерализованных вод меж- и надмерзлотных таликов сопровождается повышением их минерализации и соответствующим понижением температуры кристаллизации. В промерзающем содержащем криопэги массиве грунта, всегда сохраняется некоторый объем находящихся под давлением незамерзших высокоминерализованных поровых растворов с температурой замерзания значительно ниже минус  $5^{\circ}\text{C}$ , снижающих сейсмостойкость оснований инженерных сооружений.

При глубинном промораживании насыщенных минерализованными грунтовыми водами таликов формируются разнообразные по форме и размеру тела твердомерзлых и находящихся под большим гидростатическим давлением водонасыщенных талых грунтов с прослоями пластичномерзлых грунтов, характеризующихся низкой структурной прочностью. При сейсмических воздействиях высоких энергий их поведение непредсказуемо.

Формирования прочных оснований, сложенных водонасыщенными талыми грунтами, в том числе содержащих криопэги, методами принудительного охлаждения возможно при условии опережающего выполнения работ по глубинному водопонижению. Высокая скорость охлаждения установками парожидкостного типа (в среднем  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{сут}$ ) предварительно обезвоженных до значений суммарной влажности 0,15-0,20 д.е. грунтов обеспечивается за счет снижения продолжительности фазовых переходов.

Скорость промерзания грунтов в радиальном направлении ( $r = 1; 1,5; 2,0$  м) от охлаждающей установки парожидкостного типа (диаметр подземного испарителя 76 мм) в интервале глубин 4-9 м приведена в таблице.



H, м	grad t, 0 C/сут		
	r = 1м	r = 1,5м	r = 2,0м
4	0,04	0,04	0,07
5	0,02	0,06	0,07
6	0,01	0,04	0,04
7	0,01	0,03	0,02
8	0,01	0,02	0,01
9	0,01	0,01	0,01

За зимний период в 6 месяцев при условии непрерывной работы охлаждающей установки средняя температура грунта ниже нормативной глубины сезонного оттаивания может быть понижена до значений минус 3-5° С.

### Заключение

Опыт эксплуатации зданий жилищно-гражданского и производственного назначения в г. Якутске показал, что высокий уровень их аварийного и предаварийного состояния обусловлен не только отказом фундаментов из-за снижения прочностных характеристик грунтов оснований в ходе деградиационного мерзлотного процесса, но в значительной степени вследствие физико-химической деструкции бетонных конструкций фундаментов, работающих в агрессивных грунтовых средах, сформировавшихся в условиях отсутствующего подземного стока, и разрушения цокольной кладки стен на высоту капиллярного поднятия грунтовых вод.

Рассматривая проблему надежности объектов капитального строительства и инженерной инфраструктуры как проблему оптимального функционирования природно-техногенных геосистем, выделим основные направления научно-технической деятельности: для северных регионов России:

- разработка теоретических основ технической мелиорации слабых грунтов криолитозоны и методов управления физико-геологическими, теплофизическими и гидрогеологическими параметрами геологической среды, обеспечивающих устойчивость зданий и сооружений при сейсмических и техногенных воздействиях в условиях глобального потепления климата;

- разработка технических средств усиления слабых оснований криолитозоны методами водопонижения, механического уплотнения, химического закрепления тонкодисперсными вяжущими и полимерными растворами, включая принудительное охлаждение грунтов установками воздушного или парожидкостного типов и соответствующего нормативно-методологического обеспечения;

- разработка нормативных документов по проектированию систем инженерной защиты зданий и сооружений от опасных криогенных процессов, обусловленных инженерно-хозяйственной деятельностью и климатическими изменениями в дальней перспективе;

- разработка научно обоснованных методов прогноза изменений основных параметров геологической среды, отражающих ее функциональное состояние, на расчетный срок эксплуатации инженерных объектов и их комплексов.

Основной проблемой северного строительства, таким образом, является обеспечения надежности зданий и сооружений в условиях высокой сейсмичности и динамично меняющейся под воздействием климатических и техногенных факторов геокриологической обстановки. Решение этой проблемы невозможно без детального изучения процессов, развивающихся в слабых грунтах при их преобразовании методами технической мелиорации.

# Methodology of study on freeze-thaw cycling induced changes in engineering properties of soils

Wei MA, Lili FANG, Jilin QI

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: mawei@lzb.ac.cn

**Abstract.** Freeze-thaw action is an important topic in cold regions engineering, which results in moisture and solute migration and re-distribution, thus changes in physical and mechanical properties. On the basis of extensive documentations, this paper reviews the general findings on sample preparations, freeze-thaw test operations and the following experimental procedures for examining various changes in soil properties. Typical research results are listed herein. Focus is put on the testing methodology according to the previous studies. Improved test methodology is suggested. It is anticipated that the study routine for freeze-thaw induced properties is finally developed.

**Keywords:** review; freeze-thaw cycles; engineering properties; sample preparation; apparatus; methodology.

## Методика изучения изменений инженерных свойств грунтов при циклическом промерзании-протаивании

Вэй МА, Лили ФАН, Цзилинь ЦИ

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных  
регионов АН КНР  
Китай, 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: mawei@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Изучение процессов промерзания и протаивания, происходящих в грунтах, имеет большое значение для практики проектирования и строительства сооружений в холодных регионах. В результате этих процессов происходит миграция и перераспределение влаги и растворенных веществ, что приводит к изменению физических и механических свойств грунтов. На основе анализа существующей литературы в докладе дан обзор используемых методик по подготовке образцов грунта, по их промораживанию и оттаиванию, а также методов проведения экспериментальных исследований с целью изучения изменений различных свойств грунтов. Представлены основные результаты проведенных ранее исследований. Основное внимание уделено методике проводившихся ранее экспериментов и предложены пути совершенствования методик. Сделан вывод о возможности единого методического подхода к изучению свойств оттаивающих-промерзающих грунтов.

**Ключевые слова:** обзор; циклы промерзания-оттаивания; инженерные свойства; подготовка образцов; оборудование; методика.

# Methodology of study on freeze-thaw cycling induced changes in engineering properties of soils

Wei Ma, Lili Fang, Jilin Qi

## Introduction

The already-frozen soil and soil subjected to freezing/thawing are the primary study topics in cold regions geotechnical engineering. For the former, the test methodology has been formed by a large amount of previous work with the comparable test results, and literature of state-of-the-art was available in different periods; for the freezing/thawing related work, most of the previous studies have put focus on frost heave and thaw settlement, which has also conceived systematic testing procedures. However, there is another topic, i.e., freeze-thaw action induced changes in soil properties, which is relatively less studied. Qi et al. [1] reviewed the previous studies and found that the comparability of experimental results for different soil under different test conditions was rather poor. Therefore, ambiguous conclusions drawn from various tests would result in deviation in understanding the engineering properties of soil after freeze-thaw process and even lead to difficulties and confusions.

This paper will first review the previous re-search work on changes in engineering properties of soil subjected to freeze-thaw cycling, with emphasis on testing methodology. Reasonable testing procedures will be suggested to ensure the comparability, repeatability and accuracy of testing results, which connects the proposed testing method with the corresponding standards.

## Freeze-thaw influence on engineering properties of soils

It is understandable that as a weathering process, freeze-thaw can change the engineering properties of soils, and it has been convinced by various previous studies. Clear recognition on the changes of physical parameters could help understand and explain the changes in mechanical properties as well as to clarify the mechanisms of freeze-thaw process on the engineering properties of soil.

### Hydraulic conductivity

Chamberlain et al. [2] carried out a systematic study on hydraulic conductivity of a fine grained soil subjected to freeze-thaw cycling. The microscopic scanning on the soil slice showed that some micro fracture appeared in the soil and the fine grains in the void moved away after

freeze-thaw. Thus, the hydraulic conductivity increased even if the soil was densified. Konrad [3] found that for the soil specimen with different over consolidation ratio (OCR), the hydraulic conductivity of soil in-creased with the increase in OCR after freeze-thaw process. The increase in conductivity is related to the specimen preparation, as can be seen in Fig. 1.

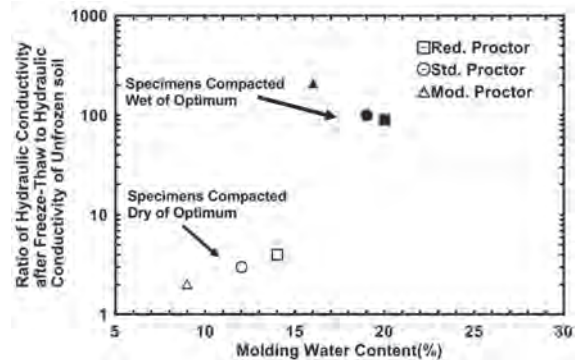


Fig. 1. Ratio of hydraulic conductivity for soils compacted dry or wet of optimum water content.

### Density

Previously, it was found that the soil density decreased after freeze-thaw. Further studies showed that for loose soil, the process could increase the density but it showed an opposite tendency in dense soils. In the light of this phenomenon, Viklander [4] proposed a residual void ratio, which refers to the stable void ratio for loose soil and dense soils after a few freeze-thaw cycling (Fig. 2). This so-called dual effect of freeze-thaw process on the density has been verified by the following studies ([5]-[8]).

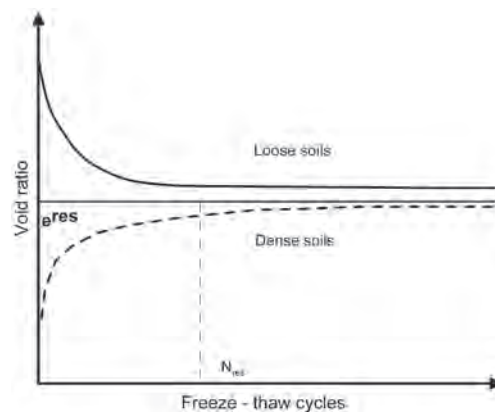


Fig. 2. Void ration versus the number of freeze/thaw cycles in a loose and dense till.

### Atterberg limits

Atterberg limits were also found to change after freeze-thaw by some researchers, for instance, Aoyama et al. [9] found that the plastic limit of a cohesive cinerite soil decreased after freeze-thaw; Knutsson [10] found the liquid limit of undisturbed soil decreased by 30% while the plastic limit did not change obviously; Yong et al. [11] found that for undisturbed sensitive soil, the liquid limit decreased by about 20%; while Eigenbrod [12] did not observe considerable changes in liquid limit. Atterberg limits are determined by fine grains as well as mineral components, without obvious changes in these factors, the authors of this paper would not accept obvious changes in Atterberg limits under laboratory tests. Therefore, the testing methodology might have played some roles.

### Strength

Considerable laboratory work has been performed on freeze-thaw induced changes in soil strength. However, the results differ greatly from each other. John et al. [13] carried out a 1-D compression test on an undisturbed silty soil and found that the strength of the post-thawed soil tends towards zero at a water content between 35% and 42%. Graham et al. [14] also found that the strength of an over-consolidated clay was reduced which is in accordance with the findings of the weakening effect on over-consolidated soil made by Qi and Ma [15]. Yong et al. [11] used the fall-cone test technique to determine the undrained strength of a sensitive clay. It was conjectured that the unstable bonds between particles caused by freeze-thaw led to significant decrease in strength. However, Ono et al. [16] found that the strength of post-thawed specimen was about 20% stronger than that of unfrozen ones. In the meantime, Alkire et al. [17] indicated that freeze-thaw causes strength anisotropy.

Strength parameters are also of major concern, to which much effort has been made. Aoyama et al. [9] found cohesion was reduced while angle of internal friction changed very little and the thermal gradient for freezing had an obviously effect on cohesion. The result made by Ogata et al. [18] and Qi et al. [15] indicated a decrease in cohesion while the angle of internal friction increased a little. Lei [19] and Feng et al. [20] found that both the cohesion and angle reduced. It seemed to conceive a conclusion from these studies that cohesion tends to drop and angle of internal friction changes correspondingly. However, Song and Yao et al. [8] tested on remolded Lanzhou loess and Qinghai-Tibet clay and observed that cohesion presents to increase at first, then decreases with increasing dry density.

It is therefore believed that freeze-thaw induced changes in cohesion of normally- and over-consolidated soils are different, as was pointed out by Qi and Ma [15]. It was summarized in Table 1.

### Resilient modulus

Modulus is another important parameter in geotechnical engineering modeling. Culley [21] carried out a constant repetitive stress triaxial test on reconstituted tills and found that at water contents lower than the optimum, the freeze-thaw induced reduction in modulus decreased as density increased; otherwise, it was increased as density increased. Generally, the soil displayed a decrease by approximately 20-60% in resilient modulus depending on soil classification. The more fines content, the more resilient modulus decreased [22]. Lee et al. [23] studied a cohesive soil and found over 50% reduction in resilient modulus after freeze-thaw. Liu [24] performed a laboratory bearing plate test on silts subjected to freeze-thaw and concluded that factors such as load, soil classification, temperature gradient and degree of compaction had different effects on the reduction of resilient modulus. Generally speaking, the overall understanding of freeze-thaw effect will reduce resilient modulus, while a few findings differ. The authors of this paper think that most of the previous studies used dense soils as study objects, the decrease in modulus after freeze-thaw would therefore be understandable.

### Over-consolidation effect

Graham and Au [26] tested high-quality natural clay samples to develop oedometer consolidation curves (Fig. 3). They observed that the effect of bonding was lost after five freeze-thaw cycles (dashed line in Fig. 3). It is not clear to what extent freeze-thaw destroyed the effect of over-consolidation as there may have been a reduction in the pre-consolidation pressure. The consolidation line appears to approach that of the normally consolidated reconstituted sample, but as yet this has not been confirmed.

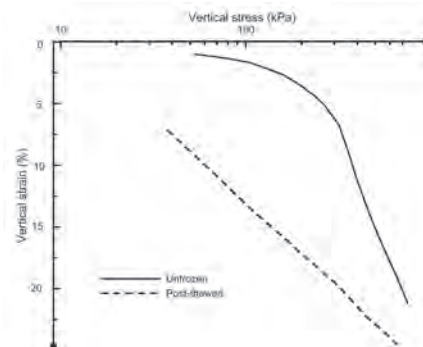


Fig. 3. Oedometer consolidation curves for a clay in unfrozen and post-thawed states.



*Mechanism discussion*

All the above mentioned studies tried to explain the mechanism of freeze-thaw induced changes in soil properties. It has been proposed that freeze-thaw caused the changes in micro-cracks, macro-pores, or other forms of secondary porosity, which resulted in the increase of hydraulic conductivity. On the one hand, the development of ice lens leading to the dilatation of soil would destroy the connection between particles; on the other hand, with the increment of effective stress caused by negative

pore pressure during freezing, the soil was further compressed. The total effect of freeze-thaw depends on the degree between the particle bonding loss and the plastic deformation. The difference between remolded samples and intact ones lies on the initial cohesion. Meanwhile, the time and magnitude the stress applied would also influence the properties of post-thaw soils, for instance, some researchers carried out strength test directly after freeze and thaw process while others applied consolidation to soil before conducted strength test and so on.

Table 1. Summarization of the freeze-thaw effect on normally and over-consolidated soils

Free-thaw Effects	NC Soil	OC soil with $\sigma_p$	
		$\sigma' \leq \sigma_p$	$\sigma' > \sigma_p$
Ice lens develop Heave	No bonds Dilation, plastic deformation	Boding damages Dilation, Plastic deformation(dorminant)	Boding damages Dilation, Plastic deformation
Nagitive u increase $\sigma'$	Compression Elastic + Plastic (dominant)	Skeleton compression Elastic deformation	Skeleton compression Elastic + Plastic deformation
Gross Effect	Structure weakening Cohesion decrease	Structure weakening Cohesion decrease	Dependent on the two plastic deformatiions

**Experimental methodology**

Due to different concerns by various researchers, different test methods have been applied, which is probably the most remarkable obstacle in understanding of freeze-thaw effects on soil properties. In this section, based on the summary of testing methodologies, some reasonable suggestions will be presented so as to ensure the comparability, repeatability and accuracy of test data with regard to freeze-thaw induced changes in engineering properties of soils.

*Specimen preparation*

Undisturbed and remolded soil specimens are generally used in the freeze-thaw related experiments. However, most of the laboratory tests are carried out on the remolded specimens. The critical procedure for undisturbed specimen preparation is the maintenance of the original soil structure while for the remolded, the impurity and large particles must be removed and certain duration for the moisture homogeneity is generally needed.

When preparing soil specimens, layered compaction and slow consolidation methods are the most dominant. The former refers to the compaction by a hammer with specified weight drop from a prescribed distance of fall, layer by

layer, which is appropriate for the preparation of a large amount of specimens without strict requirements for homogeneity. Consolidation method can produce relatively homogeneous specimens with various over consolidation ratio (OCR) by slow compression under static load. In study, the method of specimen preparation should be used in view of the practical needs, while corresponding standards is suggested to be followed strictly.

Furthermore, preparing specimens of post-thawed soil specimen should follow instructions for undisturbed sample preparation, especially that the soil specimens should be taken from the central section of the sample after freeze-thaw.

*Freeze-thaw test*

Freeze-thaw test is carried out in the laboratory and no consistent testing methodology has been formed, e.g. testing apparatus, initial condition for test.

Various apparatuses can be found used in literature, i.e., the routine freeze-thaw apparatus, thermotank and multi-functional device. Routine freeze-thaw apparatus is emphasized on the real-time measurement of temperature and axial deformation; the thermotank is employed as a closed system specialized in the mechanical properties of soil under freeze-thaw. The two



apparatuses have a common shortcoming: being short of integration, i.e., the soil samples have to be taken out of the freeze-thaw device to prepare specimens for further geotechnical testing. However, it is well modified by the multifunctional tester, which combines the freeze-thaw and mechanical tests with complex initial conditions, e.g. supplement of water, variability of stress path. So far, this kind of device is still in a scientific research stage. The equipment configurations are dependant on specific study purposes. No standard devices can be found.

The variability of freeze-thaw patterns is closely related to the physical and mechanical responses of soil [25]. The conditions used in freeze-thaw rely on specific needs, i.e., engineering application and research purposes, among which different freeze-thaw temperature, freeze-thaw cycles and temperature gradient can be applied. Moreover, the model test designed by the principle of similarity, may reasonably reflect the practical engineering condition, which is quite necessary for the theoretical analysis and engineering practice, while it is time consuming expensive.

### Laboratory geotechnical test

The changes of physical and mechanical parameters before and after freeze-thaw tests are the principal research objects, which could be obtained in geotechnical tests.

For the inhomogeneity and moisture redistribution of soil after freeze-thaw, the soil samples for measuring density and water content should be taken from different height of the specimen. The procedures for measuring density and water content defined in geotechnical testing standards can be followed.

Standards can be found for testing on hydraulic conductivity, i.e., constant water head test is used for the measurement of the coarse grained soils while the variable water head test for fine grained soils. In order to accelerate test process, pressurized permeability test could be used to measure the coefficient of soil with different initial void ratio after freeze-thaw or under different confining pressure. However, to meet some specific needs, specially designed devices can be used, for instance, for anisotropic soil, the corresponding sections of soil samples for measuring the vertical and lateral hydraulic conductivity needs to be taken.

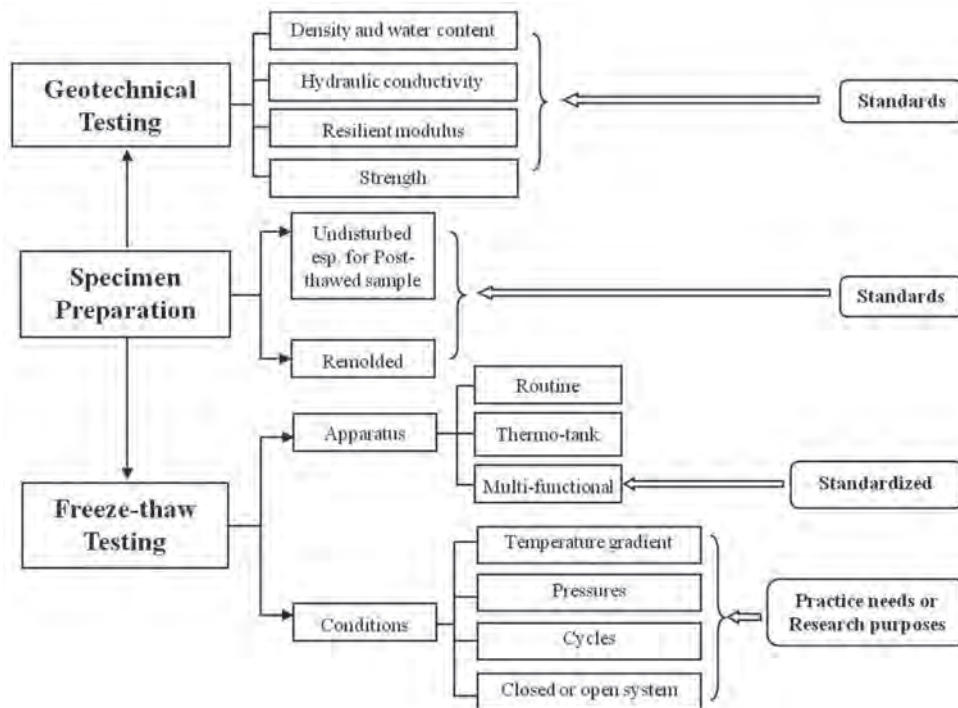


Fig. 3. Experimental processes for freeze-thaw.

The drainage condition and loading history should be taken into consideration in laboratory test, which reflects the variation of effective stress or pore pressure, especially for strength test. To ensure the highlight of freeze-thaw effects on soil, the direct shear test and triaxial test without consolidation and drainage, are suggested. For clay with hydraulic conductivity less than 10<sup>-6</sup> cm/s, the drained consolidation within the test duration is appropriate by direct shear test. In spite of the difficulty in preparing specimen, multistep loading in triaxial shear test on a single specimen is not suggested. Moreover, the loading rate, stress path, anisotropy and creep needs to be taken into consideration.

The resilient modulus is often used in embankment design with CBR; however, CBR, as a static index, cannot be simply applied in engineering practice under dynamic loading. Some researchers obtained the resilient modulus by triaxial dynamic test following the procedures in AASHTO. In China, the load plate method is often used, regardless of the influence from confining pressure on the resilient modulus. In view of various influencing factors, the dynamic triaxial test without drainage and consolidation can be employed to determine the resilient modulus.

In brief, the specific procedure for physical and mechanical indexes can be referred to the geotechnical test standards. The pressurized permeability method, undrained triaxial shear test without consolidation and dynamic triaxial test are recommended to measure the corresponding parameters. The specific experimental operations are showed in Fig. 3.

### Conclusions

With review of extensive the previous studies with respect to freeze-thaw induced changes in engineering properties of soils, it is concluded that:

(1) Freeze-thaw can lead to changes in various soil properties, i.e., dual effect on density, increase in hydraulic conductivity, increase in cohesion for loose soils and decrease for dense soils, as well as resilient modulus, and so on.

(2) Due to many influencing factors, such as soil classification, original state, freeze-thaw apparatuses and conditions, as well as different methods applied in geotechnical testing, the effects from freeze-thaw on soil properties are no very much compatible.

Although different countries or fields have their own standards, the standards all have sound scientific basis. It is therefore suggested that the related standards should be followed whenever possible. In order to keep the freeze-

thaw induced soil structure as much as possible, preparing specimens from post-thawed soil should follow the principles for preparation of undisturbed soil samples. At the same time, standardized multifunctional freeze-thaw device is suggested.

### Acknowledgements

This work was supported in part by the Program for Innovative Research Group of the Natural Science Foundation of China (No. 40821001), the 100 Young Talents projects of the Chinese Academy of Sciences granted to Dr. Jilin Qi and the National Natural Science Foundation of China (No. 40871039).

### References

1. Qi Jilin, Cheng Guodong, and Vermeer, P.A. 2005. State-of-the-art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils. *Advances in Earth Science* 20: 887-894. (in Chinese)
2. Chamberlain, E.J., and Gow, A.J. 1979. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology* 13: 73-92.
3. Konrad, J.-M. 1989. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology* 16: 291-303.
4. Viklander, P. 1998. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze/thaw. *Canadian Geotechnical Journal* 35: 471-477.
5. Su Qian, Tang Dijia, and Liu Sheng. 2008. Test on physic-mechanical properties of Qinghai-Tibet slope clay under freezing-thawing cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 27(supp.1): 2990-2994. (in Chinese)
6. Wang Xiaobing, and Yang Ping, et al. 2009. Experimental study on effects of freezing and thawing on mechanical properties of clay. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 31: 1768-1772. (in Chinese)
7. Yang Chengsong, and He Ping, et al. 2003. Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 22(sup.2): 2695-2699. (in Chinese)
8. Yao Xiaoliang, Qi Jilin, and Song Chunxiao. 2008. Influence of freeze-thaw on engineering properties of Qingzang clay. *Journal of Glaciology and Geocryology* 30: 165-169. (in Chinese)
9. Aoyama, K., Ogawa, S., and Fukuda, M. 1985. Temperature dependencies of mechanical properties of soil subjected to freezing and thawing. *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, August 5-7, 1985*: 217-222.
10. Knutsson, S. 1984. Effect of cyclic freezing and thawing on the Atterberg limits of clay. Lulea Technical University, Lulea, Sweden, *Research Report TULEA*, 1984:04.

11. Yong, R.N., Boonsinsuk, P., and Yin, C.W.P. 1985. Alteration of soil behavior after cyclic freezing and thawing. *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, August 5-7, 1985*: 217-222.
12. Eigenbrod, K.D. 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal* 35: 529-528.
13. John, F.N., and Alan, J.H. 1979. The undrained strength of some thawed permafrost soils. *Canadian Geotechnical Journal* 16: 420-427.
14. Graham, J., and Au, V.C.S. 1985. *Canadian Geotechnical Journal* 22: 69-78.
15. Qi Jilin, and Ma Wei. 2006. Influence of freeze-thawing on strength of overconsolidated soils. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 28: 2082-2086. (in Chinese)
16. Ono, T. and Mitachi, T. 1997. Computer controlled triaxial freeze-thaw-shear apparatus. *Proceedings of the 8th International Symposium on Ground Freezing, Rotterdam, Netherlands, 1997*: 335-339.
17. Alkire, B.D., ASCE, M., and Jashimuddin, J. 1984. Changes in strength of silt due to freeze-thaw. *Journal of Technical Topics in Civil Engineering* 110: 48-53.
18. Ogata, N., Kataoka, T., and Komiya, A. 1985. Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil. *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, August 5-7, 1985*: 201-207.
19. Lei Hanzhong. 1994. Engineering properties of thawing soil and its application. *Coal Mine Design* 6: 39-44. (in Chinese)
20. Feng Yong, and He Jiangxing, et al. 2008. Experimental study of the shear strength characteristics of fine-grained soil under freezing and thawing cycles. *Journal of Glaciology and Geocryology* 30: 1013-1017. (in Chinese)
21. Culley, R.W. 1971. Effect of freeze-thaw cycling on stress-strain characteristics and volume change of a till subjected to repetitive loading. *Canadian Geotechnical Journal* 8: 359-371.
22. Simonsen, E., Janoo, V.C., and Isacsson, U. 2002. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *Journal of Cold Regions Engineering* 16: 28-50.
23. Lee, W., Bohra, N.C., Altscheffl, A.G., and White, T.D. 1995. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal* 32: 559-568.
24. Liu Bing. 2006. *The preliminary study on indoor the test condition of subgrade soil freeze stability. Master Thesis*. Harbin: Harbin Institute of Technology. (in Chinese)
25. Alkire, B.D. 1981. Effect of variable-drainage freeze-thaw tests on post-thaw shear strength. *Transportation Research Record* 809: 13-18.
26. Graham, J., and Au, V.C.S. 1985. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. *Canadian Geotechnical Journal* 22: 69-78.

# Physical changes of five types of rock in the Qinghai-Tibet Plateau under freeze-thaw cycles

Fujun NIU, Hua LIU, Zhanju LIN, Jiahao LU

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS  
Lanzhou, Gansu, China 730000, e-mail: niufujun@lzb.ac.cn

**Abstract.** Rocks, including the clastic rock, mudstone, sandstone, granite, andesite, were used to the protecting-slope and berms of the Qinghai-Tibet Railway, as the rock layers have good effect on protecting permafrost beneath the roadbed. However, it is due to the cold weather and larger temperature difference on the Qinghai-Tibet Plateau, the strong freeze-thaw cycles have resulted in, or are causing the frost weathering of rocks, the gradual decline of intensities, and the great changes of physical characteristics of the rocks. Therefore, in this study, the different failure processes of the five types of rock under the simulated external environmental conditions were carefully observed. The results show the andesite and mclastic rock have more severe and early failure than other three ones, and the early freeze-thawing (previous ten times) makes a significant contribution to their failures. Ultrasonic velocity testing of these rocks was made by the digital acoustic-waves-monitor. According to the change trend of the ultrasonic velocity after times of the freeze-thaw cycle, several mechanical parameters of the rocks, such as Dynamic Elastic Modulus (DEM), Poisson's Ratio (PR), and Dynamic Bulk Modulus (DBM), was analyzed. The results show that they all have declining trend with the increase of the time of the freeze-thaw cycle, and in particular, PR of some rocks begin to become negative when the time of freeze-thaw cycle reached a certain value. Therefore the rock structures experienced serious failure under the freeze-thaw cycles. The relations between the uniaxial compressive strength and the time of freeze-thaw cycle were fitted, based on the uniaxial compression tests of the rocks. The strength also decreases exponentially with the increase of the freeze-thaw cycles.

**Keywords:** freeze-thaw; ultrasonic wave; physical and mechanical properties; permafrost roadbed

## Изменение физико-механических свойств пяти типов скальных грунтов Цинхай-Тибетского нагорья при циклическом промерзании-протаивании

Фуцзюнь НИУ, Хуа ЛЮ, Чжаныцзюй ЛИНЬ, Цзяхао ЛЮЙ

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР  
Китай, 730000, провинция Ганьсу, г. Ланьчжоу, e-mail: niufujun@lzb.ac.cn

**Аннотация.** При строительстве Цинхай-Тибетской железнодорожной магистрали для сохранения многолетней мерзлоты в основании земляного полотна использовалась каменная наброска на откос, а также скальные бермы из цементированных обломочных пород, аргиллита, песчаника, гранита и андезита. Из-за низких температур воздуха, а также больших перепадов температуры на Цинхай-Тибетском нагорье происходят интенсивные циклы промерзания-протаивания, ведущие к морозному выветриванию и существенным изменениям физических характеристик скальных грунтов. Для выяснения характера разрушения указанных типов пород были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях, моделирующих реальные природные условия. У образцов андезита и цементированной обломочной породы наблюдалось более сильное и быстрое разрушение по сравнению с другими породами, при этом наиболее интенсивное разрушение происходило в первые 10 циклов. Было проведено ультразвуковое испытание скальных пород с использованием цифрового ультразвукового прибора. По изменениям скорости ультразвука после циклов промерзания-протаивания определялся ряд механических характеристик грунтов (динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона, динамический модуль объемной упругости). Выявлено, что с увеличением количества циклов промерзания-протаивания величины всех этих характеристик снижаются; в частности, коэффициент Пуассона некоторых типов исследованных пород становится отрицательным при достижении определенного количества циклов промерзания-протаивания. Таким образом, циклы промерзания-протаивания вызвали существенное нарушение структуры грунтов. По результатам одноосного компрессионного испытания проведено аппроксимирование кривыми зависимости прочности грунта при одноосном сжатии от количества циклов промерзания-протаивания. Выявлено, что прочность экспоненциально снижается с увеличением количества циклов промерзания-протаивания.

**Ключевые слова:** промерзание-протаивание; ультразвуковые волны; физико-механические свойства; земляное полотно на многолетнемерзлых грунтах.



# Physical changes of five types of rock in the Qinghai-Tibet Plateau under freeze-thaw cycles

Fujun Niu, Hua Liu, Zhanju Lin, Jiahao Lu

## Introduction

Rock is a kind of non-homogeneous natural materials, which is composed of mineral grains, air gaps, cements and gap fillers. Every kind of mineral grains have different deformation under freeze-thaw cycles. As a continuum, the rock's corresponding coefficients of various components are not in accordance with thermal expansion, so that the deformation can not be freely with the temperature. If the thermal stress of the boundary exceeds the ultimate strength, it will break the connection along this boundary between the mineral particles, and create micro-cracks. With the changes in the environment, micro-cracks will gradually form a network.

Slope stone retaining the road base is the major type in frozen soil subgrade structure along the Qinghai-Tibet Railway, accounting for 80% of the length in the permafrost regions is at over 4,500 m above the sea level, where the maximum temperature difference reached 40-50°C between day and night. Strong ultraviolet radiation and freezing and thawing cycle cause the rock's deterioration forcefully. As the large pores distributing in the rock layer are the main effective factors for protecting the underlying permafrost, the filling of the tiny broken particles might cause weakening the heat-transfer function of the rock layer [1], [2]. Lai obtained that the specimen's means strength, density and CT means of the rock specimens decreased when CT mean

square value increases under freezing and thawing cycles by CT [3], which indicated that frost damage lead physical and mechanical properties of rock specimen to more uneven distribution. Wu obtained that the acoustic emission increased with the freeze-thaw cycles increased [4]. We chose five kinds of rocks used for rock layers in construction of the Qinghai-Tibet Railway, and described the deterioration of the basic laws of frost damage and the changing trend of physical and mechanical properties of the rocks based on acoustic tests and strength tests.

## Methods

### Specimen-making

The five kinds of block rocks are obtained from the rock layers along the Qinghai-Tibet Railway. Temperature difference between day and night was considered up to 40°C. The size of standard rock sample is 100 mm × 50 mm.

### Main experimental instrument

(1) Refrigeration equipment: ACUMA Refrigeration with the lowest temperature of -40°C. (2) Electric oven of DGC-9140B. (3) Ultrasonic Instrument of RSM-SY5 Digital Ultrasonic Instrument. (4) Electronic balance labeled Setra 2000 with a capacity of 2,000 g and the Min. measurable value of 0.01 g.

The physical parameters of the rocks under natural state are shown in Table 1.

Table 1. Basic physical index of the specimens

Specimen	Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Saturated density (g/cm <sup>3</sup> )	Moistures (%)	Porosity (%)	Longitudinal wave velocity (Vp)(m/s)	Transverse wave velocity (Vs)(m/s)
Andesite	2.53	2.55	0.68	1.90	3,480	2,136
Granite	2.62	2.66	0.33	0.85	4,136	2,869
Mudstone	2.72	2.75	0.45	1.22	3,690	2,466
Sandstone	2.76	2.77	0.36	1.01	3,722	2,802
Clastic rock	2.69	2.71	0.49	1.21	3,544	2,518

## Tested results

### Change of the rock surface

The failure modes of the five types of rocks under freeze-thaw cycles are different. With the increase time of freeze-thaw cycle, the cracks gradually widened.

The first crack of andesite specimen

appears in the first five freeze-thaw cycle, the development of cracks along the diagonal length is about 5 cm, and width is about 1-2 mm. Up to 10 freeze-thaw cycles, crack length is about 8 cm, and width is about 2 mm. When the time of freeze-thaw cycle reaches 10 to 20, the cracks continue to develop on the surface. The crack



length is about 9 cm after 20 freeze-thaws cycle, and width is about 2 mm (Fig. 1a). After 20 times, the cracks development almost stops.

We can clearly see that vertical cracks of granite specimen appear after 8 cycles. The crack length is about 5 cm, and width is about 0-2 mm. And after 13 cycles, the crack size is about 8 cm long and 1-3 mm wide (Fig. 1b).

Damage of the clastic rocks is earlier to occur than the other rocks. The crack length is about 5 cm, and width is about 0-2 mm. While the freeze-thaw cycle increase to 20 times, the axial crack is about 10 cm long and the circumferential crack is about 5 cm long (Fig. 1c).

The surface crack occurs in the mudstone after 7 cycles of freeze-thaw. The crack length is about 3 cm the crack extends from the bottom of both sides of syncline, the angle is about 20-30 ° after 20 cycles (Fig. 1d). And it is 4 cm after 30 times of freeze-thaw cycle.

Damage of the sandstone is lighter than the other rocks. No crack appears before the twentieth

cycle of freeze-thaw. When the time of the cycle is up to the 25, a ring crack occurs and reaches 3 cm in length in the middle part of the specimen at last (Fig. 1e).

#### Change of rock mass

We can clearly see from Fig. 2 that mass change rate of andesite specimen is the highest of all the specimens, as its moisture and porosity is highest in value of the all. Under freeze-thaw condition, moistures and porosity is an important factor in change of mass.

#### Change of ultrasonic velocity

Rock phase and the continuous degree of compaction can be measured by wave velocity, based on mechanical and thermodynamic methods. So cracks, joints in the rocks, and other factors, such as roughness and stiffness of joints also affects the elastic wave propagation [5], [6].

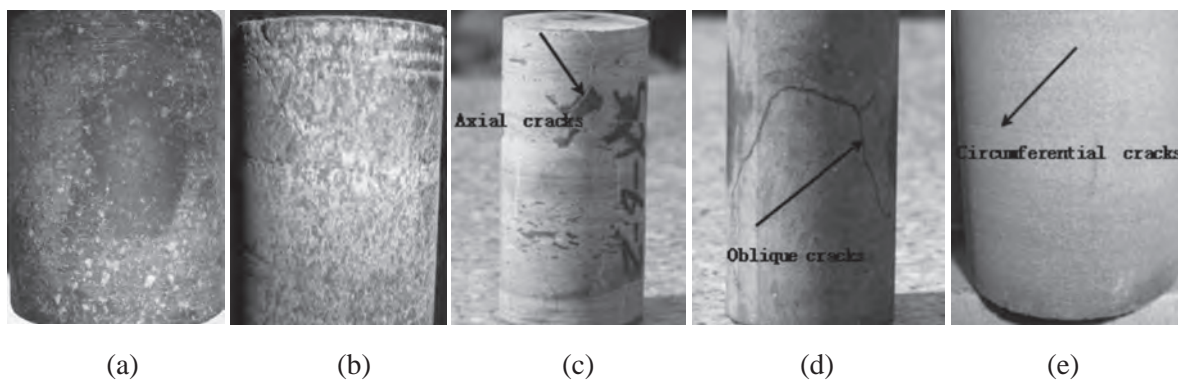


Fig. 1 Surface cracks in the specimens after times of freeze-thaw cycle. (a) andesite rock; (b) granite rock; (c) mclastic rock; (d) mudstone; (e) sandstone.

Table 2. The average ratio of changes of ultrasonic velocity after freeze-thaw cycles

Specimen	Average change of velocity after freeze-thaw cycles (%)							
	5 cycles		10 cycles		20 cycles		30 cycles	
	Vp	Vs	Vp	Vs	Vp	Vs	Vp	Vs
Mclastic	16.4	15.4	-3.2	1.9	-0.5	-3.5	4.3	3.0
Mudstone	14.4	11.1	-2.2	-4.8	5.5	6.6	13.4	4.7
Sandstone	12.8	8.2	-2.3	3.1	6.4	-0.8	14.1	11.2
Granite	-6.4	-9.8	—	—	16.7	10.0	14.6	9.5
Andesite	0.9	6.9	—	—	29.9	18.5	31.5	20.3

Table 2 shows the changes of the ultrasonic velocity after freeze-thaw cycles. The max average ratio of changes of the ultrasonic velocity appears when andesite specimen was frozen and thawed 30 times. The value is 31.5%. But compare the values after 20 times and 30 times of the cycle, they are very near and show that frost damage appears in the early freeze-thaw cycles.

In general, the trend of frost losses is increasingly weakened. The longitudinal wave velocity and transverse wave velocity decreases

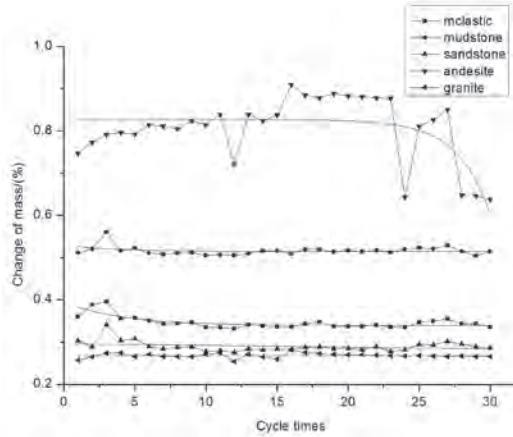


Fig. 2. Mass changes of the five types of rocks after freeze-thaw cycles.

with the time of freeze-thaw cycle, shown by Fig. 3 and Fig. 4. The findings of many scholars have indicated that the fracture of rock specimens has been developed greatly and cracks will develop slowly after the first ten freeze-thaw cycles [7], [8]. According to the data in Table 2 and Fig. 5, it is also shown that the aspect ratio of the velocity has the same changing rule, along with the changes of the moistures and porosity of the specimens. It is that: andesite > mclastic > mudstone > sandstone > granite.

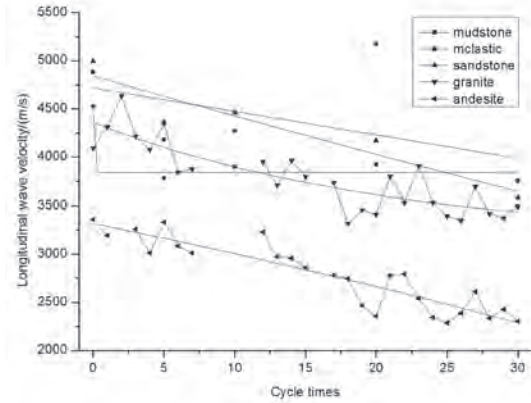


Fig. 4. Ultrasonic longitudinal wave velocity changes.

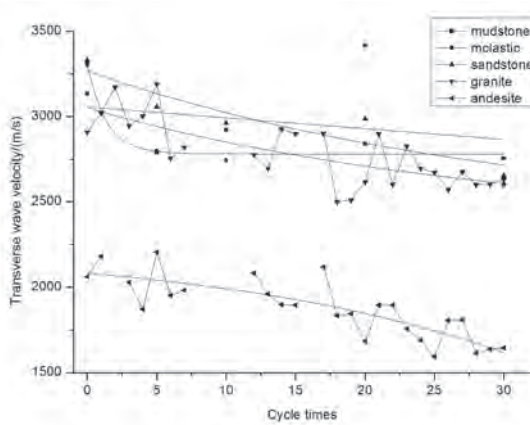


Fig. 3. Ultrasonic transverse wave velocity changes.

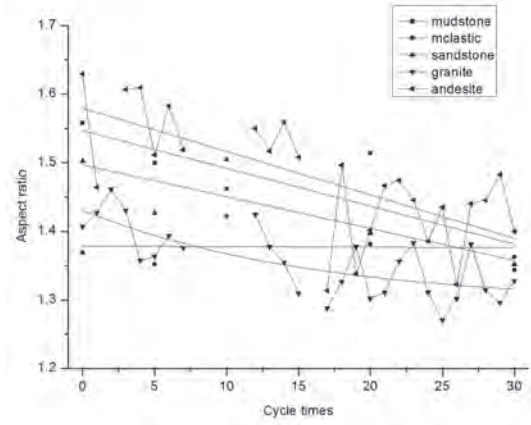


Fig. 5. The relationship between velocity aspect ratio and the time of freeze-thaw cycle.

#### Change of dynamics parameter

In the elastic theory by the Lamé-Navier equations [9], we can obtain that the relationships among the elastic longitudinal waves, shear wave with dynamic elastic modulus, Poisson's ratio, dynamic rigidity modulus and the dynamic bulk modulus, showing as the following.

$$E_d = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} ; \quad G_d = \rho V_s^2 ;$$

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} ; \quad E_d = \rho V_s^2 (1 + \mu) \times 10^{-6}$$

where  $E_d$  is dynamic elasticity modulus,  $V_p$  is longitudinal wave velocity,  $V_s$  is transverse wave velocity,  $\mu$  is Poisson's ratio,  $\rho$  is density,  $G_d$  is dynamic rigidity modulus. Therefore, we can measure the ultrasonic velocity after freezing and thawing to determine the dynamic parameters of specimens.

Poisson's ratio of five kinds of specimens decreases when the time of freeze-thaw cycle increase. In addition, Poisson's ratio is negative during the first 10 freeze-thaw cycles. According to former studies [10], the negative Poisson's ratio may be related to freeze-thaw cycles and the rock's anisotropy. Under natural conditions,

the original fractures are closure inside the rock. Temperature changes during freezing and thawing generate the internal temperature stress of the specimens [11]. As Poisson's ratio decreases, the failure deformation of the specimen might cause cavities and the hole-edges can be broken. So the continues freezing and thawing might cause the damage to the specimens and the hole diameter will be contraction. It reveals the deep-rooted mechanism of the weathering or broking of the rocks. Therefore, the max changed ratio of the dynamics parameters occurs in andesite rocks, as shown in Table 3.

Table 3. The dynamics parameters calculated by ultrasonic velocity

Cycle s	Poisson's ratio $\mu$					Dynamic elastic modulus Ed/GPa					Dynamic bulk modulus Kd/GPa					Dynamic rigidity modulus Gd/Gpa				
	mc	mu	s	a	g	mc	mu	s	a	g	mc	mu	s	a	g	mc	mu	s	a	g
0	0.07	0.15	0.10	0.54	-0.01	27.4	31.3	33.8	16.6	21.9	16.0	29.8	28.3	14.3	14.3	29.6	27.2	30.7	10.8	22.2
5	0.02	0.10	0.02	0.18	-0.06	18.3	23.3	25.2	14.7	25.5	13.4	19.4	17.4	11.8	14.3	20.4	21.2	24.8	12.4	27.1
10	0.01	0.06	-0.01	--	--	19.9	24.7	25.8	--	--	13.5	18.7	15.7	--	--	19.6	23.3	23.3	--	--
20	-0.05	0.08	-0.02	-0.02	-0.11	20.0	21.9	23.1	7.1	16.2	12.1	17.4	14.7	4.6	6.6	21.0	20.3	23.7	7.2	18.1
30	-0.08	-0.12	-0.10	-0.02	0.09	18.1	16.1	16.7	6.8	16.8	10.4	8.6	9.2	4.3	7.9	19.8	18.3	18.7	6.9	18.5

mc: mclastic; mu: mudstone; s: sandstone; a: andesite; g: granite.

#### Change of uniaxial compressive strength

Based on the tested data of compressive strength, we can obtain a fitting formula, which is:

$$y = y_0 + A_1 * e^{(-x/t_1)}$$

Where y is the uniaxial compressive strength,  $y_0$ ,  $A_1$  and  $t_1$  are Empirical coefficients with different specimens, x is the time number of freeze-thaw cycle.

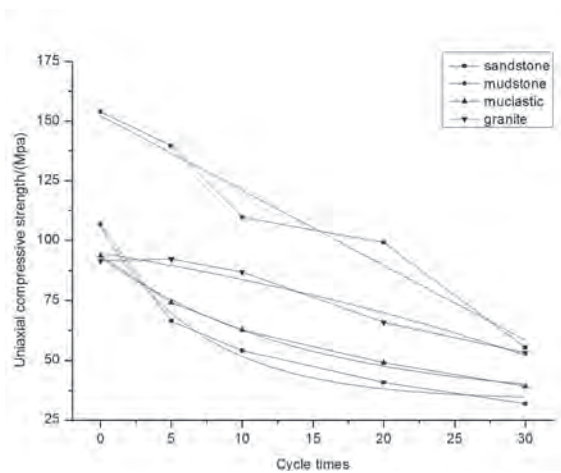


Fig. 6. The relationship between uniaxial compressive strength and the time of freeze-thaw cycle.

The data gotten from the tests and the fitting formula are used to form Fig. 6. It is shown from the figure that the compressive strength of the four tested rocks increases with the time of freeze-thaw cycle. Relations between the strength and cycle time meet the negative exponential function. Consider the influence to the frozen soil subgrade, strong frost weathering might decrease the rock particle size and the porosity among them. So that it will weaken the cooling effectiveness of the rock layers.

#### Conclusions

- 1) Under the cycle of freezing and thawing conditions, the five kinds of rock used in the embankments of the Qinghai-Tibet Railway show different levels of damage, of which the most destructive one is andesite.
- 2) After 30 time of freeze-thaw cycle, the maximum change ratio of the mass occurs in andesite. It is indicated that frost damage is well related to the moisture content and the porosity.
- 3) Under the cycle of freezing and thawing conditions, the rock's dynamics elastic modulus, dynamics rigidity modulus and other dynamics mechanical properties would be greatly changed.
- 4) Under the cycle of freezing and thawing conditions, the rock parameters, such as the ultrasonic wave velocity decreases.

### Acknowledgements

This work was supported in part by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40821001), the Important Orientation Projects of the CAS (KZCX2-YW-Q03-04), the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 41030741), and the State Key Development Program of Basic Research of China (973 Plan, 2010CB434813).

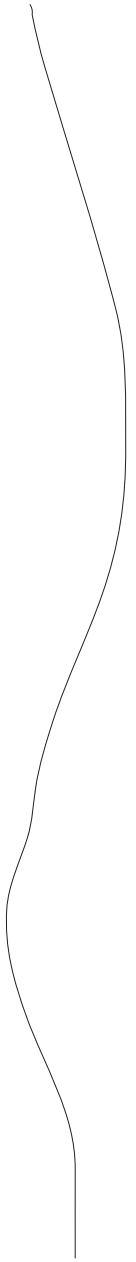
### References

1. Cheng Guodong. 2003. Local factors' effect on distribution of permafrost and its enlightenment on the design of Qinghai Tibet Railway. *Science in China (Series D)* 33 (6): 602-607. (in Chinese)
2. He Guisheng, DING Jingkang, LI Yongqiang. 2000. Heat transmission properties and application of the dump filling crushed stone layer. *Journal of Glaciology and Geocryology* 22 (Supplement): 34-37. (in Chinese)
3. Lai Yuanming, Wu Ziwang, Zhu Yuanlin, et al. 2000. CT analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the Daban Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology* 22(3): 206-210. (in Chinese)
4. Wu Gang, He Guoliang, Zhang Lei, et al. 2006. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 25(Supplement 1): 2930-2938. (in Chinese)
5. Kang Jian. 2008. *Research on thermal cracking of rocks and its application*. Dalian: Dalian University of Technology Press, 145 pp. (in Chinese)
6. Ru Zhongliang, Jiang Yujing. 2008. Research on transmission behaviors of rough joint surface with elastic P-wave incidence. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 27(12): 2535-2539. (in Chinese)
7. Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. 2004. A study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 26(6): 838-842. (in Chinese)
8. Zhang Quansheng. 2003. *The preliminary research of micro-damage mechanics characteristics of rock under the condition of freezing and thawing*. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 28 pp. (in Chinese)
9. Xu Zhilun. 1983. *Elastic Mechanics*. Beijing: People Education Press, 23 pp. (in Chinese)
10. Wang Rangjia, Fan Yi'an, Gao Xuezhi. 1996. Discuss on the negative *Poisson's ratio of rock*. *Prospect Engineering* 4: 17-18. (in Chinese)
11. Bathurst R J, Rothenbory L. 1988. Note on a random isotropic granular material with negative Poisson's ratio. *International Journal of Engineering Science* 26: 373-383.

**Session 1**  
**Physics and Mechanics of Frozen Ground, Frost Action,  
and Modeling**

**Секция 1**  
**Физико-механические свойства мерзлых грунтов,  
криогенные процессы, моделирование**





# Cryogenic frost rebound forces applied to flexible surrounding structures

D.K. Fedorov, N.F. Krivonogova

Vedeneev VNIIG, 21 Gzhatskaya str., 195220, St. Peterburg, Russia.

E-mail: Ing-geo@ground.vniig.ru; fedako@mail.ru

**Abstract.** There is a linear dependence between horizontal deformations of frosted soil surface and forces of frost rebound. Hence, when the frosted soil surface is unmovable ( $f_{f0}=0$ ), extremely possible frost rebound pressure come in place for the soil ( $p_{fh}=0$ ).

In 2010 JSC VNIIG has built an experimental site for studying frost rebound with 3 models of U-section walls installed into rebounding loam, each having different flexural rigidity. Physical models were used for measuring soil temperatures, frost penetration depth, rebound characteristics, U-section deformations. The results were used to find dependence of forces enclosed and corresponding U-section deformations.

The experiments allowed to find  $f_{f0}$  characteristic for soil bench mark. Knowing characteristics of soil made it possible to calculate  $f_{f0}$  and  $p_{fh,max}$ . Two charts indicating the dependences between  $f_{f0}$  measured for soil bench mark with  $p_{fh,max}$  and  $f_{f0}$  calculated with  $p_{fh,max}$  are presented in the article. Deformations of the U-section walls allowed to find forces of frost rebound applied at different depths with different soil temperatures.

Calculated forces of frost rebound applied to U-section walls are compared with the ones from experiment.

**Keywords:** frost action of soil; forces of frost rebound; envelope deformations; frost rebound behavior.

## Криогенное пучение грунтов применительно к гибким ограждающим конструкциям

Д. К. Федоров, Н. Ф. Кривоногова

ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 195220, Россия, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21,  
e-mail: Ing-geo@ground.vniig.ru; fedako@mail.ru

**Аннотация.** Существует линейная связь между горизонтальными деформациями поверхности промерзающего массива пучинистого грунта и величинами нормальных сил морозного пучения. В соответствии с этим при несмещаемой поверхности пучинистого грунта ( $f_{f0}=0$ ) возникают предельно возможные для грунта давления сил морозного пучения  $p_{fh} = p_{fh,max}$ . При свободно деформируемой поверхности силы морозного пучения не возникают ( $p_{fh}=0$ ).

В 2010 г. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева организован экспериментальный полигон, на котором в пучинистые суглинки были установлены 3 модели швеллерных стенок с различными изгибными жесткостями. На моделях измерены температуры грунтов и глубина промерзания во времени, величины пучения, деформации швеллеров. По результатам тарировки швеллеров построена зависимость их изгиба от прикладываемой силы.

Экспериментально по грунтовому реперу получена величина  $f_{f0}$ . Расчетами, зная характеристики исследуемых грунтов, получены  $f_{f0}$  и  $p_{fh,max}$ . Построены два графика связывающих попарно величину  $f_{f0}$ , полученную по реперу с  $p_{fh,max}$ , и величину  $f_{f0}$ , полученную расчетом с  $p_{fh,max}$ . По результатам деформации швеллеров, при помощи тарировочного графика, получены силы пучения грунтов в зависимости от глубины промерзания и температуры.

Приведено сравнение сил пучения грунтов, действующих на швеллерные конструкции, полученных расчетами и экспериментально.

**Ключевые слова:** промерзание грунтов; силы криогенного пучения; деформации ограждающих конструкций; пучинистые свойства.

## Криогенное пучение грунтов применительно к гибким ограждающим конструкциям

Д. К. Федорова, Н. Ф. Кривоногова

### Введение

Уникальным, сложнейшим процессом, возникающим при промерзании грунтов, является криогенное (морозное) пучение. При проектировании сооружений нормативными документами регламентируется учитывать вертикальные силы пучения, действующие по нормали к фронту промерзания [1, 2]. В этих случаях можно пренебречь касательными и горизонтальными силами пучения, которые оказывают значительно меньшее воздействие на сооружение, чем вертикальные. Их учитывают, вводя дополнительный коэффициент в расчетную формулу, для оценки нормального к фронту промерзания земной поверхности пучения. В руководстве приведена проверка устойчивости фундамента на совместное действие касательных и нормальных к подошве фундамента сил морозного пучения [3].

Есть виды подземных и наземных сооружений, на которые более значительное влияние оказывает пучение грунтов в горизонтальном направлении (доки, подпорные стенки, тоннели, резервуары и т.д.), для учета которого, возможно применять известные методики расчета, но при этом, обязательно учитывать условия промораживания (неоднородность грунта и его нагружение по вертикали, стесненность грунта, водонасыщенность, податливость сооружений к силам пучения, отсутствие естественной теплоизоляции).

В территориальных документах приведены указания на то, что при расчете подпорных стен и ограждений котлованов следует учитывать воздействие морозного пучения [4, 5]. Только не дано методики, каким именно образом это учитывать.

Сложность формирования и развития морозного пучения грунтов зависит от целого ряда факторов, главными из которых являются: фазовое превращение содержащейся в грунте воды в лед с изменением объема грунта; миграция влаги к фронту промерзания, обычно сопровождаемая неравномерным изменением объема грунта – криогенным (морозным) пучением; состав и физико-механические свойства грунтов и т.д.

По отдельности, в самом общем виде, возможен теоретический учет этих и других факторов по аналогам, с помощью расчетов [6-9], предложенных в нормативно-методических документах, упомянутых выше [1-5] и по ре-

зультатам лабораторных испытаний состава и пучинистых свойств грунтов [6, 7].

Комплексно охарактеризовать напряженно-деформированное состояние при формировании и развитии горизонтальных сил и деформаций морозного пучения грунтов без натурных и лабораторных исследований невозможно, также как и всех составляющих этого сложного процесса, с чем и связаны значительные расхождения в полученных силах и величинах пучения грунтов с помощью расчетов, лабораторных и натурных исследований. Тем более, трудно учесть такое влияние на сооружения без проведения специальных натурных испытаний.

В современной литературе предлагают определять горизонтальное давление морозного пучения грунта, возникающее при промерзании грунта через жесткую подпорную стену и действующее на нее, исходя из следующих допущений: подпорная стена не деформируется (жесткая) и увеличение объема грунта будет происходить, в основном, за счет уплотнения талого грунта на величину деформации морозного пучения, вызванной промерзанием грунта за подпорной стеной; касательные силы морозного пучения грунта, действующие на подпорную стену, не учитываются; толщина твердомерзлого грунта не деформируется [3, 8]. Практически все составляющие предложенных расчетных формул определяются, за исключением  $Q_i$  – количество мигрирующей воды, зависящей от множества факторов. По Цытовичу Н. А. [10, 11]:  $Q_i = f(I_{W, \theta, \zeta, p} \dots)$ , где  $I_{W, \theta, \zeta, p}$  – движущий градиент ( $W$  – влажность,  $\theta$  – температура,  $\zeta$  – химический потенциал,  $p$  – величина внешнего давления и т.д.). Теоретическое определение количества мигрирующей воды вызывает сложности из-за многогранности процесса миграции и влияния большого числа факторов на него. Хотя предложенная методика дает возможность рассчитать величину давления морозного пучения, однако допущения при таких расчетах увеличивают значение давления морозного пучения грунта на величину, которую можно приближенно проверить лабораторными либо с большей точностью натурными исследованиями.

Если не углубляться в понимание процессов на молекулярном уровне, а оценить их применительно к инженерным задачам, считаем предложенную методику расчета правомерной

и рекомендуемой в качестве предварительной оценки пучинистых свойств грунтов во взаимодействии с сооружениями.

Существует линейная связь между горизонтальными деформациями поверхности промерзающего массива пучинистого грунта и величинами нормальных сил морозного пучения [7]. В графическом виде такая связь представлена на рис. 1.

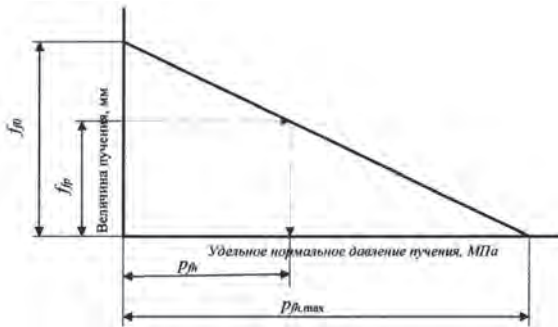


Рис. 1. Определение величины удельного давления морозного пучения  $p_{fh}$  с учетом допустимого (возможного) перемещения сооружения на величину  $f_{fp}$  (абсолютной деформации морозного пучения).

В соответствии с этим графиком при несмещаемой поверхности пучинистого грунта ( $f_{fp}=0$ ) возникают предельно возможные для определенного вида грунта давления сил морозного пучения  $p_{fh}=p_{fh,max}$ . При свободно деформируемой поверхности пучинистого грунта ( $f_{fp}=f_{fp0}$ ) силы морозного пучения не возникают вовсе ( $p_{fh}=0$ ). Все промежуточные значения  $f_{fp}$  и  $p_{fh}$  связаны между собой линейной зависимостью.

### Задачи эксперимента

Нами была поставлена задача получить зависимость давления пучения от величины пучения по натурным экспериментам с учетом возможности деформирования ограждающей конструкции. Сравнить полученные силы горизонтального пучения с рассчитанными по ТМД 50-601-2004 и в результате лабораторных исследований.

### Оснащение и оборудование эксперимента

Для проведения экспериментов по физическому моделированию работы шпунтовых стенок на действие сил морозного пучения был выбран полигон с сильно пучинистыми глинистыми грунтами, расположенный в Архангельской области. На полигоне выкопана траншея глубиной до 1,5 м, шириной 1 м и длиной 12 м. Испытания проводятся со швеллерами, имитирующими гибкие шпунты,

ограждающие котлован. С помощью перечета изгибной жесткости швеллеров и геометрических параметров, выполнен переход к конкретным шпунтовым конструкциям.

Физические модели швеллерных стенок (с различными изгибными жесткостями, швеллер С18, С22, С27) устанавливаются горизонтально в траншею. Каждая стенка собрана из 3–5 (в зависимости от марки) швеллеров длиной 4 м. В итоге получены 6 моделей швеллерных стенок с тремя различными изгибными жесткостями. Три модели в летний период 2010 г., установлены в подготовленную траншею друг за другом. Посередине между стенками в траншее, аналогично распору, установлены деформометры. По краям траншеи (до 2 м) и на ее дне уложена теплоизоляция, с целью исключения промерзания грунтов с поверхности и от дна, промерзание происходит только через стенки модели. На расстояние до 2 м от стенки траншеи с шагом 25 см вертикально установлены термокосы для постоянного контроля изменения температур грунтов по глубине в процессе промерзания. Рядом с экспериментальными моделями установлен репер для определения деформаций свободного пучения грунта. Сверху траншеи обустроен настил для исключения попадания воды и снега. Чтобы получить силы пучения, предварительно тарировались оставшиеся три модели стенок с различными изгибными жесткостями в отдельно приготовленной траншее, тем самым получили зависимость изгиба швеллеров от действующей на них силы (рис. 2). В дальнейшем пользуясь графиком

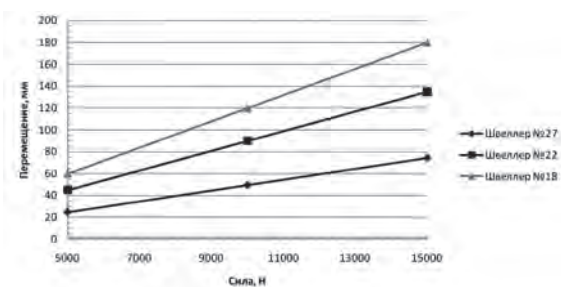


Рис. 2. Результаты тарировки швеллеров.

тарировки, по данным деформаций швеллеров в различные промежутки времени при промерзании определяли силы, вызывающие эти деформации. Параллельно были проведены лабораторные исследования грунтов полигона, получен их гранулометрический состав и физико-механические свойства (табл. 1).

## Результаты эксперимента, полученные на данном этапе исследований

Представленные результаты отвечают од-ной модели из швеллеров № 22, и снятых с нее в средней части деформаций. Температура воздуха на экспериментальном полигоне в период исследований (зима 2010-2011 гг.) носила неустойчивый характер, резкие понижения температур в короткий срок до  $-25^{\circ}\text{C}$  сменялись оттепелями до  $0^{\circ}\text{C}$ . До 17.11.2010 столбик термометра находился в пределах от  $+2$  до  $-1^{\circ}\text{C}$ , затем произошло резкое понижение температуры до  $-12^{\circ}\text{C}$ , в этот период

началось промерзание грунтов. Установлено, что температура начала пучения глинистых грунтов  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Первый раз такие температуры грунтов за стенкой моделей были зафиксированы 24.11.2010. Деформации швеллерных стенок 12.12.2010 (табл. 2) в это время, грунты за стенкой на уровне первых 4х швеллеров промерзли на глубину около 1,25 м, средняя температура промерзшей толщи составила  $-1,5^{\circ}\text{C}$ . Силы пучения, которые привели к наблюдаемым деформациям, составили 0,073-0,085 МПа. Дальше наблюдалось субгоризонтальное продвижение фронта промерзания с меньшей скоростью, чем до 12.12.2010.

Таблица 1. Основные физические свойства грунтов

№ образца	Плотность грунта, $\rho$ , $\text{г/см}^3$	Влажность (доли ед.), $W$	Плотность сух. грунта, $\rho_d$ , $\text{г/см}^3$	Плотность частиц, $\rho_s$ , $\text{г/см}^3$	Коэффициент пористости, $n$ , доли ед.	Влажность (доли ед.) на границе		Число пластичности ( $I_p$ )	Показатель текучести ( $I_L$ )	Наименование по ГОСТ 25100-95
						текучести ( $W_L$ )	пластичности ( $W_p$ )			
1	2,16	0,15	1,87	2,71	0,45	0,28	0,16	0,12	-0,07	Суглинок твердый
2	2,12	0,16	1,83		0,48	0,28	0,16	0,13	0,01	Суглинок полутвердый
3	2,20	0,20	1,83	2,70	0,47	0,27	0,16	0,11	0,33	Суглинок тугопластичный
4	2,18	0,20	1,81		0,49	0,28	0,16	0,12	0,38	Суглинок тугопластичный
5	2,16	0,21	1,78	2,70	0,52	0,26	0,16	0,10	0,51	Суглинок мягкопластичный
6	2,17	0,20	1,81		0,50	0,27	0,15	0,12	0,44	Суглинок тугопластичный
7	2,05	0,21	1,70	2,71	0,59	0,28	0,16	0,12	0,38	Суглинок тугопластичный
8	2,25	0,20	1,87		0,45	0,28	0,16	0,12	0,33	Суглинок тугопластичный
9	2,23	0,18	1,89	2,71	0,43	0,27	0,17	0,10	0,10	Суглинок полутвердый
10	2,26	0,19	1,89		0,43	0,28	0,16	0,12	0,28	Суглинок тугопластичный
<i>Среднее:</i>	<i>2,18</i>	<i>0,19</i>	<i>1,83</i>	<i>2,71</i>	<i>0,48</i>	<i>0,28</i>	<i>0,16</i>	<i>0,12</i>	<i>0,27</i>	<i>Суглинок тугопластичный</i>

Таблица 2. Результаты полигонного эксперимента по среднему швеллеру № 22 (в центральной его части)

Дата замера (Швеллер №22)	Деформации (номер швеллера в модели от поверхности)	Сила в Н	Давление в МПа
12.12.2010	4 (2)	1608	0,11
	6 (3)	2053	0,14
	6 (4)	2053	0,14
15.01.2011	12	3386	0,24
	15	4052	0,28
	16	4275	0,3
02.02.2011	15	4052	0,28
	16	4275	0,3
	18	4719	0,33

На 15.01.2011 деформации составили от 12 мм (второй от дневной поверхности швеллер) до 16мм (швеллер у дна траншеи), при этом изотерма  $-1,5^{\circ}\text{C}$  находилась на глубине от 1,5 м за стенкой на против средних швеллеров, до 1,75 м напротив двух верхних. Силы пучения на данный период наблюдений составили от 0,11 до 0,14 МПа. Средняя температура промерзшей толщи около  $-3^{\circ}\text{C}$ . Следующие замеры были проведены 05.02.2011 (табл. 2, рис. 3). В этот период времени грунты за стенкой промерзли на глубину до 2м в приповерхностной части и около 1,7м в придонной части траншеи. Деформации швеллеров изменялись от 15 до 18 мм (сверху вниз по середине швеллеров), силы пучения от 0,28 до 0,33 МПа. Распределение температур за весь период наблюдений в центральной части на уровне 2-4 швеллеров происходит субвертикально, что говорит о промерзании грунтов со стороны стенки.



Величина абсолютной деформации морозного пучения  $f_{fp}$  грунта в пределах промерзающей толщи определяется экспериментально при помощи установленного на полигоне репера и расчетом по формуле  $f_{fp} = \epsilon_{fp} \cdot h_f$ , где  $\epsilon_{fp}$  - средневзвешенное значение коэффициента морозного пучения грунта,  $h_f$  - мощность промерзшего слоя грунта [7]. Значение коэффициента морозного пучения грунта рассчитывались по формуле:  $\epsilon_{fp} = [\alpha w(p_d/p_w) - \beta] \gamma_T$ , где  $\alpha$ ,  $\beta$  - параметры пучинистых свойств грунтов, определяемые по таблице [7], в зависимости от вида глинистого грунта, величины числа пластичности  $I_p$  и значения влажности грунта на границе текучести  $W_L$ ,  $p_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\gamma_T$  - коэффициент, учитывающий влияние скорости и продолжительности промерзания грунта в районе полигона, равный 1,2. Полученная расчетом способом величина деформации свободного пучения грунтов на полигоне при глубине промерзания 1,5 м составила 73 мм.

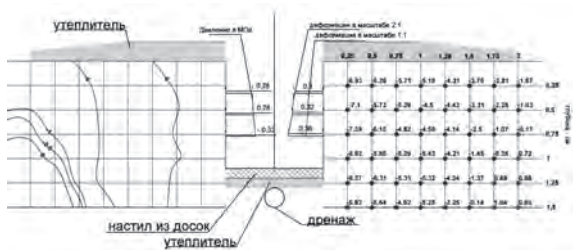


Рис. 3. Распределение температур, деформаций, давления в МПа по 2, 3, 4 от поверхности швеллеров №22 на 05.02.2011. В правой части температура грунтов по термокосам, в левой части изотермы, отвечающие этой температуре.

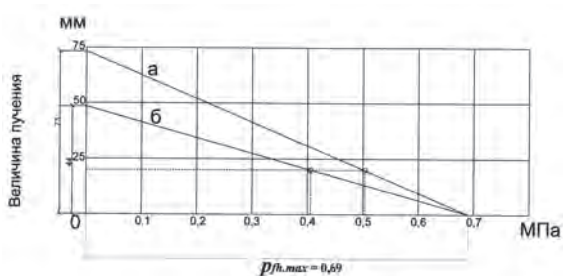


Рис. 4. Зависимость нормального давления пучения грунта на швеллер № 22 от его деформации при глубине промерзания за швеллером 1,5 м.

а) максимальные значения силы и величины пучения рассчитаны; б) максимальное значение силы рассчитано, а максимальное значение величины пучения принято по грунтовому реперу. Пунктиром показана деформация среднего швеллера № 22 в модели в центральной его части и отвечающая ей сила пучения.

Величина максимального значения нормального давления морозного пучения глинистого грунта перпендикулярно к поверхности конструкции (швеллер № 22), определялась по формуле  $p_{fp,max} = [\alpha w(p_d/p_w) - \beta] / \psi$ . При глубине промерзания 1,5 м максимальное расчетное значение нормального давления [5] составило 0,69 МПа. На основании полученных величин построена зависимость давления морозного пучения от перемещения – рис. 4, по которой нормальное давление пучения грунта равно 0,51 МПа, которое отвечает деформациям швеллера № 22 в 18 мм, при глубине промерзания за ним 1,5 м. Экспериментальные данные по грунтовому реперу на начало марта, при глубине промерзания 1,5 м показывают 44 мм. Тогда, по графику (рис. 4), сила отвечающая деформации в 18 мм, будет равна 0,41 МПа.

### Выводы

В результате эксперимента получены изменения сил и деформаций морозного пучения во времени в зависимости от глубины промерзания за швеллерной стенкой.

Данным экспериментом подтверждено, что интенсивность пучения в значительной степени определяется температурным режимом промерзания. Деформации и силы морозного пучения возрастают с понижением температуры на поверхности промерзающего грунта.

Построен график зависимости сил и деформаций пучения грунтов по предложенной методике [7], при рассчитанной (73 мм) и полученной по грунтовому реперу (44 мм) величине деформации морозного пучения. Силы пучения по графику рис. 4, а (на 05.02.2011 по центральному швеллеру № 22 равны 0,51 МПа) превышают силы пучения по графику рис. 4, б (на 05.02.2011 равны 0,41 МПа) и сильно превышают силы пучения по натурному эксперименту рис. 3 (на 05.02.2011 равны 0,33 МПа). Это связано с тем, что в предложенном расчете не учтена пропорциональность сил пучения градиенту температуры в промерзающем слое и изгибу ограждающей конструкции. Разница между экспериментально полученной силой пучения и полученной по 1 варианту (рис. 4, а) составляет 0,18 МПа или 54%, между 2 вариантом (рис. 4, б) составляет 0,08 МПа или 24%.

Нормальные силы морозного пучения были меньше ожидаемых в таких условиях (до 0,7 МПа), за счет высокого температурного градиента.

В дальнейшем планируется закончить лабораторные испытания исследуемых грун-

тов и сравнить результаты, полученные в лаборатории, на экспериментальном полигоне и расчетами. Также планируется смоделировать деформации швеллерных стенок, используя полученные силы пучения с помощью программного комплекса.

### Список литературы

1. СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений.
2. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.
3. Руководство по проектированию оснований и фундаментов на пучинистых грунтах. НИИ-ОСП им. Н.М.Герсеванова. Москва. Стройиздат, 1979.
4. ТСН 50-304-2000. Основания, фундаменты и подземные сооружения (МГСН 2.07-97). Москва.
5. ТСН 50-302-2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге.
6. ГОСТ 28622-90. Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости.
7. ТМД 50-601-2004. Методика оценки характеристик морозоопасных свойств грунтов в строительстве в Санкт-Петербурге.
8. Карлов, В. Д. Основания и фундаменты на сезоннопромерзающих пучинистых грунтах / В. Д. Карлов. – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2007.
9. Пусков, В. И. Силовые воздействия морозного пучения грунтов на фундаменты соору-

жений и методы их расчета: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / В. И. Пусков, 1993. – 37с.

10. Цытович, Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах / Н. А. Цытович. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 168 с.

### References

1. Building Norms and Rules 2.02.01-83\*. *Construction's base and basings.*
2. Building Documentation 50-101-2004. *Designing construction's base and basings.*
3. Research Institute Foundations and Underground structures of N.M.Gesevanova. 1979. *Guide to designing base and basings on the rebounding soils.* Moscow. Stroyizdat.
4. Territorial Building Norms 50-304-2000. *Underground constructions. base and basings 2.07-97.* Moscow.
5. Territorial Building Norms 50-302-2004. *Designing bases and basings of constructions in Saint-Petersburg.*
6. State Standard Specification 28622-90. Soils. *Method of measuring rebounding soil characteristics in a laboratory.*
7. Territorial Technology Documentation 50-601-2004. *Method of measuring rebounding soils' characteristics for designing constructions in Saint-Petersburg.*
8. V.D. Karlov. 2007. *Base and basings on seasonally frosted rebounding soils.* Saint-Petersburg State Architectural University.
9. V.I. Puskov. 1993. *Rebounding soil forces applied to construction's base and basings. Methods of measuring.* Moscow.
10. N.A. Citovich. 1958. *Base and basings on rebounding soils.* Moscow.

## Relationship among the physical properties of soils

G.P. Kuzmin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail:kuzmin@mpi.ysn.ru

**Abstract.** This paper presents an analysis of the general relationship among the physical properties of frozen soils containing unfrozen water. Expressions for this relationship are also given for unfrozen soils and for frozen soils in which all the water is frozen. The study indicates that at the same moisture contents and densities, the amount of gases is greatest in unfrozen soils and lowest in frozen soils, with intermediate values in freezing and thawing soils. The values of specific retention change correspondingly. Soil porosity is independent of the thermal state of a soil. As particle density varies little between soil types, its average value can be used for practical purposes. Then, the graphical presentation of the physical properties provides an aid in determining the relative gas content, porosity and specific retention for frozen and unfrozen soils.

**Keywords:** frozen and unfrozen soils; physical properties; prediction; gaseous constituent; porosity; specific retention.

## Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов

Г. П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail:kuzmin@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Выполнен анализ общей зависимости показателей физических свойств мерзлых грунтов, в которых содержится незамерзшая вода. Приведены также выражения этой зависимости для мерзлых грунтов, в которых вода полностью промерзла, и для талых грунтов. Установлено, что при одинаковых значениях влажности и плотности наибольшее количество газов содержится в талых грунтах, наименьшее в мерзлых и промежуточное количество в промерзающих и протаивающих грунтах. Соответственно изменяется величина полной влагоемкости грунта. Пористость грунта не зависит от теплового состояния грунта. Показано, что в связи с незначительной разностью плотности минеральных частиц различных типов грунтов для практических целей можно принять среднее их значение. Тогда графическое представление показателей физических свойств позволяет определять для мерзлых и талых грунтов относительное содержание газов, пористость и полную влагоемкость.

**Ключевые слова:** грунты мерзлые и талые; показатели физических свойств; определение; газовая составляющая; пористость; полная влагоемкость.

# Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов

Г. П. Кузьмин

## Введение

Свойства грунтов как сложных систем зависят от количественного содержания компонентов, определяемого показателями их состава и состояния. Основные показатели физических свойств грунтов взаимосвязаны. Изменение одного из них приводит к изменению других и соответственно к изменению свойств грунтов. Изучение взаимосвязи показателей физических свойств грунтов является одним из путей установления корреляционной зависимости с другими группами свойств грунтов.

## Взаимосвязь характеристик физических свойств грунтов

Показатели физических свойств грунтов отражают их состав и состояние. Взаимосвязь между ними определяется зависимостью [2]

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left[ \frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_i} - w_w \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \right], \quad (1)$$

где  $V$  и  $V_a$  – объем грунта и газового компонента;  $w$  и  $w_w$  – влажность общая и по незамерзшей воде;  $\rho_d$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_w$  и  $\rho_i$  – плотность соответственно сухого грунта, твердых минеральных частиц, незамерзшей воды и льда.

Зависимость (1) при  $V_a/V = 0$  принимает вид формулы [3].

$$\rho = \frac{\rho_s \rho_i \rho_w (1+w)}{\rho_i \rho_w + \rho_s [w \rho_w + w_w (\rho_i - \rho_w)]}, \quad (2)$$

а при  $V_a/V = 0$ ,  $w_w = 0$  и значениях  $\rho_s = 2,7 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_i = 0,9 \text{ г/см}^3$  преобразуется в формулу [1], которая широко используется практиками

$$\rho_d = \frac{2,4}{2,7w + 0,9}. \quad (3)$$

Точность определения плотности грунта по формулам (2) и (3) для практических целей вполне достаточна. Однако для изучения различных процессов, происходящих в мерзлых грунтах при изменении температуры, необходимо знание количества не только неза-

мерзшей воды, но и газовой составляющей. Поэтому проанализируем взаимосвязь между показателями физических свойств грунтов, определяемую зависимостью (1).

Следует отметить, что в зависимости (1) все величины, за исключением влажности, при изменении температуры не остаются постоянными. Охлаждение и нагревание мерзлых грунтов сопровождается изменением содержания незамерзшей воды и льда, температурными деформациями всех их компонентов, а также деформациями газов под действием возникающих в грунтах давлений. Однако собственно температурные деформации компонентов грунта по сравнению с объемными изменениями грунта за счет фазовых переходов воды незначительны.

Зависимость (1) характеризует взаимосвязь между показателями физических свойств мерзлых грунтов при  $0 \leq w_w < w$ . При полном переходе воды в лед ( $w_w = 0$ ) она принимает вид

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left( \frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_i} \right), \quad (4)$$

а для талых грунтов ( $w_w = w$ )

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left( \frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right). \quad (5)$$

Формулы (1, 4 и 5) позволяют определять содержание газовой составляющей соответственно промерзающих и протаивающих, мерзлых и талых грунтов. Анализ их показывает, что при одинаковых значениях  $w$  и  $\rho_d$  наибольшее количество газа содержится в талых грунтах ( $w_w = w$ ), наименьшее в мерзлых грунтах ( $w_w = 0$ ). В промерзающих и протаивающих грунтах ( $w_w > 0$ ) содержится промежуточное количество газового компонента. Из этого следует, что формулы (4) и (5) характеризуют предельные количества  $V_a/V$  в грунтах.

При  $w = 0$  относительное содержание газов в грунте не зависит от теплового их состояния и определяется, как это следует из (1, 4 и 5), выражением

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (6)$$

правая часть которого представляет, как известно, пористость грунта  $n$ . Следовательно, при  $w=0$   $V_a/V=n$ . В случае  $V_a/V=0$  влажность в зависимостях (1,4 и 5) соответствует полной влагоемкости грунта и определяется выражениями

при  $0 \leq w_w < w$

$$w_n = \rho_i \left[ \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} + w_w \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \right], \quad (7)$$

при  $w_w=0$

$$w_n = \rho_i \left( \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (8)$$

при  $w_w = w$

$$w_n = \rho_w \left( \frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right) \quad (9)$$

По данным [4] плотность минеральных частиц различных типов грунтов изменяется незначительно и составляет в среднем для песка 2,66, супеси 2,7, суглинка 2,71 и глины 2,74 г/см<sup>3</sup>. Для практических расчетов можно принять  $\rho_s=2,7$  г/см<sup>3</sup>. В этом случае, приняв  $\rho_w=1,0$  и  $\rho_i=0,92$  г/см<sup>3</sup>, формулы относительного содержания газов в грунте (1,4 и 5) и полной влагоемкости (7) ... (9) можно представить в следующем виде:

при  $0 \leq w_w < w$

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d (0,37 + 1,087w - 0,087w_w), \quad (10)$$

$$w_n = \frac{0,92}{\rho_d} - 0,34 + 0,08w_w, \quad (11)$$

при  $w_w=0$

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d (0,37 + 1,087w), \quad (12)$$

$$w_n = \frac{0,92}{\rho_d} - 0,34, \quad (13)$$

при  $w_w = w$

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d (0,37 + w), \quad (14)$$

$$w_n = \frac{1}{\rho_d} - 0,37. \quad (15)$$

### Графическая зависимость характеристик физических свойств грунтов

На рис.1 представлены результаты расчетов изменения  $V_a/V$  от  $w$  и  $\rho_d$  для талых и мерзлых грунтов при принятом постоянном значении  $\rho_s=2,7$  г/см<sup>3</sup>.

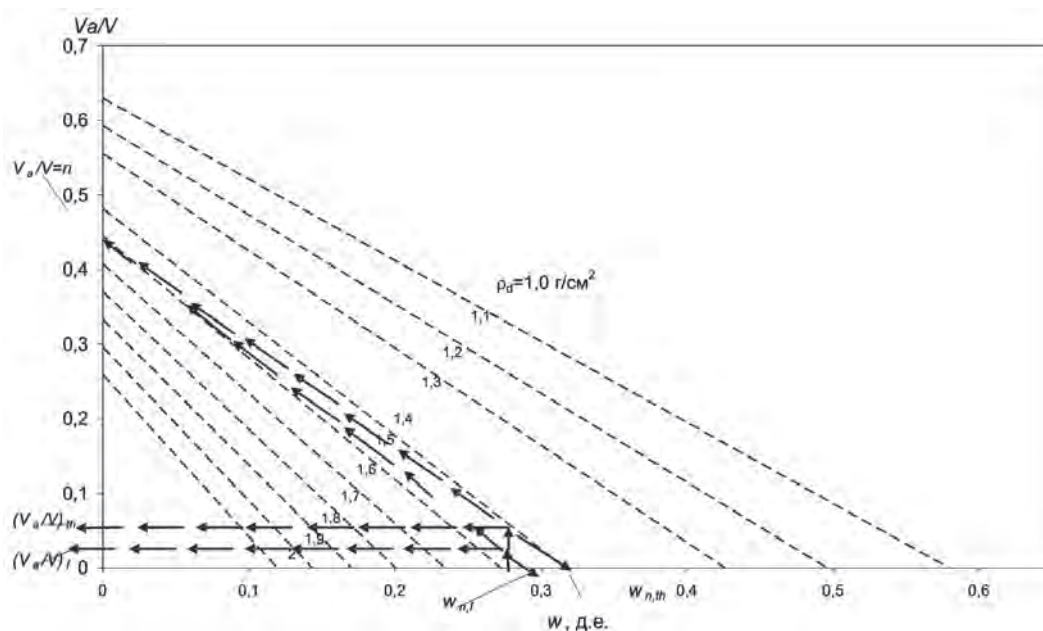


Рис. 1. Зависимости показателей физических свойств талых (сплошные) и мерзлых (штриховые) грунтов при  $\rho_s=2,7$  г/см<sup>3</sup>.



По экспериментальным данным  $\rho_d$  и  $w$ , которые легко определить в полевых условиях, из графика можно найти значения  $n$ , а также  $V_a/V$  и  $w_n$  талых и мерзлых грунтов. Для промерзающих и протаивающих грунтов  $0 \leq w_w < w$  величины  $V_a/V$  и  $w_n$  занимают промежуточное положение между соответствующими величинами талых и мерзлых грунтов.

### Заключение

Содержание газов в промерзающих и протаивающих, мерзлых и талых грунтах, а также их пористость и полная влагоемкость могут быть найдены расчетом по соответствующим формулам, приведенным в работе. Для практических целей для определения этих величин можно воспользоваться графическим построением зависимости относительного содержания газов в грунтах от их влажности и плотности.

### Список литературы

1. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И. Н. Вотяков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 176 с.

2. Кузьмин, Г. П. Анализ зависимости показателей физических свойств грунтов / Г.П. Кузьмин // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 11. – С. 28–29.

3. Пчелинцев, А. М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов / А. М. Пчелинцев. – М.: Наука, 1964. – 260 с.

4. Сергеев, Е. М. Грунтоведение / Е. М. Сергеев, Г. А. Глодковская, Р. С. Зиангиров, В. И. Осипов и др. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 595 с.

### References

1. Votyakov, N.I. 1975. *Physical and Mechanical Properties of Frozen and Thawing Soils in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 176 pp. (in Russian)

2. Kuzmin, G.P. 2010. Analysis of relationships among physical index properties. *J. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo* 11: 28-29. (in Russian)

3. Pchelintsev, A.M. 1964. *Structure and Physical and Mechanical Properties of Frozen Soils*. Moscow: Nauka. 260 pp. (in Russian)

4. Sergeev, E.M., Golodkovskaya, G.A., Ziangiurov, R.S., Osipov, V.I. et al. 1971. *Soil Engineering*. Moscow: Moscow State University Press, 595 pp. (in Russian).

## Static sounding for soil thawed and frozen condition identification

O.N. Isaev

Vtoraya Institutskaya Str. 6, Bldg. 12, Moscow, Russia, 109428,  
e-mail: geotechnika2008@gmail.com,  
Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures – NIIOSP  
(OJSC «Stroitelstvo»)

**Abstract.** Identification and delineation of boundaries between thawed and frozen soils is a major challenge in geotechnical and geocryological survey. The respective conventional methods (test holes boring, soil temperature measurement in thermometric holes) are rather costly and time-consuming. These methods can be optimized by application of static sounding with a standard electric probe (CPT) that can optionally be equipped with a temperature gauge (CPTT). The latter enables extra measurements of in-situ soil temperature and soil resistance to probe penetration that characterize soil condition. But this is not enough for accurate evaluation of soil condition, therefore, soil freezing temperature is often measured, which depends on a number of factors such as lithology, salination, peat content, etc. Neglect of these factors makes this approach rather inaccurate. Field tests showed that static sounding in relaxation-creep mode ("till stabilization" of the probe), even if a standard probe without a temperature gauge is used, enables rather accurate determination of soil condition, based on a two-parametric criterion that accounts for both "creep rate" and "stabilized" soil resistance. The paper presents a diagram, based on numerous comparative studies.

**Keywords:** static sounding; soil condition and identification.

## Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов методом статического зондирования

О. Н. Исаев

НИИОСП им. Н. М. Герсеванова (ОАО «НИЦ "Строительство»)  
Россия, 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 12,  
e-mail: geotechnika2008@gmail.com

**Аннотация.** Определение состояния и нахождение границ между талыми и мерзлыми грунтами является одним из основных вопросов, решаемых при инженерно-геокриологических изысканиях. Традиционные пути его решения (проходка разведочных скважин, измерение температуры грунтов в термометрических скважинах) достаточно дороги и длительны. Они могут быть сокращены за счет использования метода статического зондирования. Для этой цели допустимо применять как стандартный электрический зонд (СРТ), так и зонд, дополнительно оснащенный температурным датчиком (СРТТ). Последний, наряду с сопротивлениями грунта зондированию, позволяет дополнительно определять природную температуру грунта, которая в значительной степени характеризует его состояние. Для точной оценки состояния грунта этого бывает недостаточно - часто необходимо дополнительно знать температуру начала замерзания грунта, которая зависит от целого ряда факторов - литологии, засоленности, заторфованности грунта и т. д. Все это делает данный подход не вполне точным. Проведенные исследования показали, что при использовании статического зондирования в релаксационно-ползучем режиме («со стабилизацией» зонда), даже в условиях применения стандартного зонда (без температурного датчика), можно достаточно точно идентифицировать состояние грунта используя двухпараметрический критерий, основанный на учете «скоростных» и «стабилизированных» сопротивлений грунта под конусом зонда. В докладе приведена соответствующая диаграмма, составленная на основе сравнительных полевых исследований.

**Ключевые слова:** статическое зондирование; состояние и идентификация грунта.

# Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов методом статического зондирования

О. Н. Исаев

## Введение

Определение состояния и нахождение границ между талыми и мерзлыми грунтами является одним из основных вопросов, решаемых в процессе инженерно-геокриологических изысканий.

Традиционно он решается в процессе проходки разведочных инженерно-геологических скважин, отбора монолитов и измерений природной температуры грунта в специально обустроенных термометрических скважинах.

Исследования специалистов НИИпромстрой, МИИТ и НИИОСП, проведенные в 1980-х ... начале 1990-х годов, показали, что определять температуру и состояние грунта можно используя метод статического зондирования. Некоторые результаты этих работ представлены ниже.

## Инженерно-геокриологические условия опытных площадок

Первые сравнительные полевые исследования выполнялись на искусственно замороженных суглинках в г. Уфе. Замораживание выполнялось путем продувки холодного воздуха. В результате температура суглинков, по данным термометрических скважин, понижалась до  $-2,4^{\circ}\text{C}$ .

Основная часть опытных работ проводилась в Северо-Западной зоне распространения пластичномерзлых грунтов (опытные площадки располагались в городах Воркута, Лабитнанги, поселках Рудник, Горняцкий, Воргашор).

Грунты площадок характеризовались наличием делювиальных, прибрежно-морских, верхнеморенных и нижнеморенных суглинков, реже супесей, глин, песков. Содержание гальки и гравия в глинистых грунтах изменялось от 3 до 40 %. Их плотность составляла  $1,9 \dots 2,1 \text{ г/см}^3$ , влажность –  $14 \dots 38\%$ . Температура мерзлых грунтов по глубине изменялась в диапазоне  $-2,1 \dots -0,3^{\circ}\text{C}$ .

Криогенная текстура грунтов различалась в зависимости от глубины залегания и генетического типа. Мерзлые глинистые грунты характеризовались слоистой, сетчатой или массивной текстурой, а также наличием кристаллов льда размером  $1 \dots 10 \text{ мм}$  с содержанием  $5 \dots 10\%$ . Суммарная мощность ледяных прослоек изменялась от 0 до 6 см на метр.

Исследования многолетнемерзлых грунтов методом статического зондирования проводились и в других регионах, в том числе на засоленных грунтах полуострова Ямал (в рамках данной статьи их результаты не рассматриваются).

## Оборудование и методика испытания грунтов статическим зондированием

Испытания грунтов проводились с помощью самоходной установки С-832М, оснащенной зондом II типа (ГОСТ 19912-2001), который включал наконечник из конуса и муфты трения, а также две телескопические штанги. Диаметр конуса и муфты трения составлял  $35,8 \text{ мм}$ , основной штанги –  $34 \text{ мм}$ . Установка позволяла создавать максимальное усилие вдавливания зонда  $130 \text{ кН}$ , максимальное усилие выдергивания –  $112 \text{ кН}$ .

Зонд включал, помимо тензометрических, температурный датчик, расположенный в конусе зонда (рис.1). В рамках международной классификации, по аналогии с СPTU, испытания тензометрическим зондом с дополнительно установленным датчиком температуры, по мнению автора, можно называть как Cone Penetration Test with Temperature Measurement (СРТТ).

Статическое зондирование выполнялось, в основном, путем вдавливания зонда с постоянной скоростью и периодическими остановками  $0,5 \dots 1 \text{ м}$  по глубине, при которых испытание переводилось в релаксационно-ползучий режим («стабилизация» зонда), сопровождаемый вмерзанием зонда в грунт и изменением сопротивлений грунта зондированию во времени. Переход в режим «стабилизации» достигался путем прекращения подачи масла в гидродомкраты вдавливания зонда.

В процессе испытаний сопротивления грунта под конусом зонда  $q_c$  и вдоль муфты трения  $f_s$  фиксировались самописцами. Кривые изменения сопротивлений грунта зондированию (рис. 2), при основном режиме испытаний, имели четыре ярко выраженных фазы, отражающие особенности технологии статического зондирования мерзлого грунта:

«А» – равномерное вдавливание зонда с постоянной скоростью;

«В» – остановка зонда на заданной глубине путем прекращения подачи масла в

гидродомкраты вдавливания, переход системы «зонд-грунт» в релаксационно-ползучий режим испытания, сопровождающийся вмерзанием зонда в грунт;

«С» – додавливание зонда на 0,1 м, до максимальной величины хода штоков гидроцилиндров задавливания;

«D» – разжатие штанги гидрозажимом, поднятие штоков гидроцилиндров и захват штанги на новом уровне.

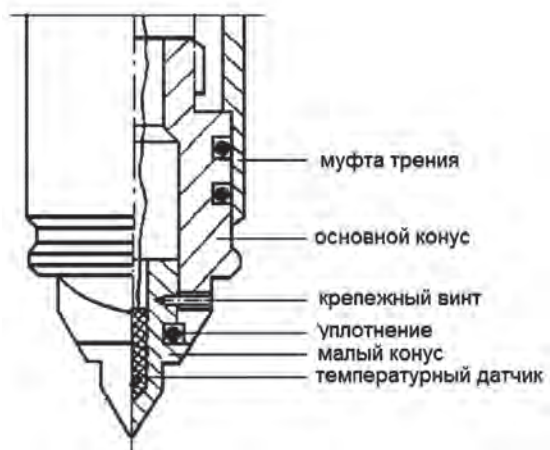


Рис. 1. Тензометрический зонд с температурным датчиком (СРТТ).

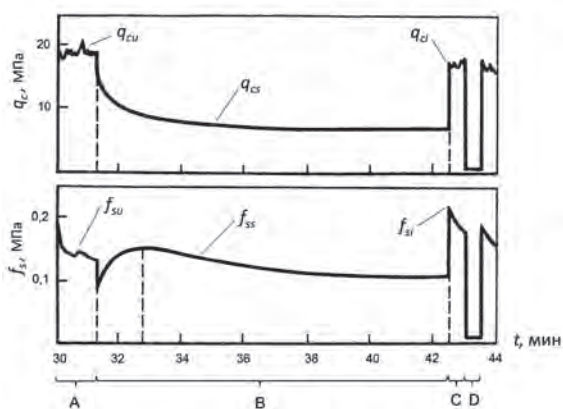


Рис. 2. Изменения сопротивлений грунта под конусом  $q_c$  и вдоль муфты  $f_s$  трения зонда во времени при испытаниях с постоянной скоростью и в релаксационно-ползучем режиме.

В качестве наиболее важных в информационном отношении были выделены три вида сопротивлений грунта зондированию, соответствующие:

- равномерному задавливанию зонда –  $q_{cv}, f_{sv}$  («скоростные» сопротивления);
- испытанию зонда в релаксационно-ползучем режиме –  $q_{cs}, f_{ss}$  («стабилизированные» сопротивления);
- начальному моменту додавлива-

ния зонда после завершения испытания в релаксационно-ползучем режиме и вмерзания зонда в грунт –  $q_{cv}, f_{sv}$  («пиковые» сопротивления).

Температура зонда фиксировалась как в процессе его погружения, так и в релаксационно-ползучем режиме, параллельно с измерением сопротивлений грунта зондированию.

### Идентификация состояния грунта по результатам измерений температуры зонда

#### Измерение температуры зонда в процессе его задавливания

При погружении зонда в талый грунт между грунтом и наконечником происходит фрикционное взаимодействие, сопровождаемое повышением температуры конуса и муфты трения. Степень их разогрева, достигаемая иногда  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пропорциональна прочности грунта, количеству крупнодисперсных частиц и скорости зондирования.

При погружении зонда в мерзлый грунт картина не столь однозначна. На границе системы «зонд - мерзлый грунт» происходит сложное теплофизическое взаимодействие, зависящее от многих геокриологических и технологических факторов. При проведении опытных работ был открыт и в дальнейшем исследован, на первый взгляд аномальный, теплофизический эффект. Он заключался в следующем.

Если в низкотемпературных грунтах, как и в талых, зонд разогревался, хотя и в значительно меньшей степени - обычно менее  $1^{\circ}\text{C}$ . То в пластичномерзлых грунтах (в высокотемпературном диапазоне, примыкающем к температуре фазовых переходов) температура зонда часто несколько понижалась – примерно на  $0,1...0,5^{\circ}\text{C}$ . Данный эффект был назван эффектом «псевдоаномального охлаждения зонда».

В результате теоретических исследований оказалось возможным разработать модель теплофизического взаимодействия системы «зонд – мерзлый грунт», объясняющую указанный эффект. В основу модели легло положение о наличии двух взаимно противоположенных тепловых процессов, происходящих на границе системы «движущийся зонд - мерзлый грунт».

Первый процесс обусловлен потоком поглощаемого зондом тепла, образующегося в результате его трения о грунт. Второй процесс характеризуется потоком отдаваемого зондом тепла, в результате понижения температуры плавления льда при высоких давлениях. В зависимости от соотношения этих потоков



температура зонда может повышаться или понижаться.

Эффект «псевдоаномального охлаждения зонда» всегда свидетельствует о том, что грунт, имеющий отрицательную температуру, находится в мерзлом состоянии. В настоящее время специалистами Фондаментпроект выполняются исследования по более детальному изучению этого эффекта.

#### Измерение температуры зонда в процессе его остановки и испытания в релаксационно-ползучем режиме

Анализ данных изменения температуры остановившегося и испытываемого в релаксационно-ползучем режиме зонда выявил, что в талых и мерзлых грунтах температурные кривые, а также соответствующие им тепловые процессы существенно отличаются.

Эксперименты показали, что в талых грунтах после остановки зонда температурная кривая, в целом, удовлетворительно описывается известной зависимостью решения задачи об охлаждении одномерного тела, погруженного в среду с постоянной начальной температурой. Используя эту зависимость по начальному участку кривой можно определить природную температуру талого грунта.

В мерзлых же грунтах температурные кривые начинали удовлетворительно описываться указанной зависимостью лишь через определенное время после остановки зонда. На основании опытных работ был сделан вывод, что использовать эту зависимость для определения природной температуры грунта достаточно сложно.

Сопоставление температурных кривых зонда и замеров в термометрических скважинах позволили разработать методику определения природной температуры мерзлого грунта, основанную на анализе изменения температуры конуса зонда во времени - вмерзание зонда в грунт допустимо считать завершенным, если скорость изменения температуры зонда снижается до 0,01 °С/мин.

#### Идентификация состояния грунта по результатам измерений сопротивлений грунта зондированию

Как показано выше, зонд, оснащенный температурным датчиком, позволяет определить природную температуру грунта, которая в значительной степени характеризует его состояние.

Но для точной оценки состояния грунта этого часто недостаточно - необходимо до-

полнительно знать температуру начала замерзания грунта, характеризующую его переход из одного агрегатного состояния в другое. Эта температура, в свою очередь, зависит от целого ряда факторов: литологии, засоленности и заторфованности грунта и т.д. Поэтому данный подход не всегда удобен и надежен.

Проведенные исследования показали, что в случае испытаний «со стабилизацией» зонда, даже при отсутствии температурного датчика, можно с достаточной точностью идентифицировать состояние грунта.

В результате полевых исследований было выявлено, что коэффициент стабилизации сопротивления грунта под конусом зонда  $R_{cvs} = q^{cv} / q^{cs}$  в талых и мерзлых грунтах существенно отличается (рис. 3).

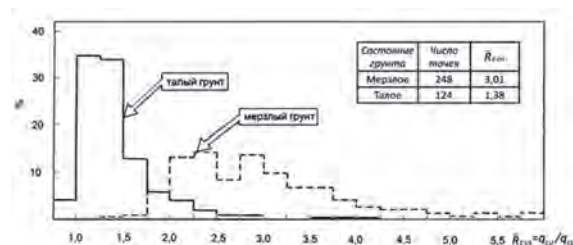


Рис. 3. Гистограмма распределения коэффициента стабилизации сопротивления грунта под конусом зонда  $R_{cvs} = q_{cv} / q_{cs}$  для талого и мерзлого грунтов.

$q_{cv}$  и  $q_{cs}$  - сопротивления грунта под конусом зонда, зафиксированные соответственно при его погружении со скоростью 0,5 м/мин и через 5 мин после начала релаксационно-ползучего режима испытания.

Если в талых грунтах величина коэффициента  $R_{cvs}$  составляла в среднем 1,4, то в мерзлых существенно больше - 3. Однако, этот критерий работает не во всех случаях. Из рис.3 видно, что в интервале  $R_{cvs} = 1,5 \dots 3,0$  гистограммы для талого и мерзлого грунтов накладываются друг на друга создавая зону неопределенности.

В связи с этим был предложен двухпараметрический критерий (рис. 4) оценки состояния грунтов. Более точно разделить грунты по их состоянию оказалось возможным при одновременном использовании коэффициента стабилизации сопротивления грунта под конусом зонда  $R_{cvs}$  и «скоростного» сопротивления  $q_{cv}$ .



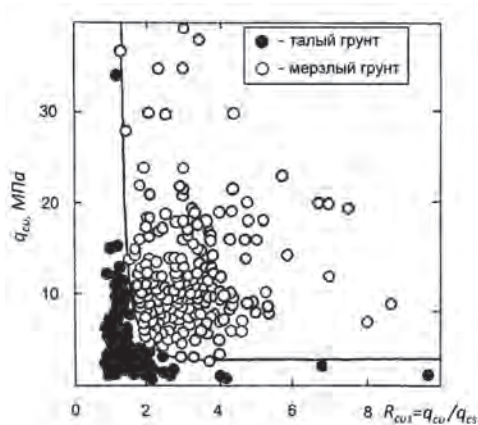


Рис. 4. Диаграмма определения состояния грунта по данным статического зондирования.

Помочь в идентификации состояния грунта могут и другие признаки, основанные на анализе сопротивлений грунта зондированию. Среди них можно выделить, например: резкое возрастание (понижение) «скоростного» сопротивления грунта  $q_{cv}$  при зондировании одного и того же инженерно-геологического элемента; наличие (отсутствие) начального участка возрастания «стабилизированного» сопротивления грунта  $f_{ss}$ , обусловленного процессом интенсивного вмержзания зонда в грунт (см. фазу «В» на рис.2) и т. д.

### Закключение

В условиях вечной мерзлоты идентификация талого или мерзлого состояний грунтов может выполняться методом статического зондирования.

При проведении инженерно-геокриологических изысканий наиболее предпочтительно использовать тензометрический зонд с температурным датчиком, а статическое зондирование выполнять «со стабилизацией» зонда. Такая методика испытаний позволяет по данным зондирования определять природную температуру и состояние грунтов.

Применение тензометрического зонда без температурного датчика, при условии проведения испытаний «со стабилизацией» зонда, также позволяет определять состояние грунта.

Статическое зондирование рекомендуется выполнять в комплексе с традиционными (эталонными) методами инженерно-геокриологических изысканий.

На строительных площадках следует выбирать ключевые участки и выполнять параллельные испытания статическим зондированием и традиционными методами. Результаты сравнительных испытаний должны использоваться для контроля и «тарирования» методов применения данных зондирования.

### Список литературы

1. Волков, Ф. Е. О возможности использования установок С-832М для контроля и оценки изменения температуры вечномёрзлых грунтов / Ф. Е. Волков, О. Н. Исаев // Геокриологический прогноз при строительстве и освоении территорий: тез. докл. Всесоюзн. совещ. – Воркута, 1985. – С. 224–226.
2. ГОСТ 19912-2001. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
3. Минкин, М. А. Методика и методы инженерно-геокриологических изысканий / М. А. Минкин. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса. 2005. – 252 с.
4. Рыжков И. Б. Статическое зондирование грунтов / И. Б. Рыжков, О. Н. Исаев. – М.: Издательство «АСВ», 2010. – 496 с.
5. Isaev, O. N. Progress of the method of static sounding in the investigation of geotechnical properties of frozen soils / O. N. Isaev, V. V. Shvarev, A. V. Konstantinov, C. M. Tichomirov, A. V. Sadovsky // Proc. of the Int. Simp. on Cone Penetration Testing, CPT'95 Linköping, Sweden, October 4-5, 1995, vol. 2, pp. 179-186.
6. Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J., M. Cone penetration testing in geotechnical practice. – London and New York: Spon Press, 2004. – 312 p.

### References

1. Volkov F.E., Isaev O.N. 1985. On the possibility of setting C-832M to monitor and evaluate changes in temperature of the permafrost. Geocryological Forecast for Construction and Development of Territories: Proc. Conf. Vorkuta, 1985. - p. 224-226. (in Russian)
2. GOST 19912-2001. 2001. Soils. Field Test Methods by Static and Dynamic Sounding. (in Russian)
3. Minkin M.A. 2005. Methods and Techniques of Engineering and Permafrost Research. Ukhta: Institute of Management, Information and Businesses. 252 p. (in Russian)
4. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. 2010. Cone Penetration Tests of Soils. Moscow: Publisher ASV. 496 p.
5. Isaev O.N., Shvarev V.V., Konstantinov A.V., Tichomirov C.M., Sadovsky A.V. 1995. Progress of the method of static sounding in the investigation of geotechnical properties of frozen soils. Proc. of the Int. Simp. on Cone Penetration Testing, CPT'95 Linköping, Sweden, October 4-5, 1995, vol. 2, pp. 179-186.
6. Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J. 2004. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. London and New York: Spon Press. 312 p.

## Methods of frozen soil static sounding

O.N. Isaev

Vtoraya Institutskaya Str. 6, Bldg. 12, Moscow, Russia, 109428,  
e-mail: geotechnika2008@gmail.com,  
Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures – NIIOSP  
(OJSC "Stroitelstvo")

**Abstract.** Published Russian and international methods (standard tests, quasi-static tests, relaxation-creep tests, static tests) for static sounding of frozen (permafrost) soils are reviewed. The emphasis is made on standard and quasi-static tests as well as on relaxation-creep mode tests ("till stabilization" of the probe). Field and laboratory test results and the analysis of technological factors influence on frozen soil cone and sleeve friction resistance are given. The technological factors are cone penetration rate, frozen soil test time in relaxation-creep mode. It is shown that the technological factors affect cone penetration resistance along with respective experimental regularities and dependences. It is also shown that permafrost soil tests should be performed with a probe, equipped with a temperature gauge. The probe should be jacked down in soil in the same way as per the standard technique, but with reduced constant rate of penetration, e. g. 0.5 m/min. The probe jacking down process stops at 0.5...1.0 m intervals, and then relaxation-creep mode is applied for the probe freezing into soil and its sounding resistance change versus time determination.

**Keywords:** static sounding; test method; technological factors.

## Методы испытания мерзлых грунтов статическим зондированием

О. Н. Исаев

НИИОСП им. Н.М. Герсеванова (ОАО "НИЦ "Строительство")  
Россия, 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 12,  
e-mail: geotechnika2008@gmail.com

**Аннотация.** Рассматриваются существующие отечественные и зарубежные методы (стандартные испытания, квазистатические испытания, испытания в релаксационно-ползучем режиме, статические испытания) статического зондирования мерзлых (многолетнемерзлых) грунтов. Основное внимание уделено стандартным и квазистатическим испытаниям, а также испытаниям в релаксационно-ползучем режиме («со стабилизацией» зонда). Приводятся результаты и анализ полевых и лабораторных исследований влияния технологических факторов на сопротивления мерзлого грунта под конусом и вдоль муфты трения зонда. В качестве технологических факторов рассматриваются: скорость погружения зонда и время испытания мерзлого грунта в релаксационно-ползучем режиме. Отмечено сильное влияние технологических факторов на сопротивления грунта зондированию, представлены соответствующие закономерности и зависимости, полученные опытным путем. Показано, что в условиях многолетнемерзлых грунтов рекомендуется: использовать зонд, оснащенный температурным датчиком; задавливание зонда осуществлять по стандартной методике с постоянной, но несколько пониженной скоростью, например 0,5 м/мин; в процессе задавливания, с интервалом по глубине 0,5...1,0 м, выполнять периодические остановки зонда и перевод испытаний в релаксационно-ползучий режим, сопровождаемый вмержанием зонда в грунт и изменением сопротивлений грунта зондированию во времени.

**Ключевые слова:** статическое зондирование; метод испытания; технологические факторы.

# Методы испытания мерзлых грунтов статическим зондированием

О. Н. Исаев

## Введение

Мерзлые грунты, в отличие от большинства талых, обладают рядом специфических свойств - их прочность и деформативность сильно зависят от температуры, скорости и длительности приложения нагрузки.

Существующие отечественные (ГОСТ 19912-2001) и зарубежные стандарты («ISSMFE International reference test for CPT» и др.), регламентирующие испытания грунтов статическим зондированием, не в полной мере учитывают эти особенности. В них указано, что испытания, независимо от вида и состояния грунтов, должны выполняться путем задавливания зонда с одной постоянной скоростью - соответственно  $1,0 \pm 0,3$  м/мин и  $1,2 \pm 0,3$  м/мин.

В последние десятилетия предпринимались различные попытки по поиску и разработке оптимальной методики испытания мерзлых грунтов, которая бы учитывала их особые свойства.

Решением этой проблемы за рубежом занимались, в основном, канадские исследователи (в первую очередь Б. Ладани), в нашей стране – специалисты НИИпромстрой, Фундаментпроект, НИИОСП и МИИТ.

В статье рассмотрены некоторые результаты этих работ, приведены имеющиеся подходы и особенности существующих методов испытаний, а также выявленные закономерности и эмпирические зависимости, отражающие влияние технологических факторов на сопротивление мерзлых грунтов зондированию.

## Методы испытания мерзлых грунтов статическим зондированием

К методам испытаний мерзлых грунтов статическим зондированием, которые на сегодня в той или иной степени опробованы и исследованы, можно отнести: *стандартные испытания, квазистатические испытания, испытания в релаксационно-ползучем режиме, статические испытания.*

*Стандартные испытания* - испытания, при которых погружение зонда в грунт осуществляется с одной постоянной скоростью. Используются в отечественных и зарубежных нормах для всех видов грунтов. Наиболее просты и технологичны. Требуют мало времени – только на задавливание и извлечение зонда, а также стыковку и расстыковку секций штанг.

Отечественный и зарубежный опыт зондирования показал, что при скоростях около

1 м/мин, из-за высокой прочности мерзлых грунтов, возрастает опасность деформаций и повреждений наконечника и штанги зонда, усложняется процесс контроля и поддержания постоянной скорости задавливания. Поэтому в условиях мерзлоты лучше использовать пониженную скорость зондирования, например, 0,5 м/мин.

*Квазистатические испытания* – испытания зонда осуществляются при постоянных, хорошо контролируемых, малых (значительно ниже стандартной) скоростях, при этом на одной глубине выполняется серия испытаний с ступенчато-возрастающими (ступенчато-убывающими) скоростями. В условиях мерзлоты данный тип испытаний впервые был опробован в 1970-х годах канадским исследователем Б. Ладани. В нашей стране он изучался специалистами Фундаментпроект, НИИОСП и МИИТ.

Данные испытания более длительны, чем стандартные, требуют специального оборудования, позволяющего выполнять и измерять очень малые по величине скорости вдавливания зонда.

*Испытания в релаксационно-ползучем режиме (зондирование «со стабилизацией»)*. После прекращения подачи масла в гидроцилиндры вдавливания погружение зонда быстро замедляется и система «зонд – мерзлый грунт» переходит в релаксационно-ползучий режим, часто называемый «стабилизацией». Для этой цели вдавливающее устройство часто имеет специальный демпфер.

В условиях искусственно замороженных, а затем и многолетнемерзлых грунтов впервые применены в начале 1980-х годов специалистами НИИпромстрой. В дальнейшем исследовались специалистами институтов МИИТ, НИИОСП и Фундаментпроект. Эти испытания, хотя и требуют большего времени, чем стандартные, достаточно технологичны и информативны. При их выполнении статическое зондирование не теряет свое главное преимущество – не перестает быть экспресс-методом.

*Статические испытания* – испытания, при которых зонд испытывается ступенчато-возрастающей статической нагрузкой, при этом на каждой ступени нагрузка постоянна. Впервые применены в условиях мерзлоты

канадским исследователем Б.Ладани в 1970-х годах. Наиболее длительны и, как следствие, наименее технологичны.

Если стандартные испытания обязательны и должны выполняться во всех случаях, то применение трех последних может быть обусловлено лишь желаниями и предпочтениями изыскателей (реже требованиями проектировщиков), выполняющих работы на конкретном объекте. Эти испытания фактически могут рассматриваться как дополнительные к основному стандартному испытанию. Их главным достоинством является возможность определения по результатам испытаний предельно длительных сопротивлений мерзлых грунтов зондированию.

Ниже рассмотрены вопросы влияния технологических факторов на сопротивление мерзлых грунтов зондированию для трех наиболее исследованных методов испытаний - стандартных, квазистатических и испытаний в релаксационно-ползучем режиме.

### Стандартные и квазистатические испытания мерзлых грунтов статическим зондированием

*Влияние скорости погружения зонд на сопротивление мерзлого грунта под конусом зонда*

Скорость погружения зонда  $v$  оказывает большое влияние на сопротивление грунта под конусом зонда  $q_{cv}$ . Канадским исследователем Б. Ладани было выявлено, что график зависимости сопротивления  $q_{cv}$  от скорости  $v$  хорошо описывается законом степенного вида (зависимость линеаризировалась в координатах « $\ln q_{cv} \sim \ln v$ »):

$$q_{cv} = q_{cv}^0 (v/v^0)^{1/n}, \quad (1)$$

где  $q_{cv}^0$  и  $v^0$  – координаты некоторой точки на графике;

$n$  – показатель ползучести.

При  $v^0 = 1$  формула (1) имеет более простой вид:

$$q_{cv} = q_{cl}^0 (v)^{1/n}, \quad (2)$$

где  $q_{cl}^0$  – сопротивление грунта под конусом зонда при  $v^0 = 1$ .

По Б.Ладани график зависимости « $\ln q_{cv} \sim \ln v$ » имеет точку перегиба – в формуле (1) при скоростях меньше  $v = 0,025$  см/мин показатель ползучести  $n = 3 \dots 10$  (для пластичномерзлых и сильнольдистых грунтов  $n = 3 \dots 4$ , твердомерзлых  $n = 5 \dots 6$ ), при больших скоростях  $n = 10 \dots 20$ .

Проведенные в быв. СССР и России эксперименты хотя и подтвердили возможность использования степенной формулы (1), однако выявили ряд положений, не согласующихся с зарубежными исследованиями.

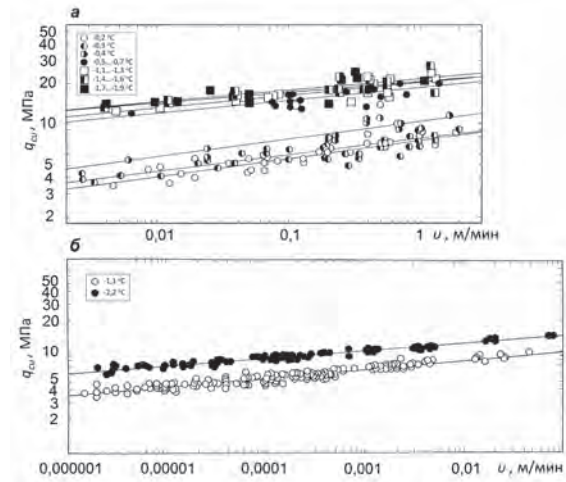


Рис. 1. Зависимость сопротивления  $q_{cv}$  мерзлого грунта от скорости зондирования  $v$ :

а – полевые испытания многолетнемерзлых глинистых грунтов, б – лабораторные испытания искусственно замороженного суглинка в морозильной камере.

Достаточно детально вопрос влияния скорости  $v$  на сопротивление  $q_{cv}$  был изучен при проведении совместных исследований НИИОСП и МИИТ. Полевые (рис. 1, а) и лабораторные (рис. 1, б) испытания многолетнемерзлых и искусственно замороженных глинистых грунтов, проведенные при  $v = 10^{-6} \dots 2$  м/мин показали, что точка перегиба на графике « $\ln q_{cv} \sim \ln v$ » отсутствует, то есть зависимость (2) описывается единым показателем  $n$ , определяемым из испытаний.

Статистический анализ данных показал, что параметр  $q_{cl}^0 = 7 \dots 24$  МПа существенно зависит от температуры грунта  $\theta_s$ . В тоже время показатель ползучести  $n = 8 \dots 11$ , то есть изменяется в сравнительно узком диапазоне и слабо зависит от температуры грунта  $\theta_s$ . Лабораторные испытания мерзлого суглинка при температурах  $-1,1$  и  $-2,2$  °С дали фактически равный показатель ползучести  $n = 11$ .

Эти результаты имели большое практическое значение. Они косвенно подтвердили правомерность использования сопротивлений  $q_{cv}$ , полученных при сравнительно больших скоростях  $v = 0,1 \dots 1$  м/мин (что очень важно для обеспечения технологичности испытаний) для оценки предельно длительных значений характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов.



Влияние скорости погружения зонда на сопротивление мерзлого грунта вдоль муфты трения

Скорость погружения зонда  $v$  неоднозначно влияет на сопротивление грунта вдоль муфты трения  $f_{sv}$ . В диапазоне скоростей  $v = 10\text{-}3\text{...}2$  м/мин для мерзлых грунтов можно отметить следующие закономерности.

При сравнительно высокой температуре мерзлого грунта  $\theta_s = -0,4\text{...}-0,2$  °С с увеличением скорости сопротивление вдоль муфты трения  $f_{sv}$  сначала повышается, а затем в конце диапазона незначительно снижается. Для более низких температур грунта  $\theta_s = -1,9\text{...}-0,5$  °С зависимость имеет несколько иной характер – с увеличением скорости сопротивление  $f_{sv}$  уменьшается.

Такой неоднозначный характер влияния скорости объясняется сложными механическими и теплофизическими процессами, происходящими на контакте мерзлого грунта с муфтой трения.

### Испытания мерзлых грунтов в релаксационно-ползучем режиме («стабилизация» зонда)

Изменение сопротивления мерзлого грунта под конусом во времени

Кривую изменения сопротивления мерзлого грунта под конусом зонда  $q_{cs}$  во времени  $t_s$  (см. фаза «В», рис. 2 [2]) можно условно разделить на два участка:

- первый участок – сопротивление  $q_{cs}$  практически мгновенно (в течение 1-2 с) падает на 20...40 %; эта стадия характеризует в основном упругие свойства системы «зонд – мерзлый грунт»;
- второй участок – сопротивление  $q_{cs}$  в течение 1...2 мин интенсивно уменьшается на 30...40 %, после чего плавно переходит в пологую кривую линию; на этом участке наиболее ярко проявляются реологические свойства мерзлого грунта.

График зависимости сопротивления  $q_{cs}$  от длительности «стабилизации»  $t_s$  хорошо описывается формулами (3) и (4). Об этом свидетельствует линеаризация графиков в координатах « $1/q_{cs} \sim \ln(t_s + t^*)$ » (см. рис. 2,а) и « $\ln q_{cs} \sim \ln(t_s + t^*)$ » (см. рис. 2,б).

$$q_{cs} = \beta \{[\ln(t_s + t^*)/T]^{-1}, \quad (3)$$

$$q_{cs} = [(t_s + t^*)/T]^\alpha, \quad (4)$$

где  $\alpha, \beta, T, T^\wedge$  – параметры, определяемые по графикам « $q_{cs} \sim t_s$ »;  
 $t^*$  – произвольно малое значение времени (например,  $t^* = 0,01$  мин).

В общем случае на величины параметров

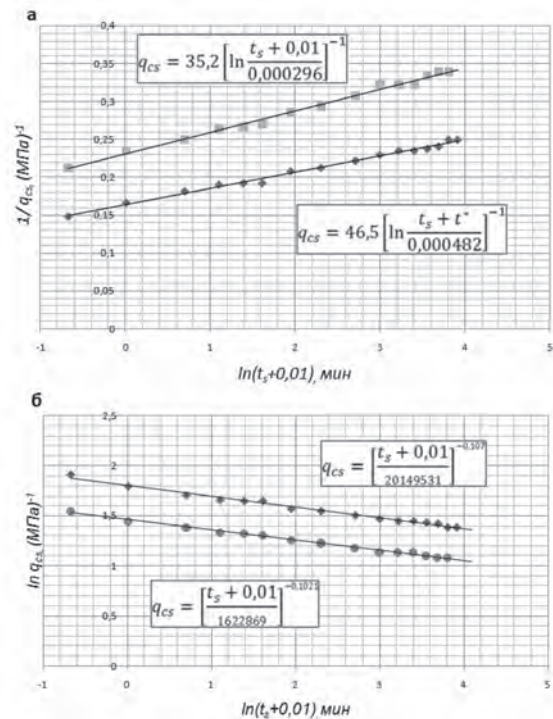


Рис. 2. Спрямоление кривых зависимости сопротивления  $q_{cs}$  от времени  $t_s$  (пластичномерзлые суглинки,  $\theta_s = -0,6\text{...}-0,4$  °С) с использованием различных формул:

а – формула (3), б – формула (4).

$\alpha, \beta, T, T^\wedge$  влияет целый ряд геокриологических факторов. Опытными исследованиями было установлено (см. рис. 3), что для высокотемпературных пластичномерзлых глинистых грунтов параметр  $T$  достаточно слабо зависит от температуры грунта  $\theta_s$ , в то время как параметр  $\beta$  – существенно.

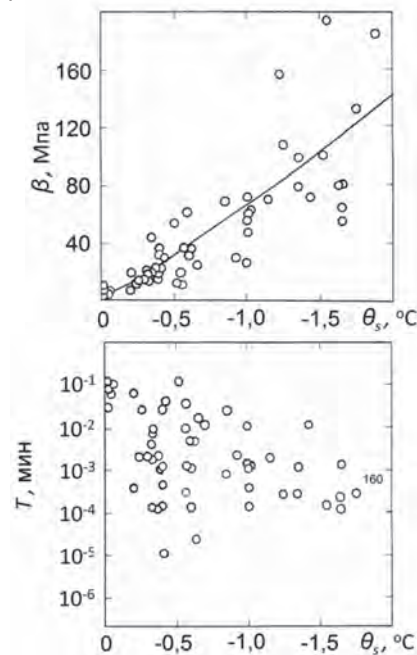


Рис. 3. Зависимость параметров  $\beta$  и  $T$  в формуле (3) от температуры грунта  $\theta_s$ .



### *Изменение сопротивления мерзлого грунта вдоль муфты трения во времени*

Кривые изменения сопротивления мерзлого грунта вдоль муфты трения  $f_{ss}$  во времени  $t_s$  имеют более сложный характер, чем кривые  $q_{cs}$ . Тем не менее, в целом, можно выделить три участка (см. фаза «В», рис. 2 [2]):

- первый участок – сопротивление  $f_{ss}$  практически мгновенно (в течение 1-2 сек) заметно падает; эта стадия характеризует преимущественно упругие свойства системы «зонд - мерзлый грунт»;
- второй участок – сопротивление  $f_{ss}$  в течение 0,5...5 мин увеличивается – происходит процесс интенсивного вмерзания зонда в грунт;
- третий участок – сопротивление  $f_{ss}$  начинает плавно уменьшаться и выполаживаться (аналогично снижению сопротивления мерзлого грунта под конусом зонда) – начинают преобладать реологические свойства грунта, при одновременном продолжении восстановления температуры зонда и его вмерзания в грунт.

### *«Пиковые» сопротивления мерзлого грунта под конусом и вдоль муфты трения при додавливании зонда (после завершения его вмерзания)*

Особенность «пиковых» сопротивлений мерзлого грунта под конусом  $q_{ci}$  и вдоль муфты трения  $f_{si}$  зонда, фиксируемых в начальный момент его додавливания (см. фаза «С», рис. 2 [2]), состоит в том, что они отражают работу уже вмерзшего в грунт зонда.

Проведенные исследования показали, что «скоростное» сопротивление под конусом зонда  $q_{cv}$ , зафиксированное перед началом «стабилизации», примерно равно «пиковому» значению  $q_{ci}$ . Это является показателем того, что тепловое и напряженно-деформированное состояние грунта, соответствующее этим сопротивлениям, одинаково. При дальнейшем додавливании зонда сопротивление грунта под конусом зонда меняется, как правило, слабо – в соответствии с составом и состоянием залегающего ниже грунта.

Для сопротивления мерзлого грунта вдоль муфты трения картина иная. В начальный момент додавливания сопротивление мерзлого грунта вдоль муфты трения быстро достигает своего максимума - «пикового» значения  $f_{sr}$ , при котором происходит срыв вмерзшей в грунт муфты трения. При этом «скоростное» сопротивление  $f_{sv}$ , зафиксированное перед началом «стабилизации», существенно меньше соответствующего «пикового» значения  $f_{sr}$ . При дальнейшем

додавливании сопротивление грунта вдоль муфты трения, как правило, начинает плавно уменьшаться, что обусловлено появляющимся тонким слоем-смазкой из воды и оттаявшего грунта на контакте муфты трения с окружающим мерзлым грунтом.

Поскольку вмерзание зонда при «стабилизации» происходит достаточно интенсивно, уже примерно через 10 мин «пиковые» сопротивления мерзлого грунта вдоль муфты трения составляют около 80...90% от своих максимальных значений, соответствующих полному вмерзанию зонда в грунт.

### **Заключение**

Существующие отечественные и зарубежные стандарты, регламентирующие испытания статическим зондированием, не в полной мере учитывают особенности мерзлых грунтов.

Сопротивления мерзлых грунтов зондированию, в отличие от талых, в значительно большей степени зависят от технологических факторов. В условиях многолетнемерзлых грунтов наиболее оптимальным является следующий режим испытания.

Зонд задавливается по *стандартной методике* с постоянной пониженной скоростью 0,5 м/мин. С интервалом по глубине 0,5...1,0 м выполняются периодические остановки зонда и перевод испытаний в *релаксационно-ползучий режим*, сопровождаемый вмерзанием зонда в грунт и изменением сопротивлений грунта зондированию во времени.

Наконечник зонда должен быть оснащен температурным датчиком. Данные измерений температуры зонда, фиксируемые при его остановке и испытании в режиме «стабилизации», следует использовать для определения природной температуры грунта.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 19912-2001. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
2. Исаев, О. Н. Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов методом статического зондирования / О. Н. Исаев // Материалы IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Мирный (Россия), 3-7 сентября 2011.
3. Минкин, М. А. Методика и методы инженерно-геокриологических изысканий / М. А. Минкин. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса. 2005. – 252 с.
4. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов / И. Б. Рыжков, О. Н.

Исаев. – М. : Издательство «ACB», 2010. – 496 с.

5. International reference test for cone penetration test (CPT): Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16, with Reference to Test Procedures, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Information, ISSMFE, 1989. № 7. – P. 6-16.

6. Isaev, O. N. Progress of the method of static sounding in the investigation of geotechnical properties of frozen soils / O. N. Isaev, V. V. Shvarev, A. V. Konstantinov, C. M. Tichomirov, A. V. Sadovsky // Proc. of the Int. Simp. on Cone Penetration Testing, CPT'95 Linköping, Sweden, October 4-5, 1995. – Vol. 2. – P. 179–186.

7. Ladanyi, B. Determination of geotechnical parameters of frozen soils by means of the cone penetration test / B. Ladanyi // Proc. of the Second European Symposium on Penetration Testing.- Amsterdam, 1982. – Vol. 1. – P. 671–678.

8. Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J., Cone penetration testing in geotechnical practice /

T. Lunne, P. K. Robertson. and J.J. M. Powell. – London and New York : Spon Press, 2004. – 312 p.

9. Sylvie Buteau, Richard Fortier, and Michel Allard. Rate-controlled cone penetration tests in permafrost // Can. Geotech. J. – 2005. – № 42. – P. 184–197.

#### References

1. GOST 19912-2001. 2001. *Soils. Field test methods by static and dynamic sounding.* (in Russian)

2. Isaev O.N. 2001. Identification of the thawed and frozen states of soils by CPT. *Proceedings of the*

*IX International Symposium on Permafrost Engineering.* Mirny (Russia), September 3-7, 2011. (this Volume).

3. Minkin M.A. *Methods and techniques of engineering and permafrost research.* - Ukhta: Institute of management, information and businesses, 2005. – 252 p. (in Russian)

4. Ryzhkov I.B., Isaev O.N. 2010. *Cone penetration tests of soils.* Moscow: Publisher ASV, 2010.- 496 p.

5. ISSMFE, 1989. International reference test for cone penetration test (CPT): *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16,* with Reference to Test Procedures, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Information, 7, pp. 6-16.

6. Isaev O.N., Shvarev V.V., Konstantinov A.V., Tichomirov C.M., Sadovsky A.V. Progress of the method of static sounding in the investigation of geotechnical properties of frozen soils *Proc. of the Int. Simp. on Cone Penetration Testing, CPT'95 Linköping, Sweden, October 4-5, 1995, vol. 2,* pp. 179-186.

7. Ladanyi B. 1982. Determination of geotechnical parameters of frozen soils by means of the cone penetration test. *Proc. of the Second European Symposium on Penetration Testing.* Amsterdam, vol.1, pp. 671-678.

8. Lunne T., Robertson P.K. and Powell J.J. 2004. *Cone penetration testing in geotechnical practice.* London and New York: Spon Press, 312 p.

9. Buteau S., Fortier R. and Allard M. 2005. Rate-controlled cone penetration tests in permafrost. *Can. Geotech. J.* 42: 184–197.

## Method for determining frost heave of soils

G.P. Kuzmin, V.N. Panin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail:kuzmin@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Predicting frost heave of soils is a difficult task, mainly because of the need to determine the amount of ice segregation. The existing equations give very rough predictions, as they require a large number of moisture content and temperature parameters. The instrumental method requires the installation of benchmarks, relative to which vertical displacement of heave plates are measured. This paper presents a new method for estimating frost susceptibility of soils as part of geotechnical investigation programs for linear structures, where instrumental measurements would require a considerable number of benchmarks. The method is based on the change in soil porosity upon heaving both under closed- and open-system conditions and involves measurements of the thickness of the soil layer under consideration and its density before the winter and after freezeback. The results obtained with the proposed method are compared with the measured extents of frost heave.

**Keywords:** frost heave; soil density; freezing layer; open and closed systems; heave prediction.

## Метод определения пучения грунта

Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Прогноз морозного пучения грунтов является весьма сложной задачей, главным образом из-за необходимости определения льдонакопления в грунте за счет миграции воды. Для расчетного определения морозного пучения требуются многочисленные показатели влажности и температуры грунта. Поэтому существующие расчетные формулы пучения грунта носят весьма приближенный характер. Для инструментального метода определения пучения грунта необходимо оборудование реперов, относительно которых измеряются вертикальные перемещения марок. В связи с этим для оценки пучинистости грунтов при проведении инженерно-геологических изысканий на трассах линейных сооружений, где для инструментального определения требуется большое количество реперов, предлагается новый метод, который основан на изменении плотности грунта при пучении в условиях как закрытой, так и открытой системы. Для этого нужно измерить толщину исследуемого слоя грунта и его плотность в предзимний период и после промерзания. Выполнено сравнение результатов определения пучения предлагаемым методом с измеренными величинами пучения.

**Ключевые слова:** морозное пучение; плотность грунта; промерзающий слой; открытая и закрытая системы; расчет пучения.

# Метод определения пучения грунта

Г. П. Кузьмин, В. Н. Панин

## Введение

Морозное пучение промерзающих грунтов является распространенным процессом как в области многолетнемерзлых грунтов, так и в районах сезонного промерзания. Вследствие неравномерного поднятия промерзающего грунта пучение оказывает существенное воздействие на линейные сооружения и здания с малонагруженными фундаментами. В связи с этим определение деформационных характеристик пучения промерзающих грунтов имеет важное практическое значение.

Прогнозная оценка пучинистости грунтов является весьма сложной задачей, главным образом из-за необходимости определения льдонакопления за счет внешних источников воды.

Для расчетного определения морозного пучения грунта нужны трудно определяемые многочисленные влажностные и температурные показатели грунта [1,2]. Поэтому существующие расчетные формулы носят весьма приближенный характер.

Полевые методы определения пучения грунта требуют оборудования марок и реперов, относительно которых измеряются вертикальные перемещения марок.

В связи с этим для оценки пучинистости грунтов при проведении инженерно-геологических изысканий на трассах линейных сооружений, где требуется оборудование большого количества реперов, предлагается новый метод.

## Метод расчета

Метод основан на изменении плотности грунта при промерзании в результате его объемных приращений. При этом он позволяет определять пучение грунта в условиях как закрытой системы, так и открытой.

Величина деформации пучения поверхности слоя грунта равна разности

$$h_{\text{пн}} = \xi_f - \xi_{\text{тн}} \quad (1)$$

где  $\xi_{\text{тн}}$  и  $\xi_f$  – толщина слоя грунта до промерзания и после промерзания, которые можно представить в виде

$$\xi_{\text{тн}} = \frac{V_{\text{тн}}}{S}; \quad \xi_f = \frac{V_f}{S}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{тн}}$  и  $V_f$  – объем слоя грунта с произвольной площадью  $S$  до промерзания и после промерзания.

Объемы грунта в формуле (2) можно записать как

$$V_{\text{тн}} = \frac{m_d}{\rho_{d,\text{тн}}}; \quad V_f = \frac{m_d}{\rho_{d,f}}, \quad (3)$$

где  $m_d$  – масса сухого грунта;  $\rho_{d,\text{тн}}$  и  $\rho_{d,f}$  – плотность сухого грунта в талом и мерзлом состояниях.

Тогда с учетом выражений (3) зависимости (2) принимают следующий вид:

$$\xi_{\text{тн}} = \frac{m_d}{\rho_{d,\text{тн}} S}; \quad \xi_f = \frac{m_d}{\rho_{d,f} S}. \quad (4)$$

Подставив зависимости (4) в (1) и учитывая, что  $m_d / S = \rho_{d,\text{тн}} \xi_{\text{тн}}$ , найдем расчетную формулу пучения грунта

$$h_{\text{пн}} = \xi_{\text{тн}} \left( \frac{\rho_{d,\text{тн}}}{\rho_{d,f}} - 1 \right). \quad (5)$$

Расчет пучения многослойного грунта производится по формуле

$$h_{\text{пн}} = \sum_{i=1}^n \xi_{\text{тн},i} \left( \frac{\rho_{d,\text{тн},i}}{\rho_{d,f,i}} - 1 \right). \quad (6)$$

Для определения пучения грунта по формулам (5) и (6) нужно измерить толщину исследуемого талого слоя и определить плотность грунта в этом слое в предзимний период и после его промерзания.

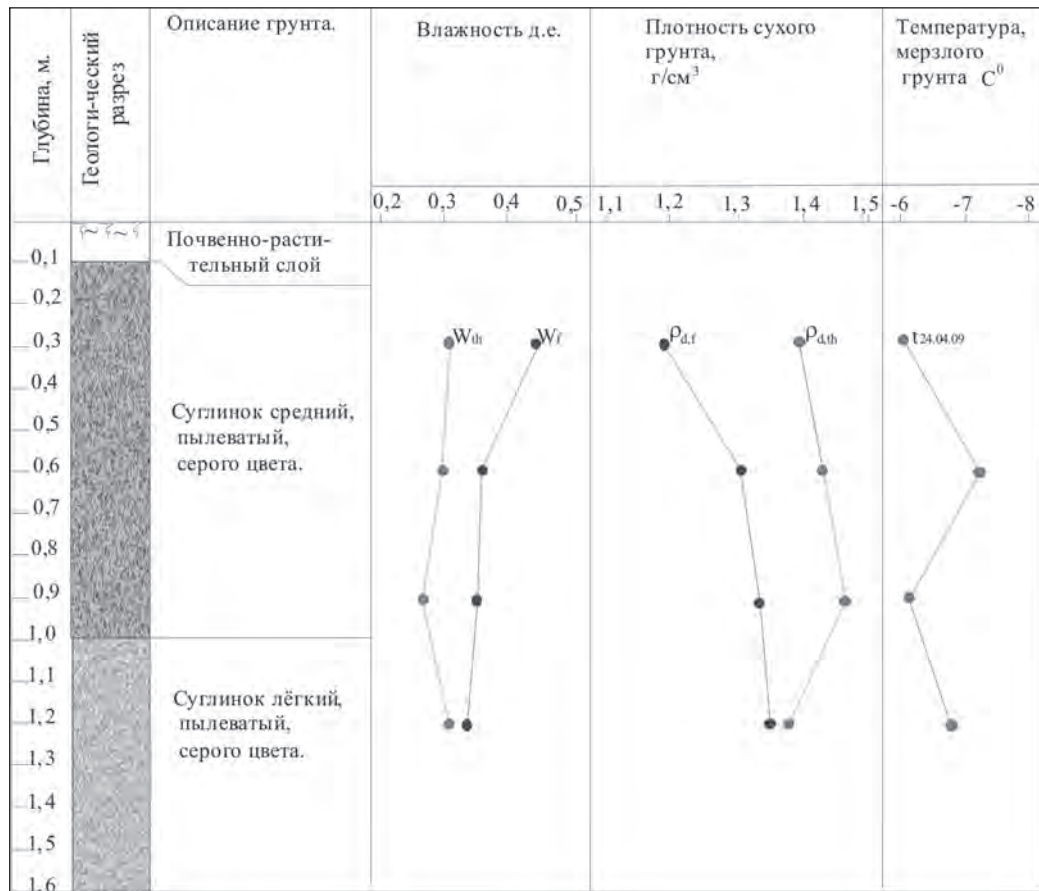
## Сравнение расчетных и измеренных данных

Выполнено сравнение результатов определения пучения предлагаемым методом с инструментально измеренными величинами пучения на стационаре «Туймаада» (ИМЗ СО РАН). Характеристика грунтов на площадке приведена в табл. 1. Данные в интервалах глубин 0-0,3 и 1,2-1,65 м отсутствуют. Распределение плотности грунта по глубине показывает, что учет пучения слоя в интервале 1,2-1,65 м не окажет большого влияния на расчетные значения пучения верхних слоев.

Пробы грунта для определения влажности и плотности грунта отбирались из кернов с глубин расположения марок. Вертикальные перемещения марок относительно репера измерялись с помощью нивелира.

За расчетные величины плотности грунта принимались средние значения их в интервале глубин расположения марок из табл. 1. Толщина всех слоев, пучение которых определяется расчетным путем, равна 0,3 м.

Таблица 1. Разрез и распределение влажности, плотности и температуры грунта по глубине до промерзания и после промерзания сезоннопротаивающего слоя



В табл. 2 представлены результаты расчетов и измерений пучения сезоннопротаивающего слоя.

Таблица 2. Сравнение расчетных и измеренных значений пучения

Интервал глубин, м	$\bar{\rho}_{d,th}, \text{г/см}^3$	$\bar{\rho}_{d,f}, \text{г/см}^3$	$h_{fn,t}$	$h_{fn,t}, \text{см}$	
				расчетное	измеренное
0,3 - 0,6	1,41	1,25	3,84	8,79	7,4
0,6 - 0,9	1,46	1,33	2,94	4,95	4,3
0,9 - 1,2	1,44	1,35	2,01	2,01	3,2



Некоторое расхождение расчетных и измеренных значений морозного пучения грунта может быть обусловлено следующим:

– при расчетном определении пучения из-за отсутствия данных не учтено, хотя и небольшое, приращение последнего нижнего слоя;

– скважины для отбора проб располагаются на некотором расстоянии друг от друга и вследствие этого характеристики грунтов и величина пучения в этих точках могут различаться.

Однако погрешность расчетного определения пучения верхних слоев грунта не выходит за пределы 15-18%.

### **Заключение**

Результаты сравнения расчетных и измеренных значений пучения грунта позволяют рекомендовать разработанный метод при про-

ведении инженерно-геологических изысканий на трассах линейных сооружений.

### **Список литературы**

1. Орлов, В. О. Морозное пучение грунтов в расчетах оснований сооружений / В. О. Орлов, Б. Б. Ёлгин., И. И. Железняк. – Новосибирск: Наука, 1987. – 136 с.

2. Основы геокриологии. Ч.5. Инженерная геокриология. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 526 с.

### **References**

1. Orlov, V.O., Elgin, B.B., and Zhelznyak, I.I. 1987. *Frost Heaving of Soils in Bed Analysis for Structures*. Novosibirsk: Nauka, 136 pp. (in Russian)

2. Ershov, E.D. (ed.). 1999. *Fundamentals of Geocryology, Vol. 5, Permafrost Engineering*. Moscow: Moscow State University Press, 526 pp. (in Russian).

## **Frost-heave development and its form's manifestation (Yakutsk)**

A.A. Urban<sup>1</sup>, I.V. Dorofeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: ankaurban@mail.ru

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: doronveeviv@mail.ru

**Abstract.** Representative manifestation of frost heaving within the city of Yakutsk is examined. Lithology and temperature regime of permafrost and its active layer at frost heaving sites are characterized.

**Keywords:** frost heave processes; frost mounds; permafrost.

## **Развитие процессов морозного пучения и формы его проявления на примере г. Якутска**

А. А. Урбан<sup>1</sup>, И. В. Дорофеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: ankaurban@mail.ru

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: doronveeviv@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены представительные проявления морозного пучения грунта на территории г. Якутска. Охарактеризован литологический состав и температурный режим многолетнемерзлых и сезоннопротаивающих пород на участках современного развития этого процесса.

**Ключевые слова:** процессы морозного пучения; бугры пучения; многолетнемерзлые породы.

## Развитие процессов морозного пучения и формы его проявления на примере г. Якутска

А. А. Урбан, И. В. Дорофеев

### Введение

Якутск – столица Республики Саха (Якутия), порт на реке Лена и крупнейший в мире населенный пункт на многолетнемерзлом грунте.

Положение г. Якутска в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых горных пород, резкие колебаниями температуры воздуха в течение суток, многочисленные остаточные и вторичные водоемы с болотистыми берегами, определяют широкое развитие морозного пучения грунта на его территории. Этот процесс является весьма динамичным, и местами здесь величина относительного пучения грунта в год достигает 15–20 см [1].

Формы проявления процесса морозного пучения на территории города Якутска весьма разнообразны. В благоприятных условиях (высокая влажность, возможность постоянного подтока влаги к фронту насыщения, низкая температура на поверхности и др.) пучение грунта приводит к поднятию дневной поверхности на широкой площади. В других местах наблюдается локальное развитие бугристых образований на дорожном покрытии и выпучивание неглубоко заложенных столбов заборов и свай. Иногда фиксируются деформации некоторых инженерных сооружений, линейных коммуникаций и отдельных зданий.

Многолетние измерения величины относительного пучения промерзающего грунта проводились на территории Якутской центральной тепловой электростанции (ЯТЭЦ) [2]. Они показали, что следствием этого процесса здесь стали различного рода деформации сооружения. К ним относятся трещины стен, частичные разрушения оголовков колонн, сколы с оголением арматуры и прогибы рандбалок.

Проведенные в 2009 г. комплексные исследования по программе геокриологического мониторинга позволили выявить на территории г. Якутска отдельные участки, отличающиеся весьма активным развитием многих криогенных процессов и в том числе процесса морозного пучения промерзающего грунта.

### Описание площадок

Одна из площадок с активным проявлением морозного пучения грунта занята зданиями спортивного комплекса Дворец спорта «50 лет Победы».

Эта площадка находится на поверхности I надпойменной террасы р. Лена. Основанием зданий Дворца спорта «50 лет Победы» служит толща верхнечетвертичных и современных озерно-аллювиальных отложений. Грунты представлены мелко- и среднезернистыми песками, местами засоленными, и включают в себя линзы слабо торфянистых супесей. Встречаются также пачки суглинков с прослойками растительных остатков и льда. В целом рассматриваемая толща повсеместно перекрывается культурным горизонтом. Он имеет переменную мощность и слогаается из бытовых и техногенных (органических и неорганических) наносов (рис. 1).

Многолетнемерзлые породы в разрезах площадки венчаются сезоннопротаивающим слоем.

Гидрогенный талик значительной (более 30 м) мощности находится под дном озера Талого, примыкающего к площадке с запада.

Трубообразные техногенные талики существуют вдоль канализационных коллекторов, проходящих под газонами и асфальтовыми покрытиями. Формирование этих таликов связано с многолетним тепловым воздействием коммуникаций на окружающие массивы грунтов, а также с аварийными утечками фекальных вод.

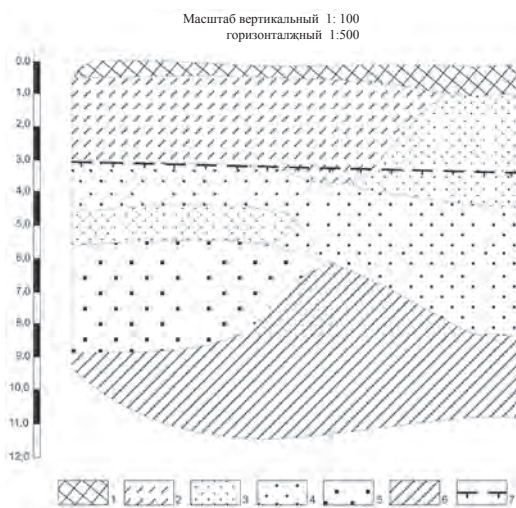


Рис. 1. Литологический профиль площадки Дворца спорта «50 лет Победы». Условные обозначения: 1 – грунт культурного горизонта; 2 – супесь; 3 – песок пылеватый; 4 – песок мелкозернистый; 5 – песок среднезернистый; 6 – суглинок; 7 – верхняя граница ММП.

Дворец спорта «50 лет Победы» введен в постоянную эксплуатацию в 1995 году. За пять первых лет эксплуатации температура грунтов основания фундаментов понизилась в среднем (с учетом разницы сезонных сроков измерения) на 1–2° С, т.е. почти в 1,5 раза по сравнению с началом эксплуатации этого здания.

В ходе измерений температуры грунта в проветриваемом подполье Дворца спорта было отмечено редко встречаемое в городских условиях площадное пучение поверхности (рис 2). Участок его проявления располагается в северной части здания [3].



Рис 2. Проявление площадного пучения в проветриваемом подполье Дворца спорта «50 лет Победы» (фото И.В. Дорофеева).

Вспученный участок поверхности представляет собой пологий бугор диаметром 25–30 м при относительной высоте 1,2–1,6 м. В наивысшей точке вершина бугра практически касается перекрытия пола 1-го этажа. Бетонная отмостка у подножья вокруг бугра раздроблена, что благоприятствует свободному попаданию воды в подстилающий грунт. Участок подполья оборудован охлаждающими установками в виде труб. Отдельные трубы деформированы из-за интенсивного выпучивания грунта (рис. 3).

Одной из основных причин развития здесь процесса выпучивания являются постоянные (через перекрытия) утечки воды из инженерных систем объекта.

Техногенный бугор пучения нарушает тепловой режим проветриваемого подполья. Это в значительной мере влияет на температурное состояние грунтов основания фундамента Дворца спорта «50 лет Победы».

Другое характерное для территории г. Якутска проявление рассматриваемого процесса выражается в образовании малых форм морозного пучения в виде отдельных бугорков и кочек, которые местами осложняют

поверхность дорожного полотна и мощеных тротуаров (рис. 4, 5).



Рис 3. Морозное выпучивание трубы СОУ в подполье Дворца спорта «50 лет Победы» (фото И. В. Дорофеева).



Рис. 4. Деформация тротуара в результате морозного пучения грунта в районе улицы Ярославского (фото И.В. Дорофеева).



Рис. 5. Деформация дорожного полотна в результате морозного пучения грунта в районе ул. Ярославского (фото И.В. Дорофеева).

Приведенные снимки тротуара и дорожного полотна по улице Ярославского позволяют судить о вызванных морозным пучением деформациях грунта, который в этой части г. Якутска в 2009 г. был вскрыт при проходке буровой скв. 13.

Площадка буровой скв. 13 расположена на I надпойменной террасе р. Лены, и разрез этой выработки в верхней части представлен



насыпным грунтом. Он состоит из песка, гальки и щебня с антропогенным слоем, льдом и песчаными отложениями. Антропогенный или культурный слой, представлен песком разномерным, торфянистым суглинком, древесными отходами и органикой различного происхождения с включением металлических предметов, осколков стекла и др.

В интервале глубины 1,4–1,7 м данного разреза сохранился материал погребенной деревянной мостовой, представленный слоями вертикально ориентированных листовых чурок (рис. 6).

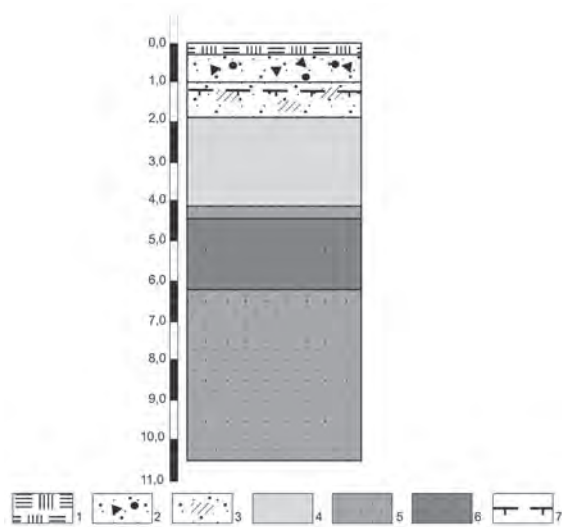


Рис. 6. Схематический разрез буровой Скв.13, пройденной в районе ул. Ярославского. Условные обозначения: 1 – почвенно-растительный слой; 2 – насыпной песок с галькой и щебень; 3 – антропогенные отложения (культурный слой); 4 – лед; 5 – серый песок; 6 – песок коричневый; 7 – верхняя граница многолетнемерзлых пород.

В октябре 1951 г. температура грунта этой площадки на глубине 6 м составляла  $-2^{\circ}$  [4]. Позже здесь произошло заметное охлаждение грунта. Так, 27 октября 2009 г., по данным буровой скв. 13, температура грунта на той же глубине оказалась  $-4,6^{\circ}$  С [5].

Процесс морозного выпучивания отдельных листовых чурок на этой площадке сопровождается образованием над ними небольшой высоты (0,20–0,25 м) грунтовых бугорков с диаметром около 0,5 м, расположенных по тротуару на участке протяженностью 15 м.

Вдоль улицы Ярославского можно наблюдать и другое проявление того же процесса, выраженное в образовании гряды пучения. Подобная гряда наказана на снимке (см. рис. 5).

При длине 2,5 м и ширине 1,5 м она имеет относительную высоту 0,3–0,4 м. Развитие ее приводит к разрыву асфальтового слоя, что осложняет движение автомобилей и пешеходов, способствует преждевременному износу и разрушению дорожного покрытия.

Образование по дорогам старой части г. Якутска малых форм морозного пучения можно наблюдать не только в районе ул. Ярославского. Вероятно, их появление здесь обусловлено особенностями состава культурного слоя и его локальным насыщением льдом в обстановке затрудненного дренажа и неоднократных утечек вод из жилых зданий на этой территории.

### Заключение

Морозное пучение грунтов – причина многих проблем, связанных с оценкой состояния фундаментов различных сооружений, деформирования трубопроводов, разрушения покрытий дорог и обеспечения устойчивости инженерных объектов.

Возвратно-поступательный характер формирования деятельного слоя влияет на динамику проявления процессов морозного пучения. Эти процессы развиваются в грунтах как сезоннопротаивающего, так и сезоннопромерзающего слоев. Однако в сезоннопромерзающем слое они протекают менее активно и, вероятно, в иные календарные сроки.

В условиях урбанизированной территории при застройке, перепланировке улиц и неправильной эксплуатации инженерных объектов, допущение утечек бытовых и техногенных вод сопровождается изменением влажности и температурного режима грунтов. Это в свою очередь может способствовать развитию морозного пучения грунтов.

### Список литературы

1. Алексеева, О. И. Природные и техногенные проблемы г. Якутска / О. И. Алексеева, В. Т. Балобаев, М. Н. Григорьев, В. Н. Макаров, Р. В. Чжан, М. М. Шац, В. В. Шепелев // Наука и образование. – 2006. – № 4. – С. 94–98.
2. Заболотник, С. И. Осадка и выпучивание фундамента Якутской ТЭЦ в процессе 35–50-летней ее эксплуатации / С. И. Заболотник, Н. И. Новиков // Обеспечение надежности, долговечности зданий и сооружений в холодных регионах: материалы научно-практической конференции (к 40-летию ЯкутПНИИС) 15–16 августа 2002 г. Якутск, Изд-во, 2002. – С. 51–55.
3. Дорофеев, И. В. Современное состояние температуры грунтов основания фундаментов Дворца спорта «50 лет Победы». – Заключение. – Фонды ИМЗ СО РАН, Якутск, 2010. – 29 с.
4. Граве, Н. А. Кадастр разведочных вы-



работок на территории г. Якутска, пройденных ранее 1965 г. / Н. А. Граве, В. В. Куницкий, П. А. Соловьев и др. – Фонды ИМЗ СО РАН. – Якутск, 2003. – Т. II. – 265 с.

5. Куницкий, В. В. Организация и проведение геокриологического мониторинга на территории города Якутска (промежуточный отчет о результатах научно-исследовательских работ по Государственному контракту № 758) / В. В. Куницкий, Я. И. Торговкин, О. И. Алексеева и др. – Фонды ИМЗ СО РАН. – Якутск, 2009. – 202 с.

#### References

1. Alekseeva O.I., Balobaev V.T., Grigoriev M.N. Makarob V.N., Zhan R.V. Shaz M.M., Shepelev V.V. 2006. Natural and technogenic problems of Yakutsk. Science and education. #4, pp. 94–98. (in Russian)

2. Zabolotnik S.I., Novikov N.I. 2002. Settlement and swelling of Yakutian HES basement during 35–50 years exploitation. *Support of building's reliability and durability in cold regions: Materials of scientific conference, 15–16 August 2002, Yakutsk.* 51–55 pp.

3. Dorofeev I.V. 2010. Modern state of soil temperature of Sport Hall basement. Conclusion. Funds of Permafrost Institute, Yakutsk, 29 pp.

4. Grave N.A., Kunitsky V.V., Soloviev P.A. and other 2003. Cadaster of boreholes in Yakutsk, drilled before 1965. II. Funds of Permafrost, Yakutsk. 265 pp.

5. Kunitsky V.V., Torgovkin Ya.I., Alekseeva O.I. and other. 2009. Organization and conducting of geocryological monitoring in Yakutsk. Funds of Permafrost Institute. 202 pp.

## **Dangerous cryogenic processes in settlements of the Central Transbaikalia**

A.G. Verhoturov

Chita State university, 672039, Chita, Aleksandro-Zavodskaya street, 30, weral0606@yandex.ru

**Abstract.** In settlements of Central Transbaikalia negative manifestations of dangerous cryogenic processes frequently are marked. Seasonal swelling, frost cracing support of power line, highways most intensively influence buildings on the tape bases. In cavities, where are available hightice permfrost soils, there are deformations of engineering buildings as a result of development thermokarst. There are the degradataion of frozen soils by reason change the thermodynamic mode of grounds at building a common warming of a climate. The effect of icings on engineering buildings reduces in corrupting building materials and constructions. On declines of northern exposure on a surface of permfrost grounds the cases of slumping of massifs of grounds are fixed. The registration of possible negative manifestations of dangerous cryogenic processes will allow to reduct a cost on reconditionings and under abnormal condition - refurbishment work.

**Keywords:** cryogenic processes; thermokarst; icing; swelling; frost cracing; deformations.

## **Опасные криогенные процессы в населенных пунктах Центрального Забайкалья**

А. Г. Верхотуров

Читинский государственный университет  
Россия 677039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, д.30, ЧитГУ, e-mail: weral0606@yandex.ru

**Аннотация.** В населенных пунктах Центрального Забайкалья часто отмечаются негативные проявления опасных криогенных процессов. Сезонное пучение, морозное трещинообразование наиболее интенсивно влияют на здания на ленточные фундаменты, опоры ЛЭП, автомобильные дороги. Во впадинах, где имеются высокольдистые многолетнемерзлые породы, происходят деформации инженерных сооружений в результате развития термокарста. Деградацию мерзлых пород вызывают изменения термодинамического режима грунтов при застройке общее потепление климата. Воздействие наледей на инженерные сооружения приводит к разрушению строительных материалов и конструкций. На склонах северной экспозиции по поверхности многолетнемерзлых грунтов фиксируются случаи оползания массивов грунтов. Учет возможных негативных проявлений опасных криогенных процессов позволит снизить издержки на ремонты и аварийно-восстановительные работы.

**Ключевые слова:** криогенные процессы; термокарст, наледи; пучение; морозное трещинообразование; деформации.

# Опасные криогенные процессы в населенных пунктах Центрального Забайкалья

А. Г. Верхотуров

## Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) в Центральном Забайкалье характеризуются островным, прерывистым и сплошным распространением. Особенности развития региона в плейстоцене и голоцене предопределили состав и особенности условий залегания рыхлых отложений во впадинах и хребтах, их криогенное строение на участках распространения ММП и набор криогенных процессов. Наиболее опасными они являются для населенных пунктов, расположенных в пределах межгорных впадин забайкальского типа. К таким процессам относятся: термокарст, пучение, морозное трещинообразование и наледеобразование. Проектировщики и строители неоднократно предпринимали попытки снизить негативные последствия, возникающие из-за активизации криогенных процессов при освоении центрального Забайкалья. Разработаны территориальные строительные нормы [1], но ошибки в проектировании, неправильная эксплуатация зданий и сооружений, климатические изменения в последние десятилетия, приводят к деградации криолитозоны, активизации процессов термокарста и некоторому снижению активности других криогенных процессов.

## Методы исследований

Характеристика опасных криогенных процессов в Центральном Забайкалье рассмотрена в работах В.П. Портновой (1976), В.О. Орлова и др. (1987), П.И. Сальникова (1996), Д.И. Шестернева (2005) и др. Результаты инженерно-геологических исследований выполненных в последние годы на территории г. Чита и в других населенных пунктах Центрального Забайкалья показали, что происходит существенная трансформация мерзлотно-гидрогеологических условий и связанных с ними процессов. Для оценки современной опасности криогенных процессов на территории Забайкалья нами был использован сравнительный анализ материалов изысканий ОАО «ЗабайкалТИЗИС», ЗАОр НП «Читагражданпроект», других организаций и собственные наблюдения за деформациями зданий и сооружений в течение длительного периода.

## Геокриологические условия

Центральная часть Забайкальского края включает две геокриологические области, выделяемые по морфоструктурным принципам [2]: Селенгино-Витимскую и Нерча-Олекминскую, которые географически расположены между 52° и 55° с.ш. и характеризуются следующими метеорологическими параметрами (табл. 1).

Таблица 1. Метеорологические параметры Забайкальского геокриологического региона

Геокриологические области	Средняя годовая температура воздуха, °С	Годовая амплитуда температуры, °С	Осадки, мм/год	Средняя высота снежного покрова, см
Селенгино-Витимский	-0,6 - -6,4	39-59	324-800	15-24 (до 70-50)
Нерча-Олекминский	-0,9 - -6,9	42-54	245-400	до 20-30

Исследуемая территория характеризуется большой неоднородностью физико-географических, геологических и мерзлотно-гидрогеологических условий.

В межгорных впадинах, где располагается большая часть населенных пунктов, условия теплообмена зависят, прежде всего, от их гипсометрического положения. Это, в свою очередь, определяет распространение многолетнемерзлых пород и их мощности. Так в центральной части Читино-Ингодинской впадины на отметках 650-700 м ММП имеют преимущественно островной характер распространения, а в Беклемишевской впадине с отметками 900 м и более, расположенной в 40 км севернее, ММП характеризуются сплошным распространением, за исключением сквозных таликов под крупными озерами.

В южной части Центрального Забайкалья, в городе Чита, температурный режим мерзлых пород на глубине нулевых годовых амплитуд колеблется от 0 до -1°С, а на талых участках составляет +1 ÷ +2°С [2]. Низкие средние годовые температуры грунтов наблюдаются на заболоченных участках первой надпойменной террасы и поймы правого берега реки Чита, а

также в падах, прорезающих высокие террасы, где мощности мерзлых пород, приуроченных к делювиальным образованиям глинистого состава, достигают 30-60 м. Глубина сезонного промерзания грунтов составляет: для песков, гравийно-галечниковых и дресвяно-щебенистых грунтов, 5,0-5,5 м, супесей, суглинков, пылеватых песков до 3,5 м.

Для северной, слабо освоенной части Центрального Забайкалья средние годовые температуры мерзлых пород достигают  $-3 \div -5$  °С. а их мощности изменяются от 100 до 500 м.

#### **Характеристика криогенных процессов**

В ходе исследований установлено, что в результате сезонного пучения грунтов наиболее существенные деформации, вплоть до аварийного состояния, испытывают кирпичные и деревянные здания на ленточных фундаментах с глубиной заложения от 0,4-0,5 м до 1,5 м, возведенные без учета пучинистых свойств грунтов. В ряде случаев деформации также отмечаются у зданий, построенных на свайных фундаментах. На стенах кирпичных зданий образуются преимущественно вертикально ориентированные трещины шириной от первых миллиметров до 0,01-0,2 м. Деревянные сооружения в ходе деформаций испытывают перекося конструкции. Повторяясь практически ежегодно, деформации пучения приводят здания в течение нескольких лет в аварийное состояние. Определяющую роль в развитии процессов пучения играет массивное распучивание, характерное для супесчано-песчаных грунтов в 100%, для делювиально-пролювиальных и делювиально-солифлюкционных супесчано-суглинистых отложений отложений в 50% случаев. В старичных отложениях преобладает миграционное льдовыделение [4].

Особенно сказывается сезонное пучение на линейных сооружениях, которые изменяют естественные условия на поверхности, создают благоприятные предпосылки для проявления пучинистых свойств грунтов. В зимний период на участках автомобильных дорог, где в основаниях залегают глинистые грунты, формируются пучины высотой до 0,2-0,4 м. С целью предупреждения разрушения дорожного покрытия между населенными пунктами Центрального Забайкалья весной прекращается эксплуатация большегрузных автомобилей.

Пучины на железных дорогах имеют высоту 0,010-0,02 м, но на отдельных участках их величина превышает 0,04-0,05 м и более, например, на участке 6277-6278

км Забайкальской железной дороги. Все это обуславливает необходимость регулярного, не менее 2 раз в год, инструментального обследования железных и автомобильных дорог. Основная причина интенсивного проявления пучинистых свойств грунтов в основаниях линейных сооружений, как правило, неудовлетворительное состояние водоотводящих сооружений.

Деформации пучения испытывают также опоры трубопровода газораздаточной станции базы хранения сжиженных газов в г. Чита, опоры распределительных устройств (ОРУ) ТЭЦ-1. Высота выпучивания опор изменяется от 0,02 до 0,3 м.

Морозобойное трещинообразование отмечается практически повсеместно и приводит к деформациям дорожного покрытия. Даже на абсолютно новом покрытии процесс развивается очень быстро. Вначале зимы, в ноябре-феврале возникают небольшие трещины шириной от нескольких миллиметров до 1-3 см. Летом на участках трещин образуются выбоины, зимой происходит расширение трещин, и дорога в очень короткий срок приходит в аварийное состояние.

В пределах частных владений, на пашнях и лугах, находящихся на высоких поймах, в пределах предгорных делювиально-солифлюкционных шлейфов ширина морозобойных трещин достигает 10-20 см, глубина 0,5-1,5 м. Трещины могут вызвать серьезные деформации фундаментов зданий и сооружений.

Процессы термокарста связаны с нарушением термодинамического равновесия многолетнемерзлых пород. В южной части Центрального Забайкалья многолетнемерзлые породы, имеющие отрицательные температуры близкие к 0°С, быстро деградируют в результате хозяйственной деятельности человека или в результате повышения средних годовых температур воздуха. Последние в южной части рассматриваемой территории вплотную приблизились к положительным значениям и в 2002, 2004, 2008 гг. они были выше 0°С.

Высокая льдистость нижнемеловых алевролитов, залегающих в основаниях 3 и 4 надпойменных террас р. Чита обуславливает (при их оттаивании) значительные осадки грунтов в основаниях сооружений и как следствие их деформации.

В г. Чита в разных микрорайонах большое количество жилых домов построено по принципу I (с сохранением мерзлых грунтов), на-пример по ул. Ползунова. Конструктивной особенностью этой группы пятиэтажных домов являлось наличие свайных фундаментов

и проветриваемых подполий, обеспечивающих сохранение мерзлого состояния грунтов основания. Ростверк выполнен монолитным железобетонным сечением 0.6'0.5 м под наружными стенами и 0.4'0.5 м под внутренними. Для фундаментов использовались железобетонные буродобивные сваи марки С-10-30 (три здания) и С-8-30. Дома сданы в эксплуатацию в середине семидесятых годов прошлого века [3]. Грунты на участке до начала строительства и эксплуатации находились в многолетнемерзлом состоянии и характеризовались массивной и сетчатой криогенными текстурами. Коэффициенты оттаивания (А) и сжимаемости элювиальных суглинков массивной криогенной текстуры

составляли 0.017 и  $0.033 \frac{1}{\text{МПа}}$ . Кровля

многолетнемерзлых пород находилась на глубине 3...4 м, а подошва на глубине 8...16 м. Температура ММП составляла в среднем минус 0,6 °С, подземные воды отсутствовали. Впервые деформации жилых домов отмечены в конце 80-х годов. Инженерно-геологические изыскания, проводимые ЗабайкалГИСИЗом и другими организациями, показали, что образование трещин в стенах зданий являлось следствием деградации мерзлых грунтов под зданием.

Неравномерное увлажнение оснований, приуроченное к выпускам систем и снижение прочностных и деформационных свойств грунтов основания, привело к срыву отдельных свай - частичной потере их несущей способности. Срыв свай в грунтах подобного вида происходит уже при нагрузках 650 Кн. Значения несущей способности свай в оттаявших элювиальных суглинках, имевших тонкосетчатую (влажность - 0.260 д. ед) или массивную (влажность - 0.150 д. ед) криогенные текстуры, снижаются в 1.3 раза [3]. Все эти процессы привели к необходимости аварийно-восстановительных работ и усиления фундаментов всех зданий, а на 26 доме пришлось выполнять аварийную разборку центральной части здания (рис. 1).

В микрорайоне КСК г. Чита, участок застройки, приуроченный к поверхности озерно-аллювиальной равнины, характеризуется деформациями пятиэтажных жилых домов № 15, 18, 19, 21 по ул. Весенней. Здания имеют ленточные фундаменты, основанием для них служили мерзлые глинистые грунты. На стенах домов фиксируются трещины, расхождение на отдельных участках осадочных швов, отрыв асфальтовой отмостки от цоколя здания.



Рис. 1. Аварийная разборка части здания на ул. Ползунова в г. Чите.

Всего по г. Чите из 626 обследованных в 1992 г. зданий [3], построенных на ММП, испытывали деформации - 551 здание, нуждались в проведение восстановительных работ - 327 зданий, в аварийном состоянии находилось - 105. Результаты повторного обследования зданий, выполненного в 2010 г., показывают, что при некотором относительном снижении интенсивности деформирования, обусловленного деградацией мерзлых пород на ранее застроенных территориях, аналогичные проблемы возникают на участках новой застройки в пос. Каштак и др.

Значительные деформации зданий, обусловленные процессами термокарста отмечены в поселке городского типа Чернышевск расположенном в пределах поймы и первой надпойменной террасы р. Алеур Деформации испытывают до 80 % зданий, в том числе и 5-и этажные дома, построенные на свайных фундаментах. Проявляются они в виде трещин на стенах шириной до 1-2 см.

Подобные деформации испытывают здания в г. Могоча, где на низких 2-4-метровых надпойменных террасах рек Амазар и Могоча основанием ленточных и свайных фундаментов малоэтажной деревянной застройки являются иловатые глинистые грунты, которые практически повсеместно с глубины 1-2 м находятся в мерзлом состоянии. Центральные части деревянных зданий по отношению к краевым просели на 0,4-0,5 м. Деформациям подвержено до 80% построек в старой части города на пологой (3-10°) поверхности делювиально-солифлюкционного шлейфа. Основанием ленточных фундаментов здесь являются глинистые грунты с содержанием дресвы и щебня, которые с глубины 2-3 м находятся в мерзлом состоянии.

Наледи в условиях изучаемого региона характеризуются небольшими размерами, но они создают серьезные трудности в движении автотранспорта, перекрывая полотно автодо-



рог, затоплявая водопропускные сооружения и тоннели. Отмечены также случаи угрозы наледей жилым зданиям. Например, на уже упоминавшейся ул. Ползунова, с момента ввода здания эксплуатируются по принципу II из-за постоянных утечек воды из систем водоснабжения и канализации. Зимой в местах утечек в подвалах и между домами образовывались техногенные наледы мощностью 0,2-0,6 м (рис. 2).



Рис. 2. Разрушение кирпичной кладки техногенной наледью.

Наледи активизируют процессы криогенного выветривания. На контактах с ними происходит разрушение кирпичных стен цокольного этажа, которое составляет до 30 % их толщины, из-за нарушения защитного слоя ростверков и свай наблюдается оголение арматуры [5].

Природно-техногенные наледы формируются в результате изменения геокриологической и гидрогеологической обстановки в результате строительства или эксплуатации инженерных сооружений. Многолетнее функционирование гидрозолотоотвала в г. Чита (район ТЭЦ-Аэропорт) вызвало существенное расширение таликовой зоны, повлияло на режим подземных вод, привело к образованию вблизи взлетно-посадочной полосы родников, формирующих в зимний период наледы, которые также подтапливают окраину пос. Кадала.

Образование наледей вдоль автодорог осложняет их эксплуатацию. Как правило, такие участки требуют ежегодного проведения ремонтных работ. Очень часто, применяемые противоналедные мероприятия не в полной мере учитывают сложность мерзлотно-гидрогеологических условий. Стремление к снижению затрат приводит к их неэффективной работе. Например, катастрофическое развитие наледи у с. Смоленка (рис. 3) вызвало необходимость строительства нового моста, но при проектировании высота мостовых пролетов оказалась явно меньше требуемой (рис. 4).



Рис. 3. Катастрофическое развитие наледи на участке моста у с. Смоленка (апрель 2009 г.).



Рис. 4. Наледь на участке нового моста через р. Смоленка (апрель 2010 г.).

Даже в относительно маловодный 2010 г. здесь пришлось применять дополнительные мероприятия по защите моста. Расходы на противоналедную защиту многократно возрастут в годы с высокой влагообеспеченностью.

В г. Чита доказали свою эффективность при борьбе с наледями закрытые трубчатые подземные горизонтальные дренажи в виде перфорированных труб с гравийной засыпкой (по типу обратного фильтра), обеспечивающие отвод наледееобразующих вод за пределы участка и последующей разгрузкой на рельеф. Для предотвращения промерзания труб на участках транзита они утеплены или заложены ниже глубины сезонного промерзания и оборудованы смотровыми колодцами. Подобная система длительное время эксплуатируется на 4-м километре дороги Чита - Смоленка и на ул. Ковыльной в районе 10-го гаражного кооператива.

На участках склонов северной экспозиции, в результате деградации многолетнемерзлых пород происходит активизация

оползневых процессов. Наиболее опасными являются оползни скольжения, возникающие в результате перемещения под действием силы тяжести блоков сезонноталого слоя по поверхности мерзлоты без разжижения пород. Их основной деформирующийся горизонт приурочен к зоне контакта мерзлых и оттаявших пород, резко отличающихся прочностными характеристиками. В случае высокой льдистости мерзлых пород сопротивление на сдвиг очень мало из-за большой влажности и низкого коэффициента трения талого грунта по поверхности мерзлых пород. Причиной оползания, обычно, является нарушение работы водоотводящих сооружений. Снятие растительного покрова в ходе строительства и последующее оттаивание грунтов, формирование термокарстовых западин с нагорной стороны склона на 5 км объездной трассы у п. Песчанка привело к тому, что поверхность грунта опустилась на 0,6 м ниже оголовка водопропускной трубы [6]. Соответственно весь сток поверхностных и надмерзлотных вод начал фильтроваться через основание земляного полотна. В результате деградации многолетнемерзлых пород, через 20 лет после начала эксплуатации дороги, их кровля под насыпью опустилась на 3,0-8,0 м. Мощность слоя сезонного промерзания-оттаивания в настоящее время достигает 4,0 м. В зоне теплового влияния автодороги сформировалась мерзлота несливающегося типа. Талые грунты в основании земляного полотна представлены суглинками легкими пылеватыми, суглинками тяжелыми песчанистыми с редкими и маломощными прослоями торфа и песками средней крупности. Формирование ослабленной зоны, после вытаивания шпиров льда в кровле мерзлых пород, привело к оползанию отдельных блоков вниз по склону, образованию концентрических трещин отрыва шириной до 0,3 м, протяженностью до 150 м и, как следствие, к деформации дорожного полотна. Результаты многолетних наблюдений свидетельствуют о том, что оползание вниз по склону автомобильной дороги за период ее эксплуатации составило около 3 м. Ежегодные восстановительные ремонты привели к тому, что мощность асфальта на отдельных участках превышает 1 м.

Наряду с процессами деградации многолетнемерзлых пород, в основаниях неотопливаемых зданий (склады и др.) и объектов, длительное время не вводимых в эксплуатацию, в

г. Чита происходит формирование многолетнемерзлых пород, а и иногда деформирование инженерных сооружений (база УМИАТ и др.). В данном случае срабатывает эффект солнцезащитного навеса, который позволяет сохранять мерзлые породы в основаниях инженерных сооружений, или обеспечивать их формирование даже при средних годовых температурах воздуха близких к 0°С.

### **Заключение**

По результатам обследования инженерных сооружений на рассматриваемой территории все населенные пункты можно разделить на следующие группы, в которых:

1. Криогенные процессы ежегодно оказывают воздействие на инженерные сооружения, вызывая деформации и разрушения.

2. Криогенные процессы эпизодически оказывают воздействие на инженерные сооружения, испытывающие деформации.

3. Криогенные процессы отсутствуют, но возможно развитие и воздействие на инженерные сооружения при их неправильной эксплуатации или в результате циклических колебаний климата.

4. Криогенные процессы отсутствуют и их возникновение не возможно.

Основными причинами неудовлетворительного состояния инженерных объектов в Центральном Забайкалье в результате воздействия криогенных объектов являются:

1) Некачественное проведение инженерно-геологических изысканий.

2) Недоучет сложных инженерно-геологических условий при проектировании.

3) Невыполнение технологических требований и некачественное производство строительных работ.

Опускание кровли многолетнемерзлых пород, повышение их температуры, изменение уровней грунтовых вод и т.д. на застроенных территориях в результате современных изменений климата усугубляет названные причины [7].

Своевременный учет возможных негативных проявлений опасных криогенных процессов на территории г. Чита и в других населенных пунктов центрального Забайкалья на этапе проектирования позволит снизить издержки на ремонты и аварийно-восстановительные работы в период эксплуатации инженерных сооружений.

### Список литературы

1. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. ТСН 50-305-2004 Читинской области. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2004. – 28 с.
2. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э. Д. Ершова. - М. : Недра, 1989. - 359 с.
3. Сальников, П. И. Устойчивость фундаментов зданий на мерзлых грунтах в Южном Забайкалье / П.И. Сальников. – Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 1996. – 208 с.
4. Шестернев, Д. М. Криогенные процессы Забайкалья / Д. М. Шестернев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 262 с.
5. Верхотуров, А. Г. Воздействие наледей на горные породы и инженерные сооружения / А. Г. Верхотуров // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы VII Международного симпозиума, 21-23 ноября 2007 г., г. Чита, Россия. – Якутск, 2007. – С. 3336.
6. Верхотуров, А. Г. Оползневые процессы на автомобильных дорогах Забайкалья / А. Г. Верхотуров, Д. В. Манзырев // Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии: труды Международной научной конференции, МГУ, 25-26 мая 2010 г. – М. : Изд-во МГУ, 2010. – С. 185-186.
7. Верхотуров, А. Г. Влияние динамики мерзлотно-гидрогеологических условий Забайкалья на развитие опасных природных процессов / А. Г. Верхотуров // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 23-24 марта 2010 г.– М. : РУДН, 2010. – Вып. 12. – 492 с.

### References

1. TSN 50-305-2004. 2004. *Foundations in Permafrost. Territorial Building Code for the Chita Province*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 28 pp. (in Russian)
2. Ershov, E.D. (ed.). 1989. *Geocryology of the USSR. Mountainous Countries in the Southern USSR*. Moscow: Nedra, 359 pp. (in Russian)
3. Salnikov, P.I. 1996. *Stability of Foundations on Frozen Ground, Southern Trans-Baikalia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 208 pp. (in Russian)
4. Shestrennev, D.M. 2005. *Cryogenic Processes in Trans-Baikalia*. Novosibirsk: SB RAS Press, 262 pp. (in Russian)
5. Verkhoturov, A.G. 2007. The effect of icings on soils and engineering structures. In: D.M. Shesternnev, R.V. Zhang, A.B. Ptitsyn (eds.). *Permafrost Engineering, Proceedings of the Seventh International Symposium, 21-23 November 2007, Chita, Russia: 33-36*. (in Russian)
6. Verkhoturov, A.G., Manzyrev, D.V. 2010. Landsliding on roads in Trans-Baikalia. In: *Proceedings of International Science Conference, Current Issues of Engineering Geology and Environmental Geology, 25-26 May 2010, Moscow, Russia: 185-186*. Moscow: Moscow State University Press. (in Russian)
7. Verkhoturov, A.G. 2010. The effect of dynamics of permafrost and hydrogeological conditions in Trans-Baikalia on the development of natural hazards. *Sergeev Readings, Proceedings of the Annual Session of the RAS Scientific Council on Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology, Moscow, 23-24 March 2010*. Moscow: RUDN, vol. 12, 492 pp. (in Russian).

## Phase transitions and longevity of frozen ground

A.A. Kononov

Institute of North Development Problems SB RAS  
P.O. Box 2774, Tyumen, Russia 625003, e-mail: konov7@rambler.ru

**Abstract.** The dependence of supercooling parameters of a freezing moist soil on its properties and cooling temperature is discussed (using as the example). It has been shown that there is an approximate correlation between the supercooling temperature and the temperature at the interface between the solid-frozen and the plastic state, and between the supercooling period and the longevity in the frozen state. A formula for calculating the longevity by the supercooling parameters has been obtained.

**Keywords:** frozen soil; supercooling temperature; supercooling period; longevity; long-term strength; crystallization.

## Фазовые переходы и долговечность мерзлого грунта

А. А. Коновалов

Институт проблем освоения Севера СО РАН, Россия, 625003, Тюмень, а/я 2774,  
e-mail konov7@rambler.ru

**Аннотация.** Обсуждается зависимость параметров переохлаждения влажного грунта от его свойств и температуры охлаждения. Показано примерное соответствие температур переохлаждения температуре на границе твердомерзлого и пластичного состояния, а продолжительности переохлаждения – долговечности в мерзлом состоянии. Получена формула для расчета долговечности мерзлого грунта по параметрам переохлаждения.

**Ключевые слова:** мерзлый грунт; температура переохлаждения; продолжительность переохлаждения; долговечность; длительная прочность; кристаллизация.



# Фазовые переходы и долговечность мерзлого грунта

А. А. Коновалов

## Переохлаждение (скрытая стадия кристаллизации)

Цель работы: показать и количественно оценить связь параметров, характеризующих фазовые превращения грунтовой влаги с прочностью и долговечностью мерзлого грунта.

На рис. 1 приведен типичный пример хода температуры песка с влажностью 19,6 % при температуре охлаждения  $-10^{\circ}\text{C}$  в цикле замерзания – оттаивания [7]. Замерзанию влаги предшествует ее переохлаждение ниже температуры кристаллизации  $t_k$ , до величины  $t_{\text{пер}}$ . Эту температурную область (Э на рис. 1) можно назвать скрытой или эмбриональной стадией кристаллизации, на которой незаметно для наблюдателя формируются зародыши кристаллов. При достижении значения  $t_{\text{пер}}$  температура мгновенно повышается до величины  $t_k$  с выделением некоторого количества тепла  $\Delta Q_k$  и “на свет” являются первые кристаллы льда, центры (зародыши) последующей кристаллизации всего объема воды.

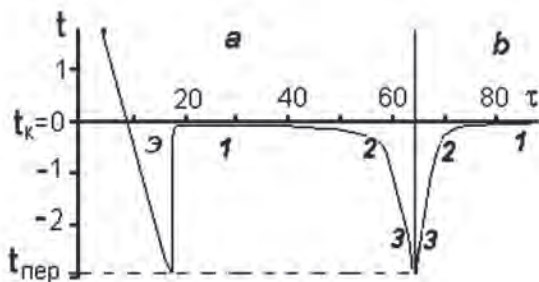


Рис. 1. Кривые замерзания (а) и оттаивания (б); 1-3 – номера характерных участков кривой.

Температура грунта в области  $t \geq t_{\text{пер}}$  зависит от температуры охлаждающей среды  $t_{\text{ох}}$ , стремится к ней со скоростью, зависящей от его теплопроводности. Т.е. температура в этой области определяется обычным уравнением теплопроводности Фурье. Переохлаждение создает температурный перепад ( $t_k - t_{\text{пер}}$ ), необходимый для получения энергии образования зародышей кристаллов. Его величину, как и время переохлаждения, можно сократить и даже обнулить, например путем встряхивания образца, увеличением внешнего давления  $P$  или с помощью затравок кристаллизации, в качестве которых могут быть использованы любые механические примеси и вещества, по строению близкие ко льду. Естественными затравками являются растворенные в воде

соли, ионы которых увеличивают количество активных поверхностей, служащих центрами кристаллизации. В отличие от  $t_k$ ,  $t_{\text{пер}}$  повышается при увеличении давления. Поэтому при повышении давления сокращение перепада ( $t_k - t_{\text{пер}}$ ) идет за счет как понижения  $t_k$ , так и повышения  $t_{\text{пер}}$ . Например, в наших опытах с суглинком, замерзающим под давлением, величины  $t_k$  и  $t_{\text{пер}}$  составили:  $-0,3^{\circ}$  и  $-3^{\circ}$  при  $P=0,1$  МПа и  $-0,8$  и  $-1,4$  при  $P=5,7$  МПа [3].

С началом явной стадии кристаллизации влаги влияние  $t_{\text{ох}}$  в значительной степени перекрывается влиянием скрытой теплоты кристаллизации  $Q_k$ :

$$Q_k = t_c (C_b - C_l) \quad (1)$$

где  $C_b$  и  $C_l$  – удельные теплоемкости воды и льда,  $t_c = k_{\text{ос}}(t_k - t)$  – средняя температура в интервале ( $t_k - t$ ),  $k_{\text{ос}}$  – коэффициент осреднения. При линейном распределении температуры  $k_{\text{ос}} = 0,5$ . Сопоставление справочных данных о скрытых теплотах плавления и теплоемкостях [6] показал, что у большинства материалов  $k_{\text{ос}}$ , рассчитанный по формуле (1) при  $t = -273^{\circ}\text{C}$ , не намного отличается от 0,5 (у железа 0,52, у меди 0,56, у нафталина 0,6...). У льда  $k_{\text{ос}} \approx 0,583$ ;  $C_b = 4,2$ ;  $C_l = 2,1$  (кДж/кг град). В нормальных условиях у льда  $t_k \approx 0$ . Тогда,  $Q_k = 0,583 \cdot 2,1 \cdot 273 = 334$  кДж/кг, а ее малая часть, выделившаяся при повышении  $t$  от  $t_{\text{пер}}$  до  $t_k$ ,  $\Delta Q_k = 0,583 (C_b - C_l)(t_k - t_{\text{пер}})$ . Чем ниже  $t_{\text{ох}}$ , тем меньше  $t_{\text{пер}}$ . Показано [5], что с понижением  $t_{\text{ох}}$  область переохлаждения сокращается и при  $t_{\text{ох}} < -6...-10^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от вида грунта) уходит за пределы “видимости” приборов. С повышением  $t_{\text{пер}}$  величина  $t_{\text{пер}}$  растет. С приближением  $t_{\text{ох}}$  к  $t_k$ ,  $t_{\text{пер}} \rightarrow \infty$ . Детальные исследования взаимозависимости  $t_{\text{пер}}$  и  $t_{\text{ох}}$  выполнены Гречищевым с сотрудниками [2].

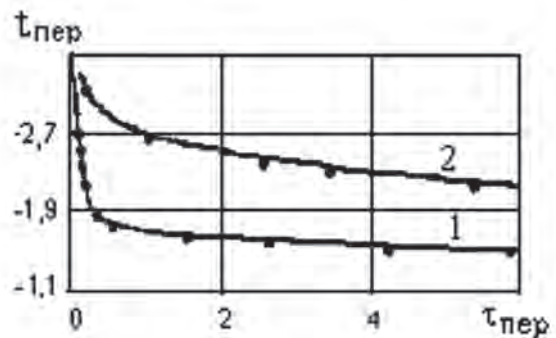


Рис. 2. Зависимость  $t_{\text{пер}}$  от  $\tau_{\text{пер}}$  ( $10^5$  с).



На рис. 2 даны ее графики для суглинков с разной влажностью:  $w_c = 26,2\%$  (опыт 1) и  $w_c = 20,5\%$  (опыт 2) по [2]. Они хорошо описываются формулой [3, 5]:

$$t_{nep} / t_{min} = (\tau_{min} / \tau_{nep})^g \quad (2)$$

где  $\tau_{min}$  и  $\tau_{nep}$  - минимальные время и температура переохлаждения из наблюдаемых в опыте ( $t_{min}$  по модулю - максимальная величина).

Температуры в формуле (2) отсчитываются от температуры кристаллизации  $t_k$ . Поэтому согласно (2) период переохлаждения уменьшается как при понижении  $t_{nep}$ , так и при повышении  $t_k$ . Величина  $g$  близка к относительной деформации кристаллизации  $g \approx j_k \approx 0,091$ , а максимальное переохлаждение (мгновенное, при  $t_{nep} \approx 10^{-13}c$ ) при подстановке в формулу экспериментальных данных, получается равным минус 22-25 $^{\circ}C$ . Это близко к минимальной температуре, при которой еще может существовать (не замерзнуть) обычная вода. Т.е. максимум и минимум температур переохлаждения и кристаллизации примерно одинаковы: 0 и -22 $^{\circ}C$ . Крайние значения  $\Delta Q_k$  в этом интервале, рассчитанные по формуле (1) равны 0 и 27 кДж/кг, а отношение  $\Delta Q_k / Q_k$  изменяется, соответственно, от 0 до 0,082.

Из (2) следует, что для каждой грунтовой разности

$$t_{nep} (\tau_{nep})^g = t_{min} (\tau_{min})^g = \mathcal{E} = const \quad (3)$$

Величина  $\mathcal{E}$  устанавливается эмпирически по результатам определения нескольких соответственных пар  $t_{nep}$  и  $\tau_{nep}$ . Оценим ее, например, для условий опыта 1 на рис.2 [2]: суглинок с влажностью 26,2%,  $-t_k = 0,4 \dots 0,5^{\circ}C$ ,  $g = 0,1$ ;  $t_{min} = -3,3^{\circ}C$  и  $\tau_{min} = 30$  с. Подставив эти цифры в (3), имеем:  $\mathcal{E} = -4,6$  ( $^{\circ}C \cdot c^{0,1}$ ). С помощью (3) можно установить минимальную температуру охлаждения ( $t_{ox}$ ), при которой еще наблюдается  $t_{nep}$ . В частности, при  $t_{nep} = -4,6^{\circ}$  величина  $\tau_{nep}$  составляет 1с, при  $-5^{\circ}$  она уже равна 0,4с, а при  $-8^{\circ}$  - всего 0,004с. Ясно, что в данном случае  $t_{nep}$  фиксируется при  $t_{ox}$  не ниже  $-4 \dots -5^{\circ}C$ . При повышении  $\tau_{nep}$  величина  $t_{nep}$  наоборот увеличивается. В том же опыте, но при  $t_{nep} = -1$ ,  $\tau_{nep}$  уже около 2 мес, и далее с приближением  $\tau_{nep}$  к  $t_k$  она резко возрастает, стремясь к  $\infty$ .

### Закономерности явной стадии кристаллизации

На этой стадии жидкость кристаллизуется за счет той порции энергии  $\Delta Q_{\phi}$ , которая скачкообразно выделилась при образовании первых кристаллов льда. На каждом времен-

ном шаге эта энергия расходуется на: а) компенсацию внешнего охлаждения и б) работу по приращению мерзлой зоны на величину  $\Delta h_i$  всякий раз с выделением очередной порции энергии  $\Delta Q_{k,i}$  и с такими же статьями расхода (п. а и б). И так продолжается до полного замораживания свободной и рыхлосвязанной влаги. Т.е. процесс кристаллизации можно представить как череду, пошаговую цепочку, взаимопревращений теплоты ( $\Delta Q_k$ ), изначально выделившейся на скрытой стадии, в работу и обратно. Всего за время кристаллизации  $\Delta Q_k$  совершает  $Q_k / \Delta Q_k$  таких оборотов. Подставляя в  $Q_k$  и  $\Delta Q_k$  их численные значения (0 и 27 кДж/кг, см. выше), находим что количество теплооборотов при кристаллизации воды в области возможного существования льда-1 составляет от бесконечно большой величины при  $t = t_k$  до 12 при  $t = -22^{\circ}C$ .

Явная стадия кристаллизации включает три участка (1...3 на рис.1). На первом, с постоянной температурой  $t_k$ , замерзает свободная вода. На термограммах этот участок имеет вид горизонтальной прямой. Затем в диапазоне температур от  $t_k$  до  $t_{tm}$  - температуры начала твердомерзлого состояния, кристаллизуется рыхлосвязанная вода. На этих двух участках замерзает практически вся термически активная вода. Замерзание оставшейся прочносвязанной воды продолжается при более низких температурах (до -80 $^{\circ}C$  и ниже), когда интенсивность фазовых переходов резко падает и главные роли в формировании температуры грунта вновь начинают играть  $t_{ox}$  и теплопроводность мерзлого грунта. Оттаивание протекает в обратном порядке.

Несмотря на разный характер термограмм на скрытой и явной стадиях кристаллизации, нетрудно заметить и их сходство: обе начинаются от  $t_k$ , и там и там образуется лед, но на скрытой стадии этот процесс происходит на микроуровне и из-за его малости не доступен (или трудно доступен) для наблюдений. Одинаковы и пределы изменения температур:  $t_{nep}$ , отвечающей за образование зародышей кристаллов льда, и  $t_k$ , отвечающей за дальнейшую кристаллизацию, при  $t < t_k$ . Т.е. назначение  $t_{nep}$  на скрытой стадии то же, что и  $t_k$  на явной - превращение воды в лед. И с каждой температурой переохлаждения можно сопоставить равную по величине температуру замерзания незамерзшей воды  $t_{k,n}$  или, что то же, частичного оттаивания льда (см. штриховую горизонталь на рис. 1); а следовательно и определенное содержание незамерзшей воды, с которой связана фазовая деформация промерзающего (оттаивающего) грунта, и определенное напряженно-деформированное

состояние грунта, выраженное через длительную прочность или долговечность.

Наблюдаемое значение  $t_{пер}$  в оптимальном диапазоне температур охлаждения ( $t_{ок} \approx -6 \dots -10^\circ\text{C}$ ) примерно совпадает по величине с температурой окончания замерзания свободной и рыхлосвязанной воды и началом твердомерзлого состояния грунта:  $t_{пер} \approx t_{TM}$  (рис. 1).

Выражение  $t_k$  следует из уравнения фазового равновесия Клапейрона-Клаузиуса:

$$t_k = P T_o (V_l - V_g) / Q_k = P b \text{ или } P = t_k / b, \quad (4)$$

где, кроме известных обозначений,  $T_o = 273$  – температура замерзания обычной воды или плавления льда при атмосферном давлении,  $K$ ;  $P$  – внешнее давление;  $b$  – численный коэффициент, определяемый экспериментально, примерно равный  $0,1^\circ\text{C}/\text{МПа}$ .

Минимум  $t_k = -22^\circ\text{C}$ , достигается при  $P = 214 \dots 220$  МПа [6]. При  $P > 220$  МПа знак зависимости  $t_k$  от  $P$  меняется на обратный. Эти две величины характеризуют эвтектическое равновесие:  $t_{эв} = -22^\circ\text{C}$ ,  $P_{эв} = 220$  МПа. Другим фактором понижения  $t_k$  является засоленность. Анализ фактического материала показал [3-5], что зависимость  $t_k$  от  $P$  и концентрации порового раствора ( $C_p$ ), отнесенных к их эвтектическим значениям, идентичны (рис.3).

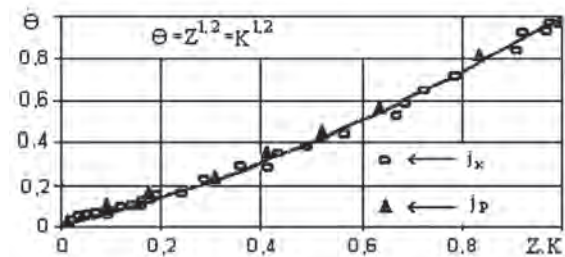


Рис. 3. Зависимость  $\theta$  от  $Z$  и  $K$ .

С учетом этого получена формула температуры замерзания, учитывающая оба этих фактора:

$$\theta = [(P + K \cdot P_{эв}) / P_{эв}]^{1.2} = (Z + K)^{1.2} \quad (5)$$

Все параметры в (5) относительны:  $\theta = (t_k / t_{эв})$ ;  $Z = (P / P_{эв})$ ;  $K = (C_p / C_{эв})$ .

Согласно [7] в твердомерзлом состоянии содержание незамерзшей воды  $W_n$  на градус понижения температуры изменяется примерно на 0,1% и меньше, т.е.  $dW_n / d = \xi < 0,001$ .

Формула зависимости  $W_n$  от  $t$  имеет вид [5]:

$$W_n = \Pi t^{-n}, \quad (6)$$

где  $\Pi = (t_o^n W_c)$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты;  $t_o$  – температура начала замерзания незасоленного грунта с начальной влажностью  $W_c$  при атмосферном давлении.

Величина  $n$  мало зависит от вида грунта, определяется в основном его консистенцией, твердой ( $n \approx 0,25$ ) и жидкой ( $n \approx 0,125$ ). Наиболее вероятные значения  $\Pi$  для основных категорий грунта примерно составляют (доли ед.): песков 0-0,01; супесей 0,01-0,03; суглинков 0,03 – 0,08; глин 0,08 – 0,15.

Возьмем из (6) производную  $(dW_n / dt) = \xi$ :

$$\xi = -n \Pi t^{-(1+n)}. \quad (7)$$

Откуда, учитывая, что минус перед правой частью (7) лишь указывает на уменьшение величины  $\xi$  с повышением абсолютной величины (модуля) отрицательной температуры и при ее расчете опускается, находим формулу, по которой определяются температуры, соответствующие любым значениям  $\xi$ :

$$t = (n \Pi / \xi)^{1 / (1+n)} \quad (8)$$

Примем, что твердомерзлое состояние грунта ( $t = t_{TM}$ ) начинается при  $\xi = 0,002$ . В табл. 1 приведены значения  $\Pi$ , а также  $t_{TM}$ , рассчитанные по формуле (8) для  $\xi = 0,002$  и крайних значений  $n$ , равных 0,25 ( $t_{TM.1}$ ) и 0,125 ( $t_{TM.2}$ ). Величина  $t_{TM}$  примерно совпадает с максимально возможной величиной  $t_{пер}$ , при которой еще фиксируется  $t_{ок}$ . Если  $t_{ок} < t_{TM}$ , то период переохлаждения (участок Э на рис. 1) так мал, что не наблюдается стандартными приборами (его не “видно”), как бы сразу начинается явная кристаллизация.

### Связь длительной прочности мерзлого грунта с параметрами фазовых превращений грунтовой влаги

Предельно длительная прочность мерзлого грунта  $P_n$  вычисляется по формуле вида [1, 4]:

$$P_n / P_{max} = (\tau_{min} / \tau_d)^g, \quad (9)$$

где  $\tau_d$  – текущая долговечность,  $\tau_{min}$  – ее минимальная величина,  $g \approx j_n$  – предельная относительная деформация,  $P_{max}$  и  $P$  – мгновенное и текущее давление.

Величина  $j_n$  (около 0,08...0,12) близка к изменению объема льда при плавлении  $j_{пл} \approx 0,083$  [8], а  $P_{max}$  определяется из уравнения (4), в которое вместо  $t_k$  подставляется

текущая температура мерзлого грунта. Подставив (4) в (8), находим связь долговечности и температуры  $t < t_k$ :

$$(\tau_t / \tau_{min})^g = P_{max} / P = t / bP = t / t_k \quad (10)$$

В уравнении (10) влияние давления выражено через посредство  $t_k$ , поэтому понижение  $t_k$  означает и повышение  $P$ , что приводит к уменьшению долговечности. Промерзание и оттаивание – практически обратимые процессы (рис. 1). Поэтому (10), можно использовать и для описания плавления (разрушения) мерзлого грунта.

Из сравнения формул (2) и (10), описывающих образование и разрушение мерзлого грунта, видно, что они отличаются противоположным характером связи температуры и времени: чем ниже температура, тем короче скрытая фаза развития ледяной структуры, но длиннее период ее явного существования, и наоборот. Примерное соответствие температур переохладения температурам перехода твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое, а периода скачка температуры от  $t_{пер}$  до  $t_k$  – минимальной долговечности позволяют использовать эти параметры в ориентировочных расчетах долговечности. Увеличение прочности и долговечности мерзлого грунта с понижением  $t$  связано с постепенным замерзанием грунтовой влаги. После достижения твердомерзлого состояния при ( $g = j_n \approx 0,083$ ) дальнейшее понижение  $t$  мало сказывается

на прочности грунта. Тогда долговечность мерзлого грунта равна

$$\tau_d \approx \tau_{min} (t_{пер} / t_k)^{1/g} \quad (11)$$

Предельно длительная прочность рассчитывается по формуле (9) при подстановке в нее (11). При этом в оценочных расчетах допускается подстановка  $t_{пер} = t_{TM}$ , согласно таблице.

### Выводы

1. Температуры переохладения и кристаллизации грунтовой влаги (плавления грунтового льда) связаны с прочностью и долговечностью мерзлого грунта. Установлены формулы этой связи – (9)-(11), которые могут быть использованы в ориентировочных расчетах прочностных свойств мерзлых грунтов.

2. Температурам переохладения соответствуют определенные температуры кристаллизации незамерзшей воды  $t_{к.н}$ , в т.ч. максимуму переохладения – температура начала твердомерзлого состояния  $t_{TM}$ , и определенное напряженно-деформированное состояние, выраженное длительной прочностью и долговечностью данного грунта.

3. При  $t_{ox} < t_{к.н}$  переохладение не фиксируется стандартными приборами, наблюдается постепенное охлаждение талого грунта до температуры  $t_k$ , затем сразу следует явная стадия кристаллизации.

Примерные значения  $\Pi$  и  $t_{ТВ}$  для основных видов грунта

Грунты	Пески	Супеси и суглинки			Глины			
		0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,15
$\Pi$	0	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,15
$-t_{ТВ.1}$	0	1,2	2,9	4,3	5,7	6,9	7,5	10,4
$-t_{ТВ.2}$	0	0,7	1,7	2,8	3,7	4,6	5,1	7,3

### Список литературы

1. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 446 с.  
 2. Гречищев, С. Е. Закономерности формирования переохладения поровой влаги при объемном замерзании дисперсных грунтов / С. Е. Гречищев, Арк. В. Павлов, О. В. Гречищева // Физико-химия, теплофизика и механика мерзлых грунтов: мат. Третьей конференции геокриологов России, 1-3 июня 2005 г., г. Москва, Россия. – М.: МГУ, 2005. – С. 38-45.  
 3. Коновалов, А. А. Фазовое равновесие и длительная прочность мерзлых грунтов /

А. А. Коновалов // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 3. – С. 51-62.  
 4. Коновалов, А. А. К теории прочности мерзлого грунта / А.А. Коновалов // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 1. – С. 31-39.  
 5. Konovalov, A. A. Correlation between the super-cooling parameters of a freezing moist material and the temperatures of transitions to the plastic and solidfrozen state and its longevity // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2010. – V. 83, № 3. – P. 476-485.  
 6. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин и М. Г. Ширкевич. – М.: Наука, 1974. – 255 с.

7. Цытович, Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1973. – 446 с.

### References

1. Vyalov, S.S. 1978. *Reological Principles of Soil Mechanics*. Moscow: Vysshaya Shkola, 446 pp. (in Russian).

2. Grechitshev, S.E., Pavlov, Arc.V., Grechitscheva, O.V. 2005. Regularities of shaping an undercooling of water in soil under the volumetric congelation of soils. *Proceedings of the Third Conference of Russian Geocryologists, June 1-3, 2005*, Moscow, Russia, vol. 1: 38-45. Moscow: MGU. (in Russian).

3. Konovalov, A.A. 2007. Phase balance and

long toughness of frozen soils. *Earth Cryosphere* XI (3): 51-62. (in Russian).

4. Konovalov, A.A. 2009. To theories of toughness of frozen soils. *Earth Cryosphere* XIII (1): 51-62. (in Russian).

5. Konovalov, A.A. 2010. Correlation between the supercooling parameters of a freezing moist material and the temperatures of transitions to the plastic- and solid-frozen state and its longevity. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 83 (3): 476-485.

6. Koschkin, N.I., Schirkevich, M.G. 1973. *Guide to Elementary Physics*. Moscow: Nauka, 255 pp. (in Russian).

7. Tsytovich, N.A. 1973. *Mechanics of Frozen Soils*. Moscow: Vysshaya Shkola, 446 pp. (in Russian).

# Bearing capacity of permafrost soils as a function of foundation type

I.E. Guryanov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: guryanov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** This paper presents a unified classification of foundation types (pile foundations, spread footings and slab foundations) on the basis of the character of contact interaction between the foundation elements and the soil (relations between resistance to normal pressure along the base of the foundation and resistance to tangential shear stress along the adfreeze surface) and the technology of earthwork (open excavation or drilling). Ultimate loads carried by various types of foundations are analyzed and nomograms are devised that enable designers to readily evaluate the bearing capacity of soils, since they are transformed to any foundation size or spacing. It is shown that the greater is the part of load transferred as normal pressure below the base of the foundation, the higher is the bearing capacity of the underlying soil. For a continuous slab, the total area of the base is considered with account for the adfreeze surface on the outer contour only. Since the resistance to normal pressure is a function of the shear strength of frozen soil, the single temperature asymptote of dimensionless parameter  $\Omega(T)$  values means that with decreasing temperature the shear strength becomes increasingly dependent on the adfreeze strength of soil particles, irrespective of the mechanical properties of a soil mineral matrix.

**Keywords:** foundations; bearing capacity; contact resistance; permafrost; temperature; strength.

## Несущая способность вечномёрзлого основания как функция типа фундамента

И. Е. Гурьянов

Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: guryanov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Представлена универсальная типизация фундаментов – свайных, столбчатых и плитных, отвечающая главным особенностям контактного взаимодействия конструкций фундамента с грунтом (варианты соотношения сопротивлений нормальному давлению по подошве и касательному сдвигу по поверхности смерзания) и технологической специфике работ нулевого цикла (котлованные или буровые работы по отдельным типам фундаментов). Проанализированы предельные нагрузки, воспринимаемые фундаментами различных типов, и построены номограммы, позволяющие оперативно оценивать несущую способность оснований, поскольку они преобразуются к любым габаритам и шагу фундаментов. Показано, что несущая способность основания конкретного фундаментного поля тем выше, чем более значительная доля нагрузки от сооружения передается как нормальное давление под подошвой фундаментов. При сплошной плите рассматривается общая площадь подошвы с учетом поверхности смерзания только по внешнему контуру. Так как сопротивление нормальному давлению есть функция прочности мерзлых грунтов на сдвиг, единая температурная асимптота величин безразмерного параметра  $\Omega(T)$  означает, что сдвиговая прочность с понижением температуры все более определяется силами смерзания частиц грунта, независимо от различия механических свойств минерального скелета.

**Ключевые слова:** основания; фундаменты; несущая способность; контактное сопротивление; вечномёрзлые грунты; температура; прочность.



## Несущая способность вечномерзлого основания как функция типа фундамента

И. Е. Гурьянов

### Параметры сопротивления вечномерзлых грунтов в основании

Оценка грунтов как материала, слагающего континуальный массив, зависит от воздействий, воспринимаемых массивом в качестве основания или среды сооружения, а также обуславливает определенные допустимые или неприемлемые диапазоны значений параметров прочности грунтов.

Требование максимальной надежности сооружения, являющееся естественным конструктивно-технологическим условием, ставит задачу согласования необходимых и реальных значений прочностных характеристик грунтов. Это, в свою очередь, приводит к варьированию типами фундаментов для сравнения формируемых ими оснований, что создает предпосылки наиболее эффективной мобилизации резервов прочности грунта, т.е. решения проблемы максимума несущей способности основания [1].

Согласно СНиП [2] прочностными характеристиками грунтов, определяющими несущую способность оснований, являются предельные сопротивления сдвигу в массиве и на контакте с фундаментом. Сдвиговая прочность грунта, учтенная применительно к типу фундамента в соответствии с принятой схемой сопротивления основания, для расчетных оценок основания преобразуется в величину предельного нормального давления по подошве фундамента. Этот параметр, а также прочность по поверхности смерзания являются двумя основными характеристиками контактного сопротивления вечномерзлых грунтов. Фундаменты различной конструкции вовлекают в работу контактные сопротивления в разных сочетаниях, неодинаково используя потенциально возможную несущую способность основания.

Расчетные схемы фундаментов соответствуют параметрам контактного сопротивления вечномерзлых грунтов в основании, группируемым следующим образом: касательные силы смерзания фундамента с грунтом; общее сопротивление грунтов нормальному давлению фундамента; совокупность нормальных и касательных контактных усилий.

Первые два параметра рассчитываются по экспериментальным данным, причем второй - с учетом ограниченного развития зон предельного равновесия под подошвой фундамента. Для столбчатых фундаментов эти параметры вводятся независимо. Совокупность усилий в качестве третьего параметра относится только к свайным фундаментам, под торцом которых допускается полное развитие предельного равновесия в грунте. Соответствующее повышенное сопротивление нормальному давлению под торцом свай учитывается в дополнение к силам смерзания на их боковой поверхности.

Для начальной оценки роли отдельных параметров по данным СНиП [2] сопоставлены фундаменты разных типов на вечномерзлых грунтах двух подгрупп - песчаных и глинистых. Свайные фундаменты квадратного сечения со стороной  $b_p = 0,4$  м при их нормируемой гибкости  $l_0/l_f \leq 200$  приняты длиной, соответственно,  $l_0 = 10$  и  $13$  м с заглублением в вечномерзлый грунт  $l_f = 7$  и  $10$  м. Столбчатые фундаменты приняты с квадратной подошвой шириной  $b = 1,4$  и  $1,8$  м при высоте боковой поверхности нижней ступени  $0,35$  и  $0,45$  м. Несущая способность фундаментной плиты учитывает площадь  $A = 9 \text{ м}^2$ , что позволяет сопоставить ее со свайными и столбчатыми фундаментами в сетке осей  $3 \times 3$  м. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетная несущая способность фундаментов, МН

Фундаменты:		Свайные		Столбчатые		Плита
Мерзлые грунты	$T, ^\circ\text{C}$	$b_p = 0,3 \text{ м}$ $l_f = 7 \text{ м}$	$b_p = 0,4 \text{ м}$ $l_f = 10 \text{ м}$	$b = 1,4 \text{ м}$	$b = 1,8 \text{ м}$	$A = 9 \text{ м}^2$
Глины и суглинки	-1	0,93	1,75	1,27	2,10	4,95
	-2	1,37	2,60	1,86	3,08	7,20
	-3	1,81	3,43	2,35	3,89	10,00
Пески мелкие	-1	1,24	2,34	2,02	3,34	8,10
	-2	1,86	3,52	2,94	4,86	11,70
	-3	2,38	4,51	3,64	6,02	14,40

Из таблицы 1 очевидно, что по сравнению со сваями несущая способность столбчатых фундаментов выше на 20-30%, а фундаментной плиты - примерно втрое. Это неудивительно, поскольку широкое применение свай обусловлено технологическими преимуществами, а с точки зрения несущей способности сваи нерациональны, так как сопротивление зоны смерзания ниже других параметров прочности. При увеличении шага свай до 5 м относительная несущая способность свайного поля по сравнению с фундаментной плитой снижается на порядок. Отмеченные закономерности указывают на целесообразность дальнейшего, более универсального сопоставления.

Расчетная методика СНиП позволяет выполнить общую оценку несущей способности оснований разнотипных фундаментов в однородных мерзлотно-грунтовых условиях. Однако непосредственное использо-

вание значений характеристик грунтов по СНиП сопряжено с нарастающими погрешностями, поскольку нормативные таблицы, рекомендуемые для предварительных расчетов оснований, включают погрешности округления и случайный разброс значений. Чтобы гарантировать уверенное применение табличных значений характеристик, для каждого типа мерзлых грунтов проведено последовательное полиномиальное сглаживание зависимостей этих значений от температуры. Методика порядковой корреляции детально описана А.К.Митропольским [3]. Численные значения предельно длительных характеристик мерзлых грунтов представлены в табл. 2 и 3, а их обозначения соответствуют СНиП [2]:  $R_e$  - расчетное давление под торцом сваи;  $R_{af}$  - расчетное сопротивление сдвигу по поверхности смерзания;  $R$  - расчетное давление под подошвой столбчатого фундамента.

Таблица 2. Расчетные сопротивления мерзлых глинистых грунтов, МПа·10<sup>-1</sup>

Грунт: Т, °С	Глины и суглинки, $c_2$			Супеси, $c_1$		
	Re	Raf	R	Re	Raf	R
-0,3	7,0	0,37	2,6	8,5	0,43	3,5
-0,5	7,9	0,56	3,5	9,5	0,64	4,6
-1	9,5	0,93	5,4	11,4	1,07	6,8
-1,5	10,8	1,22	6,9	13,0	1,40	8,6
-2	12,1	1,45	8,1	14,5	1,67	10,1
-2,5	13,4	1,68	9,3	16,0	1,92	11,5
-3	14,6	1,87	10,4	17,4	2,13	12,7
-3,5	15,9	2,04	11,4	18,8	2,30	13,8
-4	17,0	2,19	12,3	20,2	2,50	15,0
-6	21,6	2,71	15,8	25,3	3,12	18,8
-8	26,0	3,16	18,7	30,2	3,62	21,9
-10	30,0	3,55	21,4	35,0	4,07	24,7

Таблица 3. Расчетные сопротивления мерзлых песчаных грунтов, МПа·10<sup>-1</sup>

Грунт: Т, °С	Пески пылеватые и мелкие, $s_2$			Пески средние и крупные, $s_1$		
	Re	Raf	R	Re	Raf	R
-0,3	11,2	0,49	5,0	16,0	0,565	6,9
-0,5	12,7	0,73	6,5	18,0	0,85	8,7
-1	15,0	1,22	9,1	21,2	1,42	11,8
-1,5	16,8	1,59	11,1	23,3	1,85	14,1
-2	18,5	1,90	12,7	25,0	2,22	16,0
-2,5	20,3	2,18	14,2	27,2	2,53	17,7
-3	22,0	2,42	15,6	29,2	2,83	19,3
-3,5	23,5	2,65	16,8	30,9	3,09	20,6
-4	25,0	2,86	18,0	32,6	3,34	22,0
-6	30,7	3,54	22,0	39,0	4,12	26,1
-8	36,0	4,10	25,3	45,3	4,80	29,9
-10	41,0	4,63	28,2	51,0	5,37	33,0

Расчетные сопротивления нормальному давлению приведены в СНиП для двух типов песчаных грунтов и двух типов глинистых, тогда как расчетные сопротивления сдвигу по поверхности смерзания фундамента с грунтом - обобщенно, для песчаной и для глинистой групп целиком. Учитывая, что заполнение скважин у буроопускных свай практикуется не только грунтовым раствором, песчаным или глинистым, но и буровым шламом, а обратная засыпка котлованов производится также и извлеченным грунтом, значения сопротивлений сдвигу экстраполированы на парные типы песчаных и глинистых грунтов, пропорционально сопротивлениям нормальному давлению.

Расчеты показали, что прочность смерзания является более сильной функцией температуры, чем сопротивление нормальному давлению: для песков - до  $-10^{\circ}\text{C}$ , для глин - до  $-3^{\circ}\text{C}$ .

Значения характеристик, представленные в табл. 2 и 3, приняты исходными в последующем сравнении различных типов фундаментов.

#### Несущая способность оснований в зависимости от типа фундамента

Рассмотрим в общем случае однородного основания свайные и столбчатые фундаменты, имея в виду, что для второго типа предельной конструктивной разновидностью является фундаментная плита.

Свайные фундаменты, с предельной гибкостью по условиям монтажа  $l_0/i = 200$ , при среднем заглублении в вечномёрзлые грунты  $l_f = 0,75l_0$  (за вычетом из общей длины  $l_0$  глубины сезонного протаивания и высоты проветриваемого подполья) работают на сдвиг вдоль поверхности смерзания с грунтом по длине:

$$l_f = 0,75 \cdot 200 i = 150b_p/6 = 25b_p, \quad (1)$$

где  $i, b_p$  - радиус инерции и ширина квадратного сечения сваи.

Величина  $l_f$  согласно (1) - максимальная рабочая длина рядовой сваи. Отсюда при площади смерзания боковой поверхности сваи с грунтом

$$A_{af} = 4b_p l_f = 100 b_p^2$$

несущая способность основания свайного фундамента в целом равна

$$F_p = R_e A + R_{af} A_{af} = b_p^2 (R_e + 100R_{af}), \quad (2)$$

где  $R_e, R_{af}$  - расчетные сопротивления нормальному давлению под торцом и сдвигу по боковой поверхности сваи.

Значения  $R_e$  и  $R_{af}$  определяются согласно приложению 2 СНиП [2], т.е. величина  $R_{af}$  по табл. 2 и 3, но в соответствии с нормативной методикой, принимается осредненной как для глинистых, так и для песчаных грунтов.

При квадратной разбивочной сетке свай с шагом  $a$  несущая способность единицы площади свайного поля, отнесенная к природному давлению, выражается зависимостью:

$$\Phi_g = \frac{F_p}{a^2 \sigma_g} = \frac{b_p^2}{a^2 \sigma_g} (R_e + 100R_{af}) = \frac{R_e + 100R_{af}}{n^2 \sigma_g}, \quad (3)$$

где  $n = a/b_p$  кратность шага свай их ширине.

Соотношение  $\Phi_g$  несущей способности свай и природного давления характеризует допустимый резерв нагружения основания по сравнению с естественной несущей способностью "плавающего" фундамента.

В выражении (3), представленном в виде  $\Phi_g = \Phi_{e,g} + \Phi_{af,g}$ , значения несущей способности торца и боковой поверхности сваи раздельно равны

$$\Phi_{e,g} = \frac{R_e}{n^2 \sigma_g}; \quad \Phi_{af,g} = \frac{100R_{af}}{n^2 \sigma_g}. \quad (4)$$

На рис. 1 приведены температурные функции несущей способности боковой поверхности свай  $\Phi_{af,g}$  (штрих-пунктир) при смерзании с песчаными ( $s$ ) и глинистыми ( $c$ ) грунтами. Каждой из кривых  $\Phi_{af,g}$  отвечают две функции полной несущей способности свай  $\Phi_g$  (пунктир), учитывающие варианты слагаемого  $\Phi_{e,g}$  согласно типу грунта под торцом сваи и обозначенные

- для песков:  $s_1$  - крупные и средней крупности,  $s_2$  - мелкие и пылеватые;
- для глинистых грунтов:  $c_1$  - супеси,  $c_2$  - суглинки и глины.

Графики на рис. 1 рассчитаны при постоянном вертикальном напряжении от веса грунтов  $\sigma_g = 0,1$  МПа, отвечающем глубине порядка 5 м, причем температурные кривые значений  $\Phi_g$  показаны лишь для  $n = 5$ , а результирующие пунктирные прямые даны в интервале от 4 до 15. Безразмерные величины  $\Phi_g$ , численно равные приведенной несущей способности свайного поля в МПа $\cdot 10^{-1}$ , служат и параметрическими критериями несущей способности основания, поскольку графики на рис. 1, как это следует из соотношений (3), характеризуют несущую способность свай любых габаритов:

$$F_p = a^2 \sigma_g \Phi_g = n^2 b_p^2 \sigma_g \Phi_g, \quad (5)$$

где при заданном  $b_p$  фиксируется шаг  $a = nb_p$ , и наоборот. В частности, при  $a = 3$  м на этих графиках указаны значения  $b_p$  для каждого  $n$ ,

а на оси ординат - соответствующая несущая способность сваи в МН.

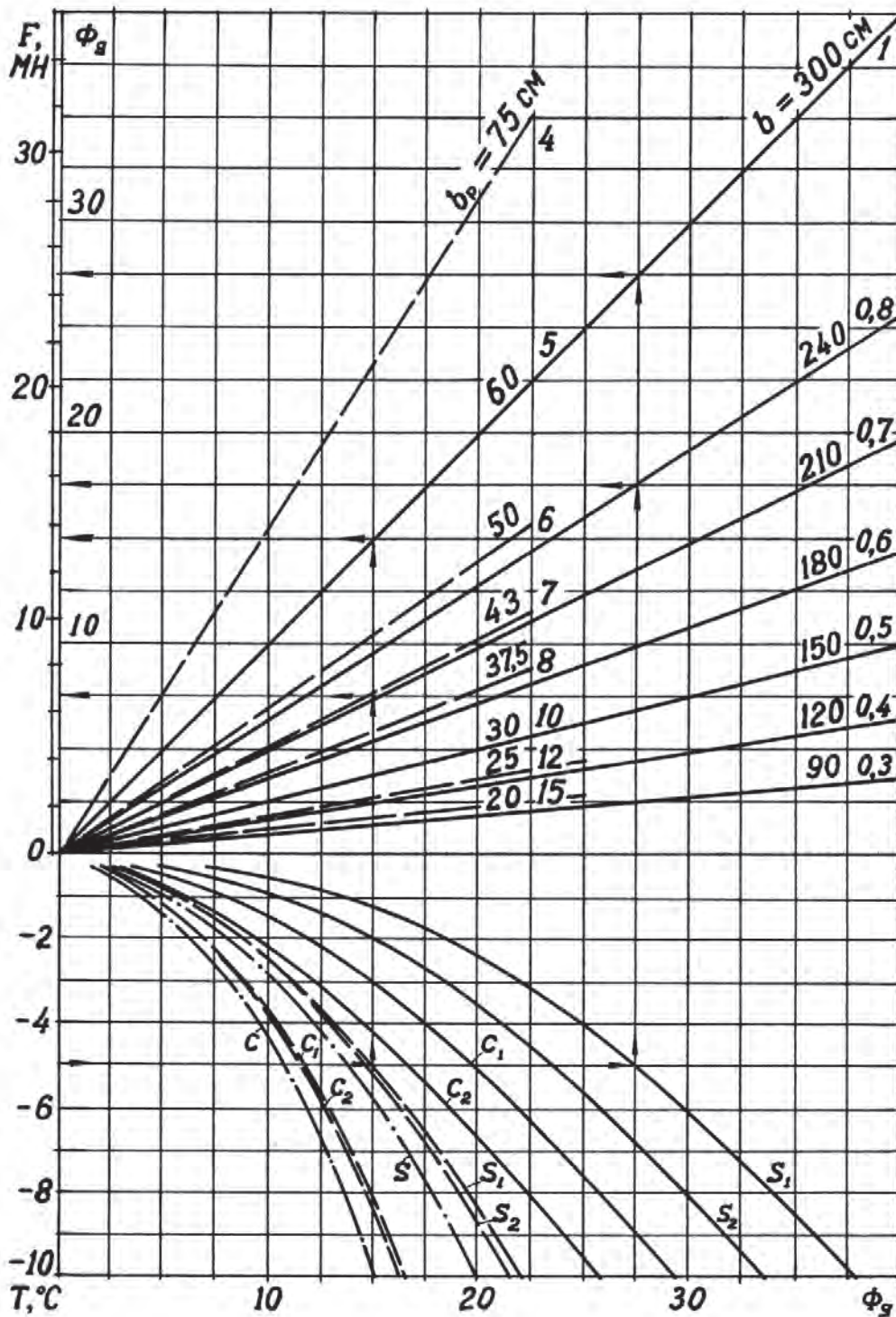


Рис. 1. Несущая способность столбчатых (сплошные линии) и свайных (пунктир) фундаментов в песчаных ( $s$ ) и глинистых ( $c$ ) мерзлых грунтах в зависимости от температуры, а также от ширины и относительного шага фундаментов. Другие пояснения в тексте.



Рассмотрим столбчатые фундаменты с квадратной подошвой шириной  $b$  и высотой нижней ступени, пропорциональной этой ширине:  $h = 0,25b$ . Тогда, при площади смерзания фундамента с грунтом  $A_{af} = 4bh = b^2$ , полная несущая способность основания столбчатого фундамента определяется величиной:

$$F = RA + R_{af}A_{af} = b^2(R + R_{af}), \quad (6)$$

где  $R$  - расчетное давление под подошвой.

При квадратной сетке фундаментов с шагом  $a$  несущая способность единицы площади фундаментного поля, отнесенная к природному давлению  $\sigma_g$ , равна

$$\Phi_g = \frac{F}{a^2\sigma_g} = \frac{b^2}{a^2\sigma_g}(R + R_{af}) = \alpha^2 \frac{R + R_{af}}{\sigma_g}, \quad (7)$$

где  $\alpha = b/a$  - отношение ширины подошвы фундаментов к их шагу.

Значения  $\Phi_g$  согласно формуле (7) для столбчатых фундаментов показаны на рис. 1 сплошными линиями. Температурные функции даны при  $\alpha = 1$  для песков крупных и средних ( $s_1$ ), мелких и пылеватых ( $s_2$ ), супесей ( $c_1$ ), суглинков и глин ( $c_2$ ). Зависимости для  $\Phi_g$  верхней части рис. 1 представлены в интервале  $\alpha$  от 0,3 до 1.

Критериальные графики для заданных  $\alpha$  определяют на шаге несущую способность столбчатого фундамента габаритами  $b = \alpha a$ :

$$F = a^2\sigma_g\Phi_g = \frac{b^2}{\alpha^2}\sigma_g\Phi_g. \quad (8)$$

Начиная с  $a = 3$  м на графиках даны значения  $b$  для каждого  $\alpha$ , а на оси ординат - значения несущей способности  $F$  основания фундамента любого вида в МН.

Графики на рис. 1 являются, по существу, номограммами, позволяющими определить несущую способность основания фундаментов произвольных габаритов в зависимости от типа и температуры грунта. Значения  $\Phi_g$  превышают в десятки раз природное давление и на порядок выше несущей способности оснований в однотипных немерзлых грунтах. Как видно из рисунка, при одинаковой температуре мерзлых грунтов несущая способность основания фундаментной плиты примерно вдвое выше, чем свайных фундаментов при шаге  $n = 5$ , и впятеро - при  $n = 8$ . В основании гражданских зданий шаг свайных фундаментов обычно отвечает  $n = 10$ , при этом несущая способность свайного поля на порядок ниже, чем плиты.

В целом, любые разновидности фундаментов на вечномерзлых грунтах приводятся к двум указанным конструктивным типам.

Поэтому, в дополнение к независимым исследованиям фундаментов, целесообразно проанализировать их взаимное функциональное соответствие. Рассмотрим соотношение несущей способности оснований столбчатого и свайного фундаментов в форме параметрического критерия  $\Phi_p$ , разделив функцию (6) на (2):

$$\Phi_p = \frac{F}{F_p} = 0,01 \frac{b^2}{b_p^2} \Omega; \quad \Omega = \frac{R + R_{af}}{0,01 R_e + R}. \quad (9)$$

Параметр  $\Omega$ , учитывающий геометрические пропорции сопоставляемых конструкций, для каждого типа грунта выражает комплексное отношение его расчетных сопротивлений в основании столбчатых и свайных фундаментов, являясь совокупной функцией температуры. Графики  $\Omega(T)$ , показанные на рис. 2 сплошными линиями, отвечают средним значениям сопротивлений сдвигу песчаных и глинистых грунтов по поверхности смерзания. Именно осреднение значений  $R_{af}$  согласно рекомендации СНиП [2], в целом для песков ( $s$ ) и глин ( $c$ ) ведет к раздвижке значений  $\Omega$  как относительных величин. Если же функции  $\Omega(T)$  рассчитывать с учетом сопротивлений грунтов  $R_{af}$  каждого типа  $c_1, c_2, s_1, s_2$  из табл. 2 и 3, то их графики единообразно группируются в соответствии с соотношениями прочности грунтов отдельных типов (пунктирные кривые на рис. 2), асимптотически сближаясь при понижении температуры. Наличие единой асимптоты указывает на то, что льдоцементная структура мерзлых грунтов с понижением температуры становится преобладающим фактором прочности, сглаживая литологические различия. В свою очередь, параметр  $\Omega$  как безразмерный комплекс, описывающий относительную несущую способность основания и стремящийся к общей для различных грунтов константе, является, по-видимому, универсальной характеристикой вечномерзлого основания.

Экстремумы графиков  $\Omega(T)$  на рис. 2 для сглаженных характеристик обеих разновидностей глинистых грунтов объясняются ролью отмеченной температурной границы вблизи  $-3^\circ\text{C}$ . При более низкой температуре прочность смерзания нарастает быстрее температурной зависимости для льда вследствие кристаллизации незамерзшей воды. При температуре выше граничной эта прочность нарастает медленнее из-за влияния связанной влаги глинистых грунтов.

Поэтому на рис. 2 функции относительного расчетного сопротивления оснований  $\Omega(T)$ , полученные по формуле (9) с учетом



характеристик грунтов, представленных в табл. 2 и 3, по мере понижения температуры монотонно убывают, причем у песков - везде, а

у глин - до минимума при  $-3^{\circ}\text{C}$ , возрастая при дальнейшем понижении температуры.

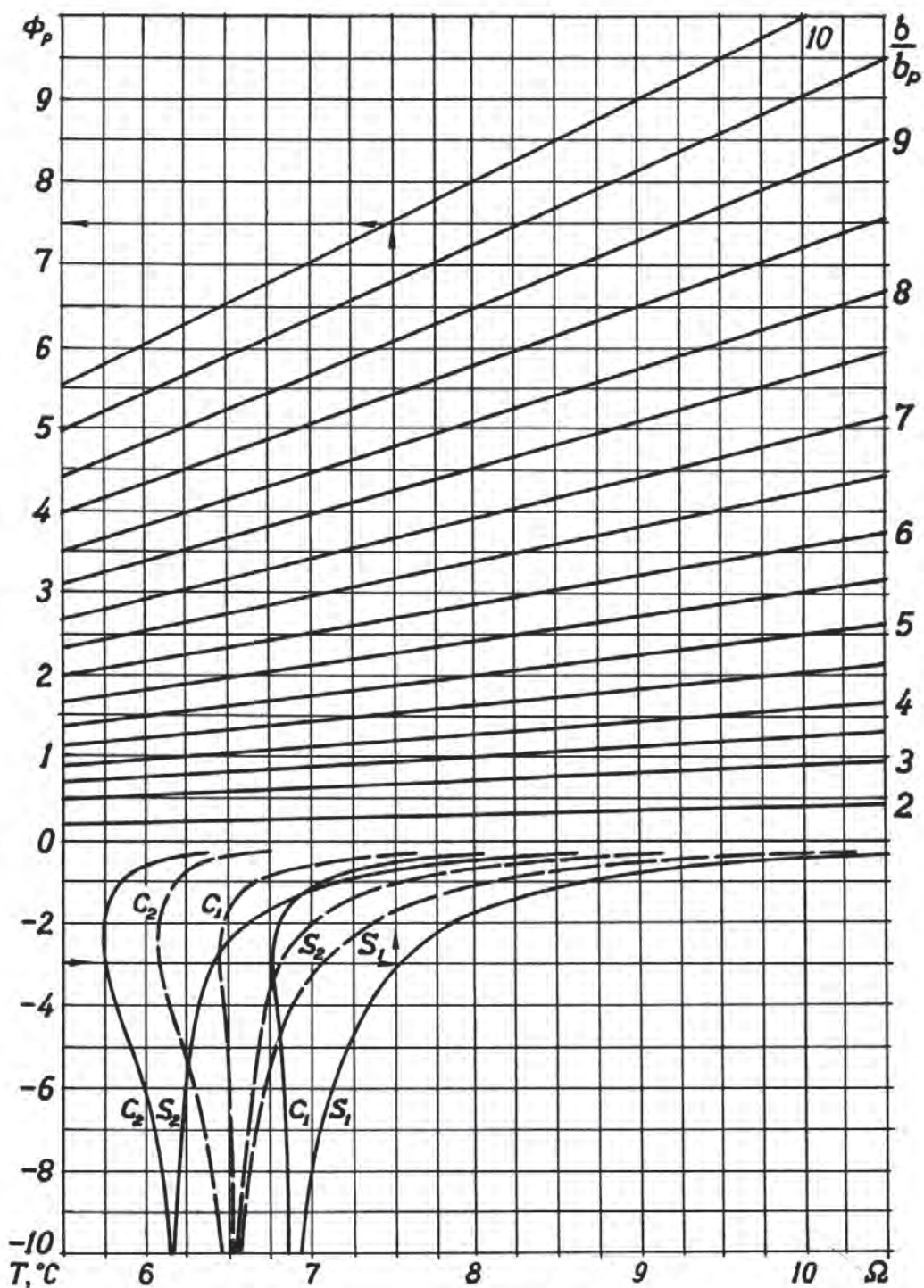


Рис. 2. Приведенная несущая способность  $\Phi_p$  столбчатых фундаментов относительно свайных и соотношение расчетных сопротивлений  $\Omega$  четырех рассматриваемых типов мерзлых грунтов их основания в зависимости от температуры. Пояснения в тексте.

В табл. 4 представлены результаты расчетов параметра  $\Omega$ , выполненных по формуле (9) при осредненных значениях сопротивлений  $R_{af}$  песчаных и глинистых грунтов ( $\Omega_0$ ) и при значениях  $R_{af}$ , отвечающих каждому из четырех рассматриваемых типов грунтов в табл. 2 и 3

( $\Omega_1$ ). Табл. 4 демонстрирует сближение значений  $\Omega$  с понижением температуры до  $-10^\circ\text{C}$  и далее. Из приведенных данных очевидна и различная функциональная зависимость прочности от температуры для различных типов грунтов.

Таблица 4. Безразмерные параметры несущей способности  $\Omega$  оснований на вечномерзлых грунтах при двух вариантах значений сопротивления сдвигу по поверхности смерзания

Грунт: $T, ^\circ\text{C}$	Глины и суглинки		Супеси		Пески пылеватые и мелкие		Пески средние и крупные	
	$\Omega_0$	$\Omega_1$	$\Omega_0$	$\Omega_1$	$\Omega_0$	$\Omega_1$	$\Omega_0$	$\Omega_1$
-0,3	6,38	6,75	8,04	7,63	8,61	9,12	10,77	10,30
-0,5	6,04	6,35	7,48	7,13	7,95	8,44	9,78	9,27
-1	5,84	6,18	7,00	6,65	7,17	7,53	8,66	8,10
-1,5	5,82	6,12	6,92	6,54	6,85	7,22	8,17	7,66
-2	5,75	6,08	6,84	6,48	6,60	7,00	7,85	7,38
-2,5	5,74	6,05	6,79	6,45	6,48	6,87	7,65	7,22
-3	5,78	6,09	6,76	6,44	6,42	6,83	7,53	7,09
-3,5	5,82	6,11	6,77	6,47	6,37	6,74	7,42	6,97
-4	5,84	6,14	6,82	6,48	6,30	6,71	7,33	6,91
-6	6,00	6,32	6,85	6,50	6,23	6,64	7,08	6,70
-8	6,04	6,39	6,86	6,51	6,18	6,59	7,00	6,61
-10	6,15	6,48	6,87	6,51	6,14	6,52	6,90	6,53

Номограммы для приведенной несущей способности основания  $\Phi_p$ , полученные по формуле (9) в зависимости от соотношения расчетных сопротивлений  $\Omega$  и относительных габаритов фундаментов  $b/b_p$ , построены в верхней части рис. 2. Графики  $\Phi_p$  позволяют оценить несущую способность оснований в любых прогнозируемых условиях. Из рис. 2 следует общая предпочтительность столбчатых фундаментов, поскольку значения  $\Phi_p \gg 1$  преобладают в поле конструктивных вариаций. Максимум несущей способности мерзлого основания достигается применением фундаментных плит.

### Выводы

1. Рассмотренная типизация фундаментов является универсальной, отвечая главным особенностям контактного взаимодействия конструкций фундамента с грунтом (варианты соотношения сопротивлений нормальному давлению по подошве и касательному сдвигу по поверхности смерзания) и технологической специфике работ нулевого цикла (экскавация или бурение для различных типов фундаментов).

2. Полученные номограммы позволяют оперативно оценивать несущую способность оснований, поскольку они преобразуются к любым габаритам и шагу фундаментов. Очевидно, что несущая способность основания конкретного фундаментного поля тем выше, чем большая доля нагрузки на основание передается как нормальное давление под подошвой фундаментов.

При сплошной плите рассматривается наибольшая площадь подошвы с учетом поверхности смерзания только по ее внешнему контуру.

3. Так как сопротивление нормальному давлению есть функция прочности мерзлых грунтов на сдвиг, единая температурная асимптота величин  $\Omega(T)$  означает, что сдвиговая прочность с понижением температуры все более определяется силами смерзания частиц грунта, независимо от различия механических свойств минерального скелета.

### Список литературы

1. Гурьянов, И. Е. Начала инженерной криолитологии / И. Е. Гурьянов. – Якутск : Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2001. – 121 с.
2. СНИП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 56 с.
3. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М. : Наука, 1971. – 576 с.

### References

1. Guryanov, I.E. 2001. *Introduction to Engineering Cryolithology*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 121 pp. (in Russian)
2. USSR State Committee on Construction. 1990. *Building Code SNiP 2.02.04-88. Foundations in Permafrost*. Moscow: USSR State Committee on Construction, 56 pp. (in Russian)
3. Mitropolskii, A.K. 1971. *Technique of Statistical Computations*. Moscow: Nauka, 576 pp. (in Russian).

# **A general procedure for field determination of bearing capacity of pile foundations in permafrost**

I.E. Guryanov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: guryanov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** This paper presents a complex field test procedure for determining two, rather than one, working characteristics of bearing capacity of a pile foundation. It also gives functions for calculating characteristic elements of the load carried by a pile and distributed between individual zones of a foundation soil. These elements could only be determined by special measuring devices in the past. The paper discusses the results of the only field pile tests for the Mirny area performed in the early 1960s and presents the design characteristics of foundation soils which have been deduced recently. The more valid numerical processing of experiments helps optimize the size of pile foundations, varying the width and working length of piles, as well as their arrangement in plan.

**Keywords:** permafrost; pile foundations; design soil strength; soil bearing capacity.

## **Общая методика натурного определения несущей способности свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах**

И. Е. Гурьянов

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: guryanov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Описана методика комплексных полевых испытаний, выявляющих не одну, а две рабочих характеристики несущей способности свайного фундамента. Приведены расчетные функции для характерных элементов нагрузки, воспринимаемой конструкцией свай и распределяемой между отдельными зонами основания. Ранее эти элементы определялись лишь специальными измерительными устройствами. Рассмотрены результаты единственных в условиях Мирнинского района полевых испытаний свайных фундаментов, проведенных в начале 60-х годов, из которых только сейчас впервые выявлены расчетные характеристики грунтов оснований. Продемонстрированная более достоверная численная обработка экспериментов позволяет оптимизировать свайное поле, варьируя шириной и рабочей длиной конструкции свай, а также их расстановкой в плане.

**Ключевые слова:** вечномёрзлый грунт; свайные фундаменты; расчетные сопротивления грунтов; несущая способность оснований.

# Общая методика натурального определения несущей способности свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах

И. Е. Гурьянов

## Схематизация расчета сопротивления оснований буропускных свай

Буропускные сваи являются основным типом фундаментов зданий и сооружений на вечномёрзлых грунтах. Боковая поверхность этих свай по всей глубине контактирует с замёрзшим грунтовым раствором, заливаемым в предварительно пробуренные скважины. Поэтому для раствора заданного состава прочность смерзания является единой характеристикой рабочей длины сваи, и согласно стандартной расчетной схеме несущая способность сваи определяется как сумма сил, зависящих от расчетных сопротивлений грунтов основания под торцом сваи, предельного давления  $R$ , и на ее боковой поверхности, контактного сопротивления сдвигу  $R_{af}$ .

ГОСТ [1] на полевые испытания свай подразумевает пропорциональность экспериментальных и расчетных значений общей несущей способности сваи, т.е. реальные соотношения сопротивлений мерзлых грунтов  $R_{af}$  и  $R$  предполагаются равными нормируемым. Однако соотношение указанных характеристик может быть самым различным, поскольку механические свойства грунтов на конкретной площадке обусловлены не только их грансоставом, как это нормирует СНиП [2], но также генетическими и литологическими особенностями, криогенным строением и льдистостью. Эти факторы неодинаково сказываются на различных параметрах прочности, в связи с чем одновременное определение величин  $R_{af}$  и  $R$  необходимо в производственных испытаниях свай, которые по нормам рекомендуется проводить для ответственных сооружений (второго класса долговечности и выше).

Вслед за С.С.Вяловым [3] многими работами доказано, что зависимость прочностных параметров мерзлых грунтов различных типов от температуры достоверно аппроксимируется степенной функцией:

$$R = R_1 \theta^m; \quad R_{af} = R_{af1} \theta^n, \quad (1)$$

где  $\theta = t/t_1$ ,  $t$  - фактическая температура мерзлого грунта,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1 - 1^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{af} = R_{af1}$  - прочность грунта при  $t = t_1$ .

В формуле (1) показатели степени  $m$ ,  $n$  варьируют в пределах 0,3-0,7. Табличные значения СНиП [2] расчетных сопротивлений

$R$  под торцом сваи соответствуют величине  $m = 0,4$  для всех типов грунтов, исключая крупнообломочные при льдистости за счет ледяных включений  $i_i < 0,2$  ( $m = 0,3$ ) и пески средней крупности и выше ( $m = 0,35$ ). Таблицы СНиП для сопротивления сдвигу сваи по грунтовому раствору соответствуют  $n = 0,65$ , а для сдвига грунта по грунту (у стенки скважины) -  $n = 0,5$ . Функция (1) коррелирует по температуре, в целом, достаточно надежно и отдельными испытаниями свай не может быть исправлена.

## Функции расчетной несущей способности свай

С ростом глубины сваи сопротивление у ее торца возрастает для свай большего диаметра в меньшей степени, т.е. как функция относительной длины:

$$R_L = R(1 + kL), \quad (2)$$

где  $L = l_f/b$ ,  $l_f$  - рабочая длина,  $b$  - поперечный размер сваи.

В формуле (2) согласно СНиП [2] для крупнообломочных грунтов, а также средних и крупных песков  $k = 0$ . Если принять, что данные таблицы 1 приложения 2 СНиП соответствуют ширине сваи  $b = 0,3$  м, то для остальных мерзлых грунтов любого типа  $k = 0,008$  при  $i_i < 0,2$  и  $k = 0,005$  при  $0,2 \leq i_i \leq 0,4$ .

Функции (1) и (2) характеризуют наиболее общие особенности работы свай в вечномёрзлых грунтах, и, очевидно, должны учитываться в анализе результатов испытаний свай.

Для буропускных свай изменение величины  $R_{af}$  с глубиной определяется только температурой грунтов, вследствие чего суммируемую часть формулы (3) СНиП [2] нетрудно привести с учетом (1) к виду:

$$\sum_i R_{af,i} A_{af,i} = R_{af1} \theta^n A_{af},$$

где  $A_{af}$  - общая площадь рабочей зоны боковой поверхности сваи;  $\theta$  - среднее значение безразмерной температуры по всей поверхности сдвига, определяемое по формуле:

$$\theta = \left( \sum_i \theta_i^n \delta_i \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$



где  $\delta_i = h_i/l_f$  - относительная толщина  $i$ -го слоя грунта с температурой  $\theta_i$ .

В этом случае формулы (3) и (4) из СНиП [2] совпадают в написании, и данное общее выражение удобнее представить следующим образом:

$$\sigma = R_L = R_{af} \cdot 4L, \quad (4)$$

где  $\sigma$  - среднее нормальное напряжение в голове сваи.

В формуле (4) относительная длина сваи  $L$  выражается через ее поперечный размер  $b$ , равный диаметру для круглой сваи, стороне - для квадратной, а для сваи прямоугольного сечения со сторонами  $b_1$  и  $b_2$

$$b = 2b_1b_2/(b_1 + b_2).$$

Полагая, что влияние температуры грунта и заглубления сваи взаимно независимо, и подставляя выражения (1) и (2) в формулу (4), имеем

$$\sigma = R_1 (1 + kL) \theta^m = 4R_{af} L \theta^m. \quad (5)$$

Здесь в первом слагаемом величина  $\theta$  определяется по температуре грунта у торца сваи, а во втором - по формуле (3).

#### Интерпретация результатов натуральных испытаний свай

При обработке результатов испытаний свай формула (5) рассматривается как линейное уравнение с неизвестными  $R_1$  и  $R_{af}$ , а величины  $k$ ,  $m$ ,  $n$  принимаются равными указанным выше значениям. Общий вид линейной функции (5) свидетельствует, что любые два испытания с различными  $\theta$  и  $L$  взаимно независимы, и, соответственно, система двух уравнений вида (5) имеет ненулевые решения  $R_1$  и  $R_{af}$ . При числе испытаний более двух эти решения осредняются как эмпирические параметры линейной регрессии.

Если в различных испытаниях температурные условия одинаковы, то можно непосредственно использовать формулу (4) для определения  $R$  и  $R_{af}$  при вариациях величины  $L$ . В этом случае минимум объема полевых экспериментальных работ требует испытания по крайней мере двух свай, причем разного сечения, или же одного сечения, но разной длины.

Изложенная методика прямо следует из расчетных формул СНиП и общего метода предельных состояний, поскольку выявляет две основные характеристики несущей способности свай, предусматривая их совместное равноточное осреднение не по отдельным испытаниям, а по перераспределению усилий в конструкции.

Данная методика совместного определения расчетных характеристик свайных фунда-

ментов впервые предложена и обоснована в работе [4], в период действия предшествующей редакции СНиП. Однако и в новой редакции СНиП [2] общие принципы расчета свай сохранились неизменными, и, соответственно, правомерны численные примеры обработки результатов испытаний, приведенные в [4].

При температуре грунтов, осредняемой на рабочей длине сваи  $l_f$  согласно выражению (3) и неизменной в процессе испытаний, с учетом варьирования в испытаниях только значениями безразмерной длины  $L$ , удобно использовать следующие из (4) расчетные формулы для определения искомых сопротивлений вечномерзлого грунта:

$$R_L = \frac{\sigma_2 L_1 - \sigma_1 L_2}{L_1 - L_2}; \quad R_{af} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{4(L_1 - L_2)}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1$ ,  $L_1$ , - предельное напряжение и габариты сваи в первом испытании;  $\sigma_2$ ,  $L_2$  - то же, во втором испытании.

Реальные примеры, хотя и в ограниченном объеме, показывают, что совместное исследование параметров сопротивления основания, обычно определяемых отдельно, позволяет выявить их действительные соотношения, отличающиеся от нормируемых вдвое и более. Поэтому назначаемые при проектировании фундаментов по СНиП поперечные сечения и глубина заложения свай, в отсутствие данных о фактических значениях сопротивлений  $R$  и  $R_{af}$ , объективно не отвечают условиям равнопрочности различных зон используемого основания и являются конструктивно нерациональными. В отличие от нормативных рекомендаций, опирающихся на стандартный метод испытания свай, рассмотренная методика полевых испытаний, практически подразумевающая параллельные испытания различных конструктивных вариантов свай, обеспечивает более детальную интерпретацию результатов, которая гарантирует в последующем проектировании возможность обоснованно назначать конфигурацию и размеры свайных фундаментов, согласованные с действительной работой отдельных элементов конструкции сваи в конкретных мерзлотно-грунтовых условиях.

Описанная методика испытаний открывает возможность варьирования тремя параметрами свайного поля: шириной конструкции сваи, рабочей длиной сваи в мерзлом грунте и шагом свай. Минимизируя материалоемкость фундаментов сооружения в целом или же общую стоимость строительных работ и конструкций, можно оптимизировать свайное поле для требуемых габаритов конструкций и шага свай в плане.



### Комплексные испытания свай на площадке г. Мирного

С началом капитального строительства в г. Мирном Институт мерзлотоведения СО АН СССР по договору с местными строителями выполнил первые (и до настоящего времени единственные) испытания свайных фундаментов. На площадке города в различных мерзлотно-грунтовых условиях были оборудованы три испытательных площадки, каждая из которых сблокирована из трех свай с общим загрузочным устройством. В голове и под торцом всех свай были заложены динамометры, т.е. планировалось получить исчерпывающую информацию для каждой из девяти свай. Испытания проведены в 1961–1964 гг.

Однако в процессе работ все динамометры вышли из строя, и возникли сложности с определением общей нагрузки на сваи. Таким образом, результаты испытаний оказались сугубо оценочными, поскольку планируемых экспериментальных данных о предельном сопротивлении грунтов в основании свай получено не было [5].

Попробуем выяснить, насколько рассмотренная в докладе методика совместного анализа работы свай позволяет определить реальные результаты испытаний. Из девяти испытанных свай две – рифленая и коническая – индивидуальны и в обработку не могут быть включены. Оставшиеся семь свай квадратного сечения 25x25 можно сгруппировать по числу сочетаний из 7 по 2:  $C_7^2=21$ . Однако из всех возможных сочетаний результативны лишь те, которые фиксируют совпадение стадий одновременного предельного состояния сдвига вдоль боковой поверхности или сопротивления под торцом каждой пары свай. Возможно, как исключение, совпадение двух предельных состояний. В табл. 1 представлены значения полной осадки  $s$ , мм, каждой сваи в зависимости от нагрузки на сваю  $F$ , тс (см. [5], стр. 159-160). В расчетах используются старые размерности, чтобы сохранить цифры оригинала. Кроме того, таблицы 34 и 35 из [5] содержат отдельные несущественные ошибки, выявленные графическими построениями и исправленные.

Таблица 1. Осадки свай № 1-9  $s$  в зависимости от нагрузки  $F$

Свая №	Нагрузка на сваю $F$ , тс (курсив) / Осадки сваи $s$ , мм						
	\ Нагр.	<i>16</i>	<i>36</i>	<i>56</i>	<i>75,5</i>	<i>76,2</i>	<i>96</i>
1		0,10	0,35	1,02		<b>2,06</b>	11,0
2		0,20	0,65	1,24	<b>3,49</b>		20,0
\ Нагр.	<i>17</i>	<i>36</i>	<i>47</i>				
4	<b>2,11</b>	70,1	107,2				
5	<b>2,65</b>	61,7	76,4				
\ Нагр.	<i>12</i>	<i>15</i>	<i>23</i>	<i>24</i>	<i>31</i>	<i>35</i>	
7	0,30			<b>2,38</b>			21,4
8	0,22			<b>2,49</b>			41,5
9		<b>0,36</b>	53,5			100,6	

Графическая обработка данных табл. 1 однозначно выявила точки перелома линий осадки свай и соответствующие им предельные нагрузки на сваи, выделенные в табл. 1 жирным шрифтом, по которым рассчитаны численные параметры испытаний каждой сваи:

$\sigma = F / b^2$ , где  $b = 25$  см – ширина сваи квадратного сечения;

$l_f, L$  – расчетные длины сваи по формулам (2);

$t_{af}$  – средняя по длине  $l_f$  расчетная температура мерзлого грунта;

$t_L$  – температура грунта у торца сваи.

Результаты определения значений рабочих параметров испытаний (предельных нагрузок и расчетных длин контактной зоны

сдвига) всех семи свай приведены в табл. 2.

Предельные характеристики результатов испытаний свай в табл.2 свидетельствуют, что вследствие близости расчетных длин свай  $l_f(L)$  расчетные нагрузки  $F(\sigma)$  по условиям формулы (6) должны быть не менее близки. Поэтому даже на общей площадке № 3 испытания свай 7 и 9, а также 8 и 9, не совместны в обработке. В отдельности на каждой площадке лишь одна пара испытанных пригодна к совместной обработке результатов. На разных площадках допустимы для общей обработки испытания только двух пар свай: 4 и 9, а также 5 и 9, сроки предельного срыва которых отличаются менее недели при длительности максимального нагружения несколько месяцев.

Таблица 2. Технические параметры полевых испытаний свайных фундаментов

Свая №	$F$ , тс	$\sigma$ , кгс/см <sup>2</sup>	$l_f$ , см	$L$	$t_{af}$ , °С	$t_L$ , °С
1	76,2	121,92	327	13,08	-3,8	-2,2
2	75,5	120,8	320	12,80	-3,8	-2,2
4	17,0	27,2	291	11,64	-0,8	-1,0
5	17,0	27,2	288	11,52	-0,8	-1,0
7	24,0	38,4	262	10,48	-0,8	-0,9
8	24,0	38,4	257	10,28	-0,8	-0,9
9	15,0	24,0	236	9,44	-0,8	-0,9

Таблица 3. Результаты расчетной обработки данных полевых испытаний свай

Свая №	$\sigma_1 / \sigma_2$ , кгс/см <sup>2</sup>	$L_1$ $L_2$	$L_1 - L_2$	$\sigma_1 - \sigma_2$	$R_{af}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_2 L_1$	$\sigma_1 L_2$	$R_L$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	121,92	13,08	0,28	1,12	1,00	1580,06	1560,58	69,6
2	120,8	12,80						
4	27,2	11,64	0,12	0	0	316,608	313,344	27,2
5	27,2	11,52						
7	38,4	10,48	0,20	0	0	402,432	394,752	38,4
8	38,4	10,28						
4	27,2	11,64	2,20	3,2	0,364	279,36	256,768	10,27
9	24,0	9,44						
5	27,2	11,52	2,08	3,2	0,385	276,48	256,768	9,48
9	24,0	9,44						

Численные значения расчетных характеристик оснований, полученные в результате обработки материалов испытаний с использованием формул (6), приведены в табл. 3.

#### Обсуждение результатов обработки материалов испытаний

Таким образом, комплексное рассмотрение результатов испытаний свай показало, что далеко не все из них поддаются совместной интерпретации. Структура расчетных зависимостей такова, что если в сопоставляемых испытаниях  $L_1 > L_2$ , то согласно второй из формул (6) должно быть также  $\sigma_1 > \sigma_2$ , так как сопротивление свай сдвигу в грунте не может быть отрицательным. Кроме того, необходимо

выполнение условия  $\frac{L_1}{L_2} > \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ , так как

иначе становится отрицательным сопротивление под торцом сваи по первой формуле (6). Поэтому результаты испытаний свай 1 и 2 сразу не сопоставимы со всеми остальными, так как слишком велика разница нагрузок  $\sigma_1 \gg \sigma_2$  (невозможны 10 сочетаний). Сваи 4 и 5 не сочетаются со сваями 7 и 8, поскольку соотношения нагрузок и расчетных длин обратны

требуемым (минус 4 пары испытаний), а свая 9 сорвалась значительно раньше двух других свай площадки (минус 2 пары). В итоге из 21 возможного сочетания требованиям обработки по данной методике удовлетворяют лишь 21-16=5 пар испытаний, результаты которых и представлены в табл. 3.

Обработанные материалы испытаний свай на площадке I дали сопротивление сдвигу по боковой поверхности  $R_{af} = 1$  кгс/см<sup>2</sup> свай № 1 и № 2 при температуре -3,8° С и предельное сопротивление мергеля и доломита под торцом свай  $R_L \cong 70$  кгс/см<sup>2</sup> при температуре грунта до -2,2°С. На площадках II и III испытания свай № 4, 5, 7, 8, 9 при температуре от -0,8 до -1° С показали результирующее сопротивление сдвигу по боковой поверхности свай порядка  $R_{af} = 0,36 \div 0,39$  кгс/см<sup>2</sup>, а сопротивление переслаивающихся мергелей и известняков под торцами тех же свай – в интервале значений от  $R_L \cong 10$  кгс/см<sup>2</sup> до  $R_L \cong 38$  кгс/см<sup>2</sup>. Рассчитанные величины характеристик согласуются с известными экспериментальными данными, полученными прямыми измерениями в сваях специальной конструкции. Исходным материалом всех проведенных расчетов являются данные 2-го и 4-го столбцов таблицы 2, заим-

ствованные из работы [5], с. 159–160.

Таким образом, испытания свай на площадке г. Мирного в 1961–1964 гг., известные среди фундаментостроителей как неудавшиеся, вполне реабилитированы представленной методикой обработки результатов, оказавшейся эффективной благодаря достаточному числу одновременно испытанных свай.

### Общие требования

#### к совместным испытаниям свай

Совместная обработка результатов испытаний свай, установленных на площадке в условиях общих инженерно-геологических элементов, допустима только при одинаковой или близкой температуре вечномерзлых грунтов в естественных условиях. Характеристики грунтов, полученные в результате обработки материалов испытаний, можно распространять с соответствующими коррективами на те же грунты с иной температурой, в рамках ее сезонных изменений.

Принятые вариации совместных испытаний свай должны обуславливаться, предпочтительно, только значениями параметра  $L = l_f / b$  из формулы (4). Полный диапазон изменений этого параметра ограничен интервалом  $8 \leq L \leq 25$ , и двукратная вариация значения  $L$  в испытаниях, видимо, оптимальна.

Отметка пяты свай, испытываемых совместно, не должна выходить за пределы одного инженерно-геологического элемента по разрезу. Состав пульпы, заливаемой в скважины перед установкой свай, должен быть неизменным.

Перечисленные требования минимальны для гарантии сходимости и достоверности результатов обработки материалов испытаний вмороженных свай.

### Список литературы

1. ГОСТ 24546-81. Сваи. Методы полевых испытаний в вечномерзлых грунтах. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 24 с.
2. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 53 с.
3. Вялов, С. С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов / С. С. Вялов. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 190 с.
4. Гурьянов, И. Е. Обработка результатов испытаний свай в вечномерзлых грунтах / И. Е. Гурьянов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 3. – С. 16–17.
5. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии / К. Ф. Войтковский, П. И. Мельников, Г. В. Порхаев и др. – М. : Наука, 1968. – 200 с.

### References

1. USSR Ministry on Construction. 1981. *State Standard GOST 24546-81. Piles. Field Test Methods in Permafrost*. Moscow: Standards Publ., 24 pp. (in Russian)
2. USSR State Committee on Construction. 1990. *Building Code SNiP 2.02.04-88. Foundations in Permafrost*. Moscow: USSR State Committee on Construction, 53 pp. (in Russian)
3. Vyalov, S.S. 1959. *Rheological Properties and Bearing Capacity of Frozen Soils*. Moscow: USSR Acad. Sci. Press, 190 pp. (in Russian)
4. Gur'yanov, I.E. 1987. Processing of results of pile tests in permafrost. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 24 (3): 105-107.
5. Voitkovsky, K.F., Melnikov, P.I., Porkhaev, G.V. et al. 1968. *Foundations on Frozen Ground in Yakutia*. Moscow: Nauka, 200 pp. (in Russian)

## Effect of alternating temperature on the process of frost weathering

V. I. Popov

Mining Institute of the North. 677018, Yakutsk , Lenin Ave., 43. popov.gtf@mail.ru

**Abstract.** As a result of cyclic alternating temperature effects in the array of rocks formed zones of increased contents of ice. Ice formed in the pores within these zones can cause a nonuniform stress-strain state of the surface layer of rocks down to its destruction.

**Keywords:** temperature influence; frost weathering; growth of ice lenses.

## Влияние знакопеременных температурных воздействий на процесс морозного выветривания

В. И. Попов

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: popov.gtf@mail.ru

Россия, 677018, г. Якутск, пр. Ленина, 43, ИГДС СО РАН

**Аннотация.** В результате циклических знакопеременных температурных воздействий в массиве пород образуются зоны повышенного льдонакопления. Лед, образовавшийся в порах в пределах этих зон из-за эффекта пучения, может вызвать неоднородное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя пород вплоть до его разрушения.

**Ключевые слова:** температурное воздействие; морозное выветривание; льдонакопление.



## Влияние знакопеременных температурных воздействий на процесс морозного выветривания

В. И. Попов

При выветривании горных пород протекают физико-механические, химические и биологические процессы. Довольно часто можно наблюдать прогрессирующее развитие процессов выветривания, приводящее к изменению физико-технических свойств пород и материалов горнотехнических сооружений. Для обеспечения их устойчивости и долговечности эти изменения необходимо прогнозировать.

Основной причиной морозного выветривания является перераспределение влаги и ее замерзание, которое в условиях стесненного порового пространства приводит к возникновению значительных разрушающих напряжений.

Проблема миграции влаги и последующего образования линз льда в промерзающих, оттаивающих и мерзлых породах, является одной из наиболее сложных. В процессе промерзания дисперсной породы нарушается ее термодинамическое равновесное состояние. Даже в однородной системе появляются термодинамические силы и потоки, существенно меняющие первоначальное распределение влаги и солей [1].

К настоящему времени известны теоретические и экспериментальные материалы по исследованию процессов миграции влаги и льдонакоплению в промерзающих породах. В работе [2] установлено, что причиной миграции влаги является градиент общего термодинамического потенциала. При этом для сегрегационного льдовыделения должны соблюдаться некоторые теплофизические и физико-механические условия.

Экспериментальные исследования термодиффузионного коэффициента незамерзшей влаги указывают на преобладающее значение в суммарном потоке диффузионного переноса [3]. Поэтому массоперенос в мерзлых однородных грунтах при наличии градиента температуры можно описать диффузионной моделью (потоки пропорциональны градиенту незамерзшей воды).

Построение системы уравнений переноса тепла и массы в дисперсном материале при промерзании-оттаивании требует учета диффузионно-конвективных потоков тепла и массы и локального изменения влагосодержания и концентрации порового раствора при фазовых превращениях вода-лед. Основной

вычислительной схемой расчета подобных задач является метод эффективной теплоемкости. Но он требует значительных итерационных процедур.

Нами предложен метод [4] решения задач тепломассопереноса в горных породах при фазовых превращениях (лед-вода) основанный, на процедуре расщепления уравнений переноса по физическим процессам в подсистемах исходной области, совпадающих с её сеточным разбиением. При этом, в соответствии с процедурой, подсистемы открыты для процессов переноса и замкнуты для процессов фазовых превращений и массообмена (хим. реакций). Метод может быть распространен для исследования фазовых превращений в других материалах.

В конкретном случае математическая модель процесса тепломассопереноса при промерзании состоит из двух уравнений параболического типа;

1) уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = -\nabla J_T + L\rho l_f; \quad (2)$$

2) уравнение диффузии влаги:

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} = -\nabla J_w - I_f; \quad (3)$$

диффузионные потоки имеют вид:

$$\begin{aligned} J_w &= -K\nabla w - K\delta_{TW}\nabla T; \\ J_q &= -\lambda\nabla T + c_w\rho_w T J_w. \end{aligned} \quad (4)$$

Система уравнений диффузии тепла и влаги решается локально-одномерным методом. Разностные соотношения получены интегроинтерполяционным методом. Система (2-3) дополнительно замыкается уравнением состояния поровой влаги (5), что позволяет учесть специфические характеристики среды - потенциал адсорбционного взаимодействия, величину удельной поверхности, концентрацию порового раствора, а также определять локальные равновесные значения влаги и льдосодержания.

$$T_F = T_F(w; C) \quad (5)$$

На диаграмме рисунка 1 представлена взаимосвязь расщепленных процессов: теплопроводности - (вектор 1-2); фазового превращения - (вектор 2-3); и путь подсистемы по траектории фазового превращения определяе-

мый уравнением фазового равновесия (голономная связь) (вектор 1-3). При этом, переход  $T_1 \rightarrow T_2$  определяется решением разностного аналога уравнения теплопроводности, и температура  $T_2$ , отражая энергетический баланс процесса носит фиктивный характер (не учитывает фазовый переход). Переход  $T_2 \rightarrow T_F$  определяется решением уравнения теплового баланса при фазовом превращении. Путь  $T_1 \rightarrow T_F$  на поверхности фазовой диаграммы, аппроксимируется с точностью до бесконечно малых величин первого порядка

$$T_F = T_1 + (\partial T_F / \partial w) \cdot \Delta w$$

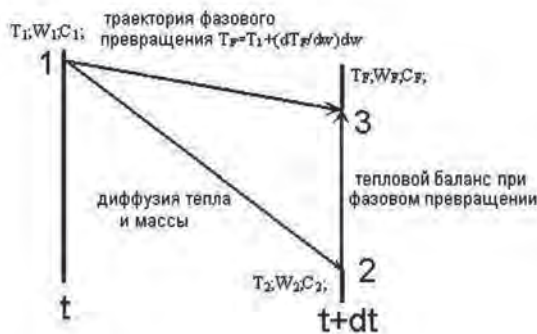


Рис. 1. Диаграмма расчета расщепленных процессов теплообмена.

В результате этих действий становится возможным, определить сток влаги в расчетном узле при фазовом превращении в виде формульного выражения

$$\Delta w = c(T_2 - T_1) / (L + T_1(c_w - c_{ICE}) + c \partial T_F / \partial w).$$

Аналогичная схема, в более усложненном варианте может быть использована для моделирования процесса тепло-влаго-солепереноса в горных породах и других материалах при фазовых превращениях.

Данный метод, используя последовательные во времени узловые значения температуры и концентрации с учетом их связи в виде уравнения фазового равновесия, позволяет линеаризовать задачу с фазовым превращением на каждом временном шаге и обеспечивает точный численный прогноз тепло-влаго-солепереноса при промерзании горных пород. Результаты сравнения с имеющимися моделями теплопереноса при фазовых превращениях показали, что за счет изменения параметров уравнения фазового равновесия (удельной поверхности и поверхностного потенциала), предложенный метод позволяет единым образом решать сложные многомер-

ные задачи кристаллизации, как в постановке Стефана, так и с фазовым переходом в спектре температур. Возможно его применение для моделирования других типов процессов теплопереноса, при этом необходимым является существование аналитического выражения фазовой диаграммы процесса фазового превращения.

Рассмотрим результаты математического моделирования процессов теплопереноса при граничных условиях третьего рода и гармоническом изменении знакопеременной температуры среды от времени в соответствии с выражением [5].

$$T_{CP} = A_{CP} + A \cos(\omega(t - t_0)) \quad (6)$$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования задачи (2-3) для условий замкнутой по массе системы, на временном интервале - 96 часов и пространственном - 0.5 м. Характер изменения температуры среды был выбран соответствующим периоду колебаний ~2 часа (в минутах):

Частота колебаний достаточно высока и температурные возмущения (осцилляции) проникают глубоко массива примерно на 0,12-0,2 м. Вблизи поверхности, где существенно проникновение температурных колебаний, результаты моделирования теплопереноса отличаются. Для постоянной температуры среды вблизи поверхности характерно повышение льдистости. В случае действия знакопеременной температуры (рис. 2) напротив наблюдается иссушение поверхностного слоя.

Предельная глубина неоднородного локального льдонакопления увеличивается с уменьшением частоты колебаний. Полученные результаты, могут служить отправной точкой для моделирования процессов теплопереноса в устьевых и других, нагруженных по температурным условиям, участков горнотехнических сооружений.

Таким образом, мы установили что при воздействии знакопеременных температур на поверхность влагосодержащих горных пород в них возникает перераспределение влаги приводящее к появлению зон с неоднородным льдонакоплением. В зависимости от частоты знакопеременного температурного воздействия, льдонакопление может происходить как вблизи поверхности так и на значительном удалении в глубине массива горных пород. Можно выделить два типа поверхностного льдонакопления а) при воздействии знакопеременных температур на талые породы и б) при их воздействии на промерзшие породы.

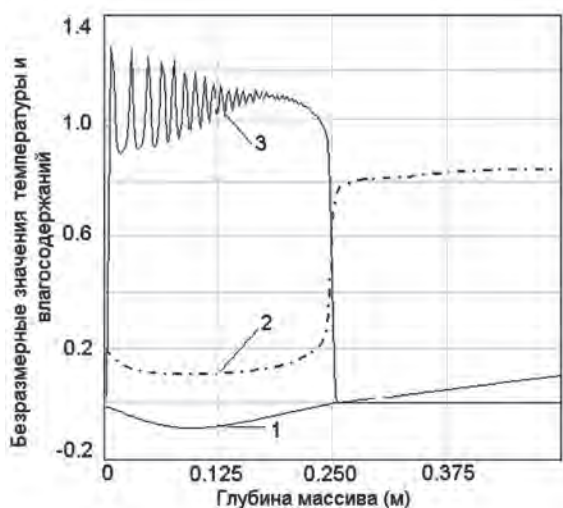


Рис. 2. Распределение полей температуры (1) -  $(T-273,15)/T_n$ , влагосодержания (жидкая фаза) (2) -  $w/w_0$ , льдосодержания (3) -  $lod/w_0$ , при циклическом изменении температуры среды ( $T_n=40^\circ\text{K}$  ;  $w_0=0,2$ ).

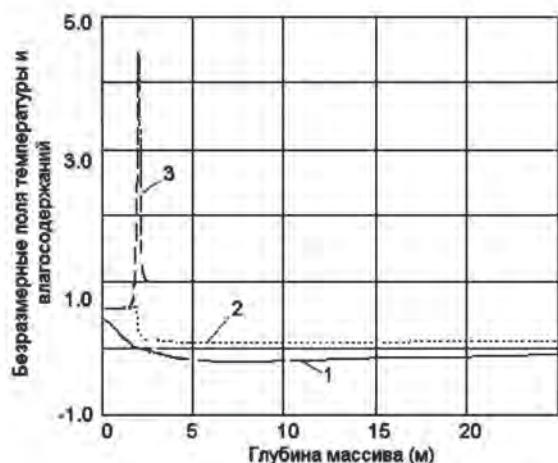


Рис. 3. Распределение полей температуры (1) -  $(T-273,15)/T_n$ , влажности (жидкая фаза) (2) -  $w/w_0$ , и суммарная влажность (3) -  $(lod+w)/w_0$ . Начальная температура минус  $4^\circ\text{C}$ , периодическое изменение температуры на поверхности ( $T_n=40^\circ\text{K}$  ;  $w_0=0,2$ ).

Результатами моделирования определено, что влияние знакопеременных температур на поверхность протаивающего массива приводит к формированию предпочтительно одной но достаточно мощной зоны повышенного льдонакопления на границе с мерзлой частью массива. В то время как в остальных случаях возможно образование нескольких линз в зависимости от частотных параметров теплового воздействия.

Схематично эти процессы можно связать с весенним и осенне-зимним сезонами соот-

ветственно. При этом отметим, что процесс весеннего льдонакопления отличается более интенсивным характером (рис. 3).

Величину удельной нагрузки оценим в соответствии с соотношением

$$p = e1 \cdot 0,09 \cdot E,$$

где

$$e1 = (\rho_{cx} \cdot (w + 1.1 \cdot Lod) / \rho_w - Por \cdot 0.85) \geq 0$$

избыточное по сравнению с объемом порового пространства ( $por$ ) льдосодержание.

Напряженный поверхностный слой может разрушиться от действия нормальных сил что зависит от соотношения пределов прочности на растяжение а также характера распределения неоднородного льдонакопления. На рисунке 4 приведены расчетные распределения вертикальных поверхностных нагрузок при неоднородном льдообразовании вблизи боковой поверхности выработки (Попов В.И. 2010). Несмотря на разницу пространственных масштабов происходящие физические процессы аналогичны.



Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений по глубине.

### Список литературы

1. Комаров, И. А. Термодинамика и тепло-массообмен в дисперсных мерзлых породах / И. А. Комаров. – М. : Научный мир, 2003. – 608 с.
2. Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах / Под ред. Э. Д. Ершова. – М. : МГУ, 1985.
3. Чеверев, В. Г. Природа криогенных свойств грунтов / В. Г. Чеверев. – М. : Научный мир, 2004. – 234 с.
4. Попов, В. И. Решение задач тепломассопереноса при промерзании – оттаивании горных пород с учетом уравнения фазового состояния поровой влаги. ГИАБ / В. И. Попов, А. С. Курилко // Тематическое приложение «Физика горных пород». – 2006. – С. 236–244.

5. Общее мерзлотоведение / Под ред. В. А. Кудрявцева. – М. : изд-во МГУ, 1978. – 464 с.

6. Попов, В. И. Влияние переноса влаги на формирование неоднородного напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг выработки в условиях криолитозоны / В. И. Попов // Геодинамика и напряженное состояние недр земли: труды Всероссийской конференции. – Новосибирск, 2010. – С. 153–157.

### References

1. Komarov I.A. 2003. *The thermodynamics heat and mass transfer in frozen rocks*. Moscow, Scientific world, 608 pp. (in Russian)

2. *Deformation and stresses in frozen and thawing rockst*. 1985. Ed. By Ershov E.D. M.: MGU,. (in Russian)

3. Cheverev V.G. 2004. *The nature cryogenic characteristic of soil*. M.: Scientific world. -234 pp. (in Russian)

4. Popov V.I., Kurilko A.S. 2006. Decisions of the problems heat and mass transfer in freezing – thawing rocks with provision for equations of the phase states pore water. GIAB. - *Thematic exhibit "Physics of the mountain sorts"*: 236-244. (in Russian)

5. *The general permafrost*. 1978. Ed. by V.A. Kudryavcev. M., MGU - 464 pp. (in Russian)

6. Popov V.I. 2010. The Influence of the carrying water on shaping lumpy stressed- deformed conditions of the rocks in permafrost. *Geodinamika and tense condition bowels of the earth. The Works to Allrussian conference*. The Institute of mining SB RAS, Novosibirsk: 153-157. (in Russian)



## **Automation of modeling shore reorganization processes of reservoirs in the permafrost zone**

I.S. Sobol, D.N. Khokhlov

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65 Iljinskaya Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: (831) 430-42-89;  
e-mail: gs@nngasu.ru

**Annotation.** The article presents mathematical formula and describes computer models of reformation of thermoabrasion and thermokarst shores of reservoirs in the permafrost zone, as well as their extreme condition. The developed software permits to provide various forecasts of shore reformation for project substantiation and reservoir monitoring. The description is accompanied by an example of calculation of shore reformation of the reservoir on the Amgueme River.

**Key words:** permafrost; reservoirs; shores; thermoabrasion; thermokast.

## **Автоматизация инженерных расчетов берегопереформирований на водохранилищах криолитозоны**

И. С. Соболев, Д. Н. Хохлов

ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».  
Россия, 603950, г.Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-42-89;  
эл. почта: gs@nngasu.ru

**Аннотация.** Представлена математическая формулировка и описаны компьютерные модели процесса переформирования термоабразионных и термокарстовых берегов водохранилищ в области вечной мерзлоты, а также их предельного состояния. Созданный аппарат позволяет выполнять варианты прогнозы берегопереформирований для обоснования проектов и при ведении мониторинга водохранилищ. Описание сопровождается расчетным примером переформирования берега водохранилища на реке Амгуэме.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота; водохранилища; берега; термоабразия; термокарст.

# Автоматизация инженерных расчетов берегопереформирований на водохранилищах криолитозоны

И. С. Соболев, Д. Н. Хохлов

## Введение

Берега водохранилищ в криолитозоне, сложенные рыхлыми мерзлыми породами, разрушаются под воздействием энергии ветровых волн (термоабразионные берега) и проявлений термокарста (термокарстовые берега). В предшествующие годы было сделано аналитическое описание берегопереформирования [1, 2, 3]. Далее методы развиты и автоматизированы на современном уровне компьютерных технологий. Итоги автоматизации освещаются в данной работе.

## Инженерные модели берегопереформирований

Формализованные схемы переформирования берегов представлены на рис. 1. В условиях волнения преобладает термоабразия и переформирование берега является циклическим процессом. Каждый цикл включает: выработку термоабразионной ниши в подножии надводного уступа с обрушением нависающего над ней берега; оттаивание обрушившегося массива грунта водой; размыв оттаявшего грунта волнами и формирование отмели при тепловой осадке ее основания (рис. 1а). При отсутствии волнения берег переформируется вследствие оттаивания и осадки льдистых дисперсных пород (термокарста). Процесс носит монотонный характер (рис. 1б). Предельное состояние берега характеризуется профилем волноустойчивой отмели в пределах размывающего действия волн (рис. 1в).

Математическая формулировка берегопереформирований в соответствии со схемами процесса приведены в табл. 1.

На схемах (рис. 1) и в уравнениях (табл. 1) обозначено:

$Z_6, X_6$  – координаты береговой линии, м;

$Z_{ск}, X_{ск}$  – координаты кровли непросадочного (скального) грунта, м;

$Z_{vb}$  – аппликата уровня воды, м;

$Z_в, X_в$  – координата верхней границы размывающего действия волн, м;

$Z_н, X_н$  – координата нижней границы размывающего действия волн, м;

$\vartheta_н$  – начальная температура мерзлого берега, °C;

$\vartheta_3(t)$  – температура воды, °C;

$\vartheta_ф$  – температура таяния льда в грунте, °C;

$\xi_{ни}(t_{ни})$  – глубина ниши, м;

$t_{ни}$  – время выработки ниши, с;

$b$  – толщина слоя оттаявшего грунта на поверхности берегового уступа, м;

$\alpha(t)$  – коэффициент теплоотдачи между водой и берегом, Вт/(м·град);

$a_{мг}$  – коэффициент температуропроводности мерзлого грунта, м/с;

$\gamma_{л} \cdot \omega \cdot L$  – удельное тепло таяния льда в грунте по объему, Дж/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{мг(гр)}$  – коэффициент теплопроводности мерзлого (талого) грунта, Вт/(м·град);

$\xi_{д}(t)$  – глубина оттаивания дна водохранилища, м;

$\delta$  – относительная осадка оттаявшего слоя грунта;

$s$  – тепловая осадка дна водохранилища, м;

$\sigma_p$  – растягивающее напряжение в заделке консоли, Па;

$\sigma_{max}$  – максимальное растягивающее напряжение в заделке консоли, Па;

$W_{отт}(t_{отт})$  – объем оттаявшего грунта берега, м<sup>3</sup>;

$t_{отт}$  – время оттаивания обрушившегося массива грунта, с;

$F$  – площадь контакта обрушившегося массива грунта с водой, согласно схеме процесса назначается как  $F=(z_в-z_{vb})$ , м<sup>2</sup>.

$W_{рк}(t_{рк})$  – объем размываемого талого грунта берега, м<sup>3</sup>;

$t_{рк}$  – время размыва обрушившегося массива грунта, с;

$K_p$  – коэффициент размываемости грунта берега в талом состоянии, м<sup>3</sup>/Дж;

$E(t)$  – энергия волнения, отнесенная к 1 пог. м берега, Дж/с.

$T$  – число лет прогноза переформирования, годы;

$I_{отм}$  – уклон прибрежной отмели;

$I_{пс}$  – уклон подводного склона отмели, равный тангенсу угла естественного откоса грунта отмели во взвешенном в воде состоянии;

$W$  – объем размываемого грунта, м<sup>3</sup>;

$W_a^p$  – объем аккумулированного грунта, м<sup>3</sup>;

$k_a$  – коэффициент аккумуляции;

$\omega$  – пористость талого грунта;

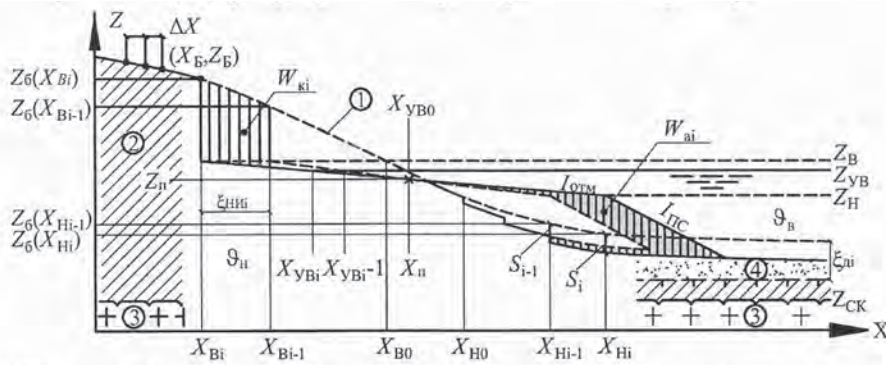
$n$  – льдистость мерзлого грунта;

$\xi$  – предельное протаивание просадочной толщи грунта, м;

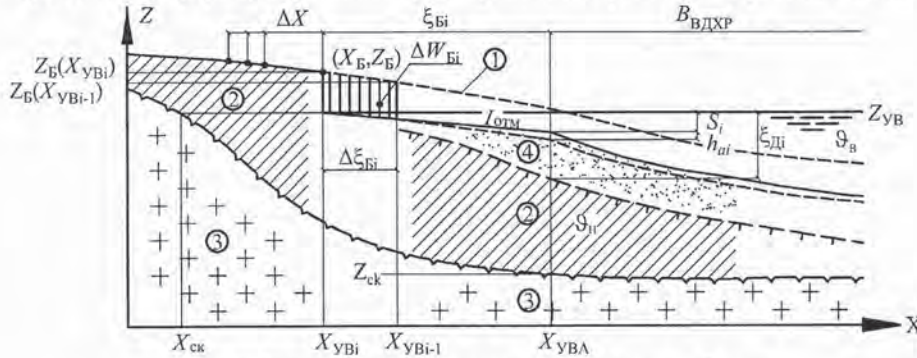
$S$  – предельная осадка просадочной толщи грунта, м;

$L$  – предельное отступление берега, м.

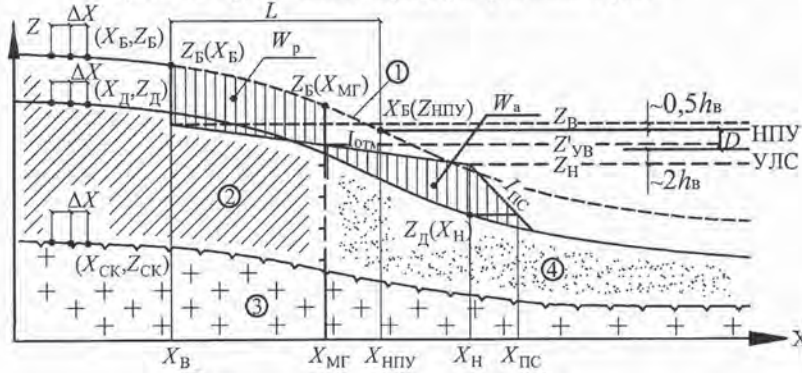
а) Схема переформирования термоабразионного берега при волнении



б) Схема переформирования термокарстового берега при отсутствии волнения



в) Схема предельного переформирования берега



- ① Первоначальное положение берега
- ② Мерзлый дисперстный грунт
- ③ Скальная порода
- ④ Галый дисперстный грунт

Рис. 1. Схемы берегопереформирования.

Таблица 1. Математическое описание переформирования мерзлых берегов водохранилищ

Величина	Уравнение
<i>Термоабразионный берег</i>	
Глубина выработки термоабразионной ниши в надводном береговом откосе	$\frac{d\xi_{ни}(t_{ни})}{dt_{ни}} = \frac{1}{\gamma_s \omega L} \left[ \lambda_{мг} \cdot \frac{\vartheta_{н} - \vartheta_{\phi}}{\sqrt{\pi \cdot a_{мг} \cdot t_{ни}}} - \lambda_{тр} \cdot \frac{\alpha(t) \cdot (\vartheta_{\phi} - \vartheta_a(t))}{\alpha(t) \cdot b + \lambda_{тр}} \right], \quad (1)$ $\xi_{ни}(0) = b, t_{ни} \geq 0$
Глубина оттаивания дна водохранилища	$\frac{d\xi_a(t)}{dt} = \frac{1}{\gamma_e \omega L} \left[ \lambda_{ia} \cdot \frac{\vartheta_i - \vartheta_{\delta}}{\sqrt{\pi \cdot a_{ia} \cdot t}} - \lambda_{oa} \cdot \frac{\vartheta_{\delta} - \vartheta_a(t)}{\xi_a(t) \cdot (1-b)} \right], \quad (2)$ $\xi_a(0) = 0, t \geq 0$



Величина	Уравнение
Тепловая осадка дна водохранилища	$\frac{ds(\xi_a)}{d\xi_a} = \delta, s(0) = 0, z_6(x) - \xi_a(t) \geq z_{ck},$ $\frac{ds(\xi_a)}{d\xi} = 0, z_6(x) - \xi_a(t) \leq z_{ck}$ (3)
Объем консоли грунта нависающего над термоабразионной нишей	$W_k(\xi_{ни}) = \int_0^{\xi_{ни}} (z_6(x) - z_n) \cdot d\xi_{ни}, W_k(0) = 0$ (4)
Максимальное напряжение в заделке консоли	$\sigma_{max}(\xi_{ни}) = \frac{3 \cdot W_k(\xi_{ни}) \cdot \gamma_{mr} \cdot g \cdot \xi_{ни}}{h_6^2(x)}, \sigma_{max}(0) = 0$ (5)
Условие обрушения консоли	$\sigma_{max}(\xi_{ни}) \geq \sigma_p$ (6)
Оттаивание обрушившегося грунта	$\frac{dW_{i00}(t_{i00})}{dt_{i00}} \cdot [(\gamma_n)_{ia} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_i) + \gamma_e \omega L] = \alpha(t) \cdot (\vartheta_a(t) - \vartheta_0) \cdot F$ (7)
Размыв обрушившегося и оттаявшего грунта	$\frac{dW_{pk}(t_{pk})}{dt_{pk}} = K_p \cdot E(t)$ (8)
Продолжительность цикла термоабразии	$t_i - t_{i-1} = t_{ни} + t_{отт}, t_{отт} \geq t_{pk},$ $t_i - t_{i-1} = t_{ни} + t_{pk}, t_{отт} < t_{pk}$ (9)
Поверхность отмели на разрезе берега в пределах размывающего действия волн	$\frac{x - x_n(t)}{x_b(t) - x_n(t)} = \frac{z - z_n}{z_b - z_n}$ (10)
Уклон отмели	$I_{отм}(t) = (z_b - z_n) / (x_n(t) - x_b(t))$ (11)
Объем размываемого грунта	$W_{pi} = W_{ki} + \frac{1}{2} (x_{si-l} - x_{si}) \cdot (z_a - z_n)$ (12)
Объем аккумулярованного грунта	$W_{ai} = \frac{1}{2} (x_{w-1} - x_{w-2}) \cdot (z_n - z_a) + \int_{x_{w-1}}^{x_w} (z_n - z_6(x) + s_i) \cdot dx + \frac{1}{2} \frac{h_{отм}^2}{l_{отм}} - \frac{1}{2} \frac{h_{отм-1}^2}{l_{отм-1}}$ (13)
Баланс объемов размываемого и аккумулярованного в отмели грунта	$W_{ai} = [1 - (\omega - n)] \cdot k_a \cdot W_{pi}, \omega > n,$ $W_{ai} = k_a \cdot W_{pi}, \omega \leq n$ (14)
<i>Термокарстовый берег</i>	
Толщина слоя грунта, удерживающегося на тающем уступе	$b \leq \frac{\tau_{дл}}{\gamma_{гг} \cdot g \cdot \sin \varphi}$ (15)
Скорость смещения надводно-подводного уступа в сторону берега	$\frac{d\xi_B(t)}{dt} = \frac{1}{\gamma_a \omega L} \left[ \lambda_{mr} \frac{\vartheta_n - \vartheta_\phi}{\sqrt{\pi \cdot a_{mr} \cdot t}} - \lambda_{tr} \frac{\vartheta_\phi - \vartheta_b(t)}{b} \right]$ (16)
Объем разрушений берега	$W_B(t) = \int_0^{\xi_B} (z_6(x) - z_{yB}) d\xi, W_B(0) = 0$ (17)
Объем аккумулярованного грунта	$W_a(t) = [1 - (\omega - n)] \cdot K_a \cdot W_B(t), \omega > n,$ $W_a(t) = K_a \cdot W_B(t), \omega < n$ (18)
Слой аккумулярованного грунта для половины и целого сечения водохранилища	$h_a(t) = W_a(t) / [B_{вдп} / 2 + \xi_B(t)], h_a(0) = 0,$ $h_a(t) = W_{a1}(t) + W_{a2}(t) / [B_{вдп} + \xi_B(t)], h_a(0) = 0$ (19)
Оттаивание подводного берегового склона	$\frac{d\xi_a(t)}{dt} = \frac{1}{\gamma_a \omega L} \left[ \lambda_{mr} \frac{\vartheta_n - \vartheta_\phi}{\sqrt{\pi \cdot a_{mr} \cdot t}} - \lambda_{tr} \frac{\vartheta_\phi - \vartheta_b(t)}{\xi_a(t) \cdot (1 - \delta) + h_a(t)} \right],$ $t \leq 0; \xi_a(0) = S(0) = h_a(0) = 0$ (20)
Осадка дна	$S(t) = \delta \cdot \xi_a(t) - h_a(t)$ (21)
<i>Предельное состояние берега</i>	
Предельное протаивание просадочной толщи грунтов	$\xi = z_6 - z_{ck}$ (22)
Предельная осадка	$S = \xi \cdot \delta$ (23)
Апplikата дна	$Z_a = Z_6 - S$ (24)



Величина	Уравнение
Поверхность отмели на разрезе берега в пределах размывающего действия волн	$\frac{x - x_n}{x_b - x_n} = \frac{z - z_n}{z_b - z_n} \quad (25)$
Уклон отмели	$I_{отм} = \frac{z_b - z_n}{x_n - z_b} \quad (26)$
Граница раздела талого и мерзлого грунтов берегового склона (полагается вертикальной линией $x = x_{мг}$ )	$x_{мг} = \frac{1}{I_{отм}} (z_n - z'_{yb}) + x_n \quad (27)$
Объем размывтого грунта	$W_p = \int_{x_{мг}}^{x_b} (z_b(x) - z_n) dx + \frac{1}{2} (x_{мг} + x_b) \cdot (z_b - z'_{yb}) \quad (28)$
Объем аккумулярованного грунта	$W_a = [1 - (\omega - n)] \cdot K_a \cdot W_p, \quad \omega > n, \quad (29)$ $W_a = K_a \cdot W_p, \quad \omega \leq n$
Предельное отступление берега	$L = x_b(z_{НПУ}) - x_n \quad (30)$

### Алгоритмы и программа расчетов

Для реализации инженерных моделей берегопереформирования согласно математической модели (таблица 1) составлена программа «Берега».

Программа написана на языке «Borland Delphi 7.0» и работает под управлением операционных систем семейства «Windows». Она обладает всеми необходимыми для работы функциями: пользовательским интерфейсом; справкой с описанием порядка работы; возможностью ввода и редактирования исходных данных в окне редактора программы; визуализацией результатов расчетов в виде сечений и плана берега; выводом результатов расчетов в файл. Предусмотрена возможность интерпретировать результаты в графический вид.

### Пример

На примере с берегом проектируемого на Чукотке Амгуэмского водохранилища показана реализация инженерных моделей термоабразии.

Река Амгуэма выше створа образует излучину, огибая так называемый перешеек. Этот перешеек является продолжением правобережного примыкания плотины и входит в состав напорного фронта. Существуют опасения того, что перешеек может быть разрушен на всю ширину процессом термоабразии.

Перешеек сложен ледниковыми и озерно-аллювиальными четвертичными гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным и

супесчано-суглинистым заполнителем. Породы находятся в вечномерзлом состоянии. Ветровые волны являются определяющим фактором в процессе переформирования перешейка. Льдистые дисперсные грунты его склона разрушаются процессом термоабразии.

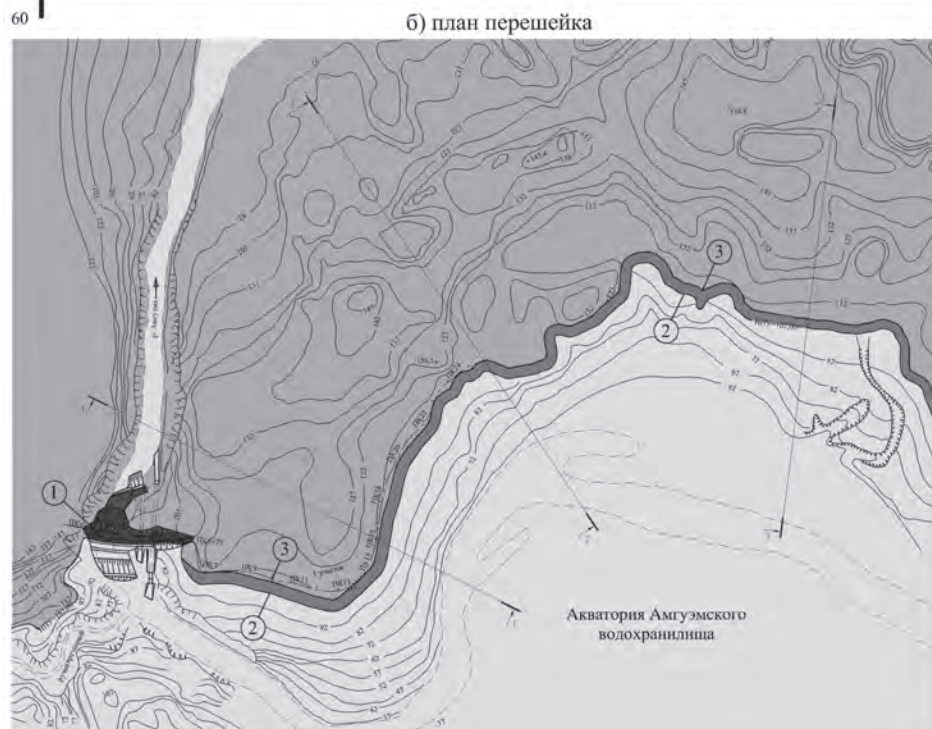
Результаты прогноза представлены на рис. 2 в виде профиля берега в одном из рассмотренных сечений и плана перешейка в состоянии на момент в 22 года от начала переформирования. За это время урез НПУ водохранилища отступает на величину 59 м в сторону берега в исследуемом створе и образуется волноустойчивая отмель. Далее приходит стадия замедленного берегопереформирования (динамического равновесия). Разрушения перешейка в первые десятилетия не произойдет, так как его ширина составляет 750 м.

### Заключение

Опыт для нескольких водохранилищ криолитозоны показал, что применение описанной методики и программы в инженерных расчетах позволяет получить результаты, согласующиеся с современными качественными и количественными представлениями о процессе берего-переформирования.

### Источник финансирования

Работа выполнена в составе АБЦП "Развитие научного потенциала высшей школы", 2009-2010 гг; № Гос. Рег. 01200902465.



① Плотина гидроузла ② Положение уреза воды на отметке НПУ до начала переработки берега ③ Положение уреза воды на отметке НПУ после переформирования берега в течение 22 лет

Рис. 2. Результаты расчетов переформирования термоабразивного берега водохранилища Амгуэмской ГЭС.

### Список литературы

1. Соболев, С. В. Термоабразия берега водохранилища при волнении / С. В. Соболев // Известия вузов. Строительство. – 1992. – № 1. – С. 68–72.
2. Соболев, С. В., Битюрин А.К., Соболев И.С. Прогноз термокарста в ложе водохранилища / С. В. Соболев, А. К. Битюрин, И. С. Соболев // Инженерно-геологическое изучение термокарстовых процессов и методы управления ими при строительстве и эксплуатации сооружений: Материалы IV научно-методического семинара. – Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Веденеева, 1998. – С. 76–80.
3. Соболев И. С., Хохлов Д. Н. Развитие аналитического описания переформирования берегов водохранилищ в криолитозоне / И. С. Соболев, Д. Н. Хохлов // Приволжский научный журнал. – 2010. – № 1. – С. 72–80.

### References

1. Sobol S.V. 1992. Thermoabrasion of a reservoir shore at high waves. *Izvestia Vuzov. Stroitelstvo*, 1992. – N 1: 68 – 72 (in Russian)
2. Sobol S.V., Bityurin A.K., Sobol I.S. 1998. Fore-cast of thermokast in a reservoir floor / *Engineering Survey of Thermokast Shores and Study of Methods of Thermokast Process Control During Construction and Exploitation of Structures: Proceedings of the IV Scientific Workshop*. Saint Petersburg: Vedeneev VNIIG. 76 – 80 (in Russian)
3. Sobol I.S., Khokhlov D.N. 2010/ Development of the analytical description of reorganization of frozen reservoirs in the permafrost zone/ *The Privolzhsky Scientific Journal*, 1: 72 – 80 (in Russian)

# Modeling of geological cryogenic processes under changing natural and technogenic conditions

S.O. Razumov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: razumov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** The data on cryogenic deformation rates of a surface under various frost climatic and technogenic conditions for Yakutia are given. The mathematical model of cryogenic morphogenesis under the impact of the technogenic factors and climatic changes is offered. A man-induced component of the cryogenic deformations of a surface may exceed natural component by 5-15 times under the strong external influences on a frozen ground. Thus rate of local destruction of frozen deposits with macro-ice content 20-40% may reach 15-24 m/year. If the ice content of soil less than 15% cryogenic processes will develop in 2-5 times less active in the same conditions. Their speed did not exceed 7-8 m/year. The risks of use of natural resources will be 3 times lower. At small man-caused loads reaction of permafrost is directed towards some reduction of technogenic impact, and cryogenic processes will be developed with the speed of not more than 2-3 m/year.

In case warming of season thawing on 2°C to the middle of the 21 century cryogenic processes in the north of Yakutia in areas with ice content of soil more than 20% will develop catastrophically under intensive use of natural resources. In case warming of the summer season on 2°C to the middle of the 21st century cryogenic processes will develop rapidly in the north of Yakutia in conditions of intensive use of natural resources and with ice content in the soil more than 20%.

**Keywords:** cryogenic; technogenic; non-stationary; modeling; soil.

## Моделирование криогенных геологических процессов в изменяющихся природных и техногенных условиях

С. О. Разумов

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: razumov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Приводятся данные о темпах деструктивных криогенных деформаций поверхности в различных мерзлотно-климатических и техногенных условиях Якутии. Предложена математическая модель развития деструктивных криогенных процессов под воздействием техногенных факторов и климатических изменений. В условиях значительных внешних воздействий на мерзлоту техногенная составляющая деструктивных криогенных деформаций поверхности в 5 – 15 раз превосходит естественную составляющую процесса. При этом темп локальных разрушений мерзлых пород с макрольдистостью 20 – 40% может достигать 15 – 24 м/год. Криогенные процессы будут развиваться в 2 – 5 раз менее активно в тех же условиях, если льдистость грунта менее 15%. Их скорость не превысит 7 – 8 м/год, а риски природопользования будут в 3 раза ниже. При малых техногенных нагрузках реакция мерзлоты направлена в сторону некоторого уменьшения эффективности техногенного воздействия, и криогенные процессы будут развиваться со скоростью не более 2 – 3 м/год. В случае потепления сезонного оттаивания на 2° С к середине XXI в. криогенные процессы будут развиваться катастрофически на севере Якутии, в условиях интенсивного использования природных ресурсов и содержания льда в грунте более 20%.

**Ключевые слова:** криогенный; техногенный; нестационарный; моделирование; дисперсный грунт.



# Моделирование криогенных геологических процессов в изменяющихся природных и техногенных условиях

С. О. Разумов

## Введение

Интенсивное природопользование в криолитозоне, включающее строительство крупных объектов и линейных сооружений, приводит к формированию сложных природно-техногенных криогенных систем с присущими им особенностями функционирования, связанными с наличием многолетнемерзлых пород, содержащих массивные льды, и их чрезвычайной неустойчивостью к внешним воздействиям. При техногенном воздействии льды разрушаются, инициируя тем самым развитие деструктивных деформаций поверхности: термопросадок, провалов, суффозионно-термоэрозийных образований, рвов и борозд, склоновых процессов – термоденудации и криогенной солифлюкции. Относительные климатические потепления влекут за собой дополнительную активизацию перечисленных процессов.

Количественно оценить устойчивость многолетнемерзлых пород к внешним воздействиям и связанную с ней активность криогенных процессов в складывающихся климатических и геокриологических условиях можно с помощью математического моделирования. В качестве собственных характеристик этих процессов рассматриваются скорость деструктивных деформаций земной поверхности, вызванных деградацией подземных льдов и насыщенных льдом толщ, и частота локальных криогенных явлений на 1 км<sup>2</sup> поверхности или на 1 погонный километр линейных сооружений. Под скоростью деструктивных деформаций подразумевается темп увеличения линейных размеров экзогенных криогенных образований в плане, если направление темпов деградации мерзлоты конкретно не указано в тексте. Эти характеристики функционально зависят от термических и мерзлотно-геологических условий осваиваемых территорий и изменяются в соответствии с их многолетними вариациями и техногенной нагрузкой.

## Взаимодействие естественных и техногенных факторов

Эффективность техногенного воздействия на криолитозону связана с изменениями естественных условий развития территории. Техногенные воздействия могут быть в какой-то степени скомпенсированы затуханием при-

родных процессов при похолодании климата. Наблюдения в районе г. Якутска, в северной таежной зоне и Арктике показывают, что при условной активности техногенных воздействий  $J_m \leq 0,4$  (максимальная ее величина равна 1) и при относительном понижении средних летних температур воздуха на 2–3°С, скорость расширения локальных криогенных образований на поверхности льдистых дисперсных отложений не превысит 3 м/год (рис. 1, 2). При уменьшении техногенных нагрузок в условиях относительного потепления, темпы криогенных процессов могут резко возрасти, но не более чем до 4–6 м/год.

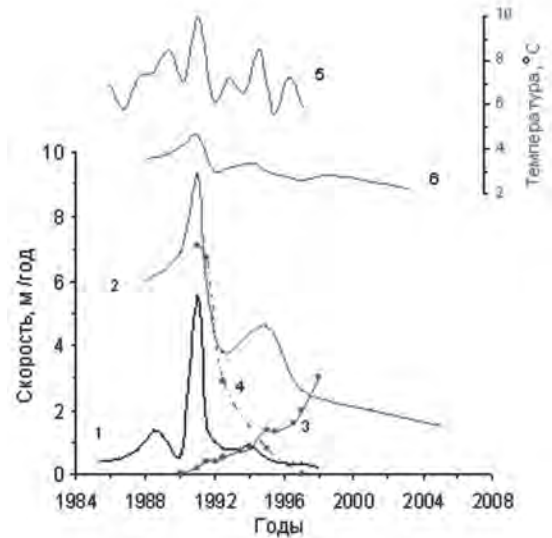


Рис. 1. Скорость деструктивных криогенных процессов в естественных условиях и при техногенном воздействии.

Естественная составляющая скорости: 1 – на поверхности террасы р. Колымы в районе п. Черского; 2 – на побережье Восточно-Сибирского моря в районе мыса Крестовского. Техногенная составляющая скорости: 3 – на поверхности террасы р. Колымы; 4 – на побережье Восточно-Сибирского моря. Изменения средней летней температуры воздуха: 5 – в районе п. Черского; 6 – в районе мыса Крестовского.

В случае сопряженных воздействий техногенных и естественных факторов при относительном повышении средней температуры сезона оттаивания и механическом поражении изолирующего слоя, как, напри-



мер, в районе мыса Крестовского в начале 90-х годов, деструктивные криогенные процессы в льдистых отложениях могут развиваться катастрофически, достигая суммарной (естественная плюс техногенная составляющие) скорости 17 м/год [1].

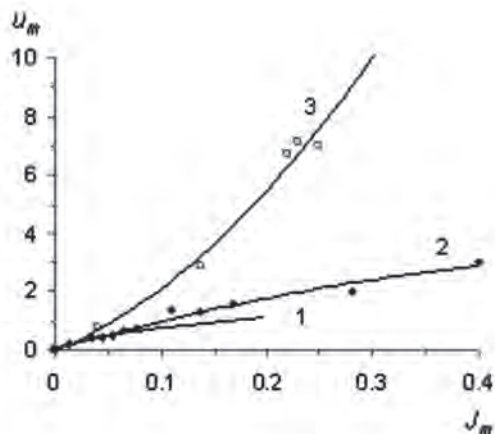


Рис. 2. Изменения техногенной составляющей скорости криогенных процессов при усилении техногенных воздействий на дисперсные грунты с льдистостью от 15 – 30% в таежной зоне до 30 – 70% – в Арктике.

1 – Якутск; 2 – устьевая область р. Колымы; 3 – район мыса Крестовского.

Районирование Якутска по степени активности криогенных процессов показывает (рис. 3), что при плотности капитальной застройки более 20% (I и III участки) их развитие обусловлено в основном антропогенным воздействием.

Для количественной оценки интенсивности криогенных процессов сравнивались три участка. I участок – общая площадь 3,8 км<sup>2</sup>, протяженность автодорог – 9 км, плотность капитальной застройки (отношение площади строений и дорог к площади участка) – 30%, локальных криогенных явлений – 27, заболачиваемая площадь составляет 40% от площади участка. II участок – общая площадь 3,8 км<sup>2</sup>, протяженность автодорог – 3 км, плотность капитальной застройки – 2%, локальных криогенных явлений – 7, заболачиваемая площадь – 15%. III участок – общая площадь 4,6 км<sup>2</sup>, протяженность автодорог – 6 км, плотность капитальной застройки – 21%, локальных криогенных явлений – 15, заболоченная поверхность – 30%.

В условиях климатической "нормы" летней температуры воздуха, льдистости дисперсных грунтов 15 – 30% и активности техногенных воздействий менее 0,1 вертикальная составляющая скорости техногенных

просадок в районе Якутска, по наблюдениям ИМЗ СО РАН в 80-х годах XX в., часто попадала в интервал 0,4 – 0,8 м/год. На естественно развивающихся участках она составляла в среднем 0,03 м/год.

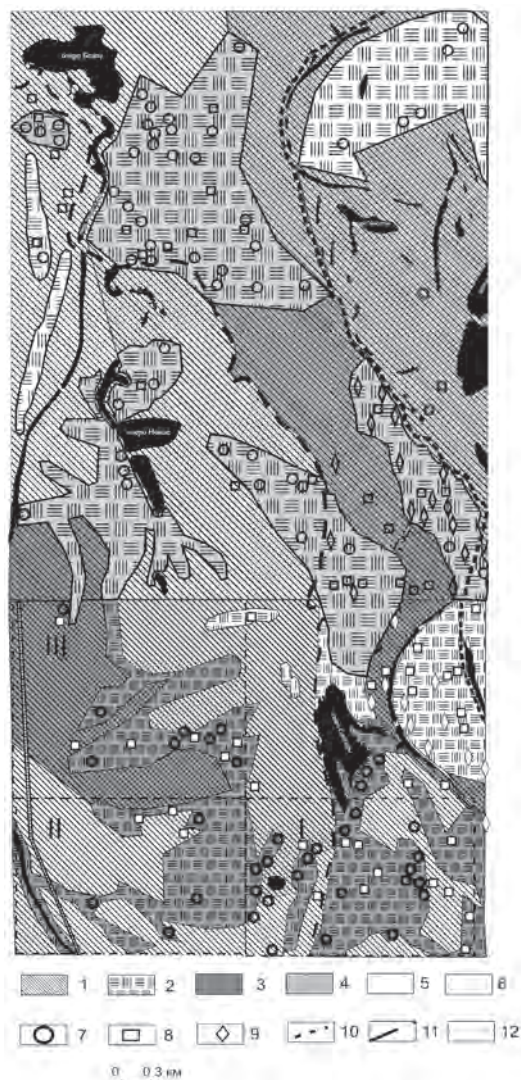


Рис. 3. Схема районирования экзогенных процессов по типам и активности на территории г. Якутска.

Процессы: 1 – суффозионно-термоэрозионные; 2 – термические просадки с последующим заболачиванием поверхности. Активность процессов по 10-балльной шкале: 3 – 5 – 7; 4 – 4 – 5; 5 – 3 – 4; 6 – 1 – 3. Локальные криогенные явления: 7 – термопросадки; 8 – морозобойное растрескивание; 9 – одновременные дифференцированные просадки и морозное пучение грунтов. Границы геоморфологических уровней: 10 – Жатайского; 11 – Сергеляхского. 12 – границы ключевых участков.

Наблюдаемое с 80-х годов XX в. климатическое потепление, которое сопровождалось усилением техногенных воздействий (см. рис. 2), вызвало повышение скорости термических

просадок грунтов с указанной льдистостью до 0,7 – 1,3 м/год, а также избыточное увлажнение и заболачивание поверхности.

### Функциональная структура моделирования криогенных процессов

Скорость деструктивных криогенных деформаций верхнего слоя многолетнемерзлых пород и является функцией трех независимых переменных: средней летней температуры воздуха  $T$ , суммарной льдистости пород  $L$  и индекса активности техногенных воздействий  $J_m$ . Она складывается из естественной  $u_e$  и техногенной  $u_m$  составляющих. Преобразованием полного дифференциала скорости криогенных деформаций можно получить уравнение [2]:

$$u(T, L, J_m) = u_e(T, L) + u_m(T, L, J_m) = u_0 \exp[\mu(T - T')] + k_\varphi \chi(T, L) \cdot J_m \quad (1)$$

Индекс техногенной активности сформулирован в виде:

$$J_m = \sum_{i=1}^M \omega_i \cdot s_{mi}$$

где  $\omega_i$  – вес  $i$ -того техногенного фактора, воздействующего на поверхность мерзлых пород,  $s_{mi}$  – площадь техногенного поражения поверхности действием  $i$ -того техногенного фактора, отнесенная к общей оцениваемой площади. Веса техногенных факторов характеризуют их потенциальную деструктивную энергию, способность понижать устойчивость массива мерзлых пород к воздействию природных факторов, например, посредством отсыпок, разрушений изолирующего слоя, жидких отходов, сухого мусора и т.д. Приблизительная их оценка: 0,6 – механическое повреждение изолирующего слоя, 0,4 – воздействие тепловыделяющих объектов, сброс вод, строительных или бытовых отходов на поверхность.

Коэффициент  $\mu$  зависит от льдистости и механического состава грунта, глубины залегания массивных льдов и устойчивости мерзлоты в естественных условиях. На севере Сибири его величина для дисперсных грунтов с льдистостью 10 – 40% изменяется от 0,5 до 0,8.  $T$  и  $T'$  – средняя летняя температура воздуха и ее климатическая «норма». По наблюдениям в приустьевой области р. Кольмы, скорость деструктивных криогенных деформаций поверхности в условиях климатической "нормы"  $u_0$  находится в пределах 0,2 – 0,6, в Центральной Якутии – менее 0,1 м/год при льдистости рыхлых пород 10 – 40%.

Параметр неустойчивости есть функция летней температуры воздуха и льдистости пород:

$$\chi(T, L) = \chi(T', 0) \exp[0,2(T - T') + 2L].$$

Коэффициент широтной зональности параметра неустойчивости мерзлых пород  $k_\varphi$  в области распространения криолитозоны увеличивается с юга на север. В таежной зоне он изменяется по широте не так значительно, от 0,07 до 0,34 в интервале 62 – 68°с.ш., но при переходе в арктическую область резко возрастает до 1 – 3,5 на 70 – 76°с.ш. [1]. Физический смысл его заключается в усилении реакции мерзлоты на воздействия техногенных факторов в связи с широтной зональностью мерзлотных условий. Доля активности криогенных процессов, обусловленная техногенными факторами (например, строительством насыпей автодорог, кварталов) при  $\partial\chi/\partial J_m = 0$ :

$$u_m = k_\varphi \chi(T', 0) \exp[0,2(T - T') + 2L] \cdot J_m \quad (2)$$

Частота локальных криогенных процессов связана с плотностью коммуникаций, с естественным развитием территории, а также взаимодействием между природными и техногенными факторами:

$$n_S = r_m \cdot u_m \quad (3)$$

Параметр неустойчивости мерзлоты, приведенный к широте исследуемого района, в переменных мерзлотно-климатических условиях изменяется (рис. 4). Коэффициент  $r_m$ , связывающий частоту и интенсивность локальных криогенных процессов, варьирует от 3 до 20 в зависимости от соотношения техногенной нагрузки и широтно-зональных изменений мерзлотно-климатических условий. Например, для Якутска на участках I, II и III (см. рис. 3) коэффициент  $r_m$  составляет 12,8, 10,7 и 8,7, в среднем – 11.

В уравнениях (1), (2) параметр неустойчивости мерзлых пород зависит только от их температуры и льдистости. Результаты исследований пространственно-временных вариаций этого параметра в различных техногенных условиях позволили сформулировать уравнение развития локальных криогенных деформаций с учетом изменений устойчивости мерзлоты ( $\partial\chi/\partial J_m \neq 0$ ) при техногенном воздействии [2]:

$$u^*(T, L, J_m) = \left[ 1 + \frac{\mu}{0,2} \ln \left( \frac{a_m J_m}{\chi(T', L)} + 1 \right) \right] \times u_e(T, L) + k_\varphi \frac{a_m J_m^2}{2} \quad (4)$$

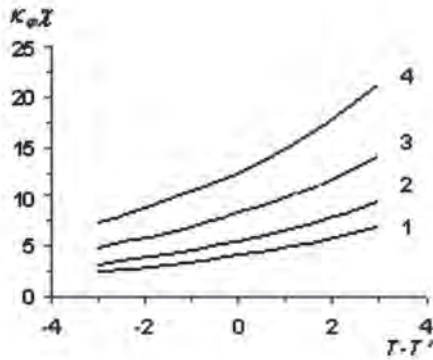


Рис. 4. Зависимость параметра неустойчивости дисперсных мерзлых грунтов, приведенного к широте Якутска ( $k_{\phi}\chi$ ), от аномалий средней летней температуры воздуха ( $T-T^l$ , °C).

Суммарная льдистость пород: 1 – 15%; 2 – 30%; 3 – 50%; 4 – 70%.

Коэффициент техногенной деградации мерзлых пород  $a_m$  численно равен изменению параметра неустойчивости в данных мерзлотно-климатических условиях при возрастании индекса техногенной активности  $J_m$  от 0 до 1. В полосе широт 68 – 75° с.ш. величина этого коэффициента для мерзлых пород с макрольдистостью 10 – 50% не выходит за пределы 50 – 80 при климатической "норме" средней летней температуры воздуха.

В правую часть уравнения (2), которое можно использовать для оценки рисков природопользования в переменных мерзлотно-климатических условиях, следует добавить  $\delta u_m$ , учитывающую дополнительную активизацию или затухание криогенных процессов за счет изменения устойчивости мерзлоты под воздействием техногенных факторов:

$$\delta u_m = u^*(T, L, J_m) - u(T, L, J_m)$$

#### Результаты моделирования развития криогенных процессов в нестационарных природных и техногенных условиях

Расчеты с помощью уравнений (1) – (4) показывают, что для грунтов с льдистостью 15–30% ( $k_{\phi}\chi = 4,7$ ) частота деструктивных криогенных явлений на 1 км автодорог при климатической "норме" и индексы активности техногенных воздействий следующие: I участок – 12 и 0,2; II – 2 и 0,04; III – 6 и 0,15 соответственно. Вертикальная составляющая скорости термических просадок мерзлых дисперсных грунтов при указанном техногенном воздействии оценивается в 0,5 – 1 м/год, что удовлетворительно сходится с данными измерений в 1980-х.

Продолжение климатического потепления в Центральной Якутии вызовет усиление деградации мерзлоты с развитием термокарстовых процессов в льдистых дисперсных грунтах с массивными льдами. В случае повышения средней температуры сезона оттаивания на 2 – 3° C относительно ее средне-многолетней величины (15° C) частота термических просадок в грунтах с льдистостью 15 – 50% может возрасти до 8 – 24 на 1 км, а вертикальная составляющая скорости термических просадок может достигать 2 – 3 м/год. Естественная скорость термических просадок при указанном повышении температуры не превысит 0,1 м/год.

В арктических районах Якутии при значительных внешних воздействиях ( $J_m$  более 0,5) на льдистые многолетнемерзлые породы и повышении средней летней температуры воздуха на 2° C относительно климатической нормы, техногенная составляющая скорости деструктивных криогенных процессов в 5 – 15 раз превосходит естественную составляющую (рис. 5). Суммарный темп локальных разрушений ( $u^*$ ) мерзлых дисперсных пород с макрольдистостью 20 – 40% при указанных климатических изменениях достигает 15 – 24 м/год. Эффективность воздействия техногенной составляющей на мерзлоту (риск природопользования) при потеплении возрастает в 2 раза по сравнению с климатической нормой. В этом случае опосредованное влияние техногенных факторов может превзойти собственно их прямое воздействие.

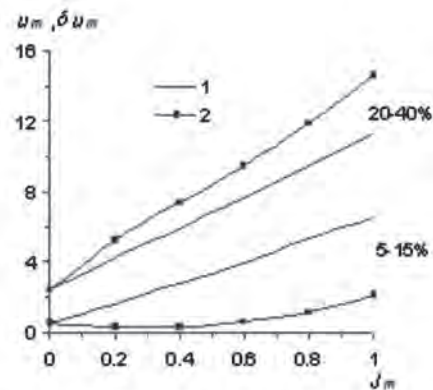


Рис. 5. Изменения скорости деструктивных криогенных процессов в зависимости от техногенной активности в условиях потепления летнего сезона на 2° C и различной льдистости грунтов, %.  
1 – вследствие прямого техногенного воздействия ( $u_m$ , м/год), 2 – дополнительная активизация процессов ( $\delta u_m$ , м/год) в связи с возрастанием неустойчивости мерзлоты. Скорость криогенных процессов в естественных условиях – 2,4 м/год при льдистости 20 – 40% и 0,5 м/год при льдистости 5 – 15%.



На участках распространения рыхлых мерзлых пород с макрольдистостью 5 – 15% деструктивные криогенные процессы будут развиваться под воздействием природных и техногенных факторов 2 – 5 раз менее активно по сравнению с более льдистыми породами. Даже при экстремальном техногенном воздействии в условиях потепления сезона оттаивания их скорость не превысит 7 – 8 м/год. Соответственно и риск природопользования в указанных мерзлотно-геоморфологических условиях будет в 2 – 3 раза ниже.

При малых и средних техногенных нагрузках на мерзлоту ( $J_m < 0,5$ ), в условиях климатической “нормы” и потепления техногенные факторы не оказывают существенного влияния на устойчивость многолетнемерзлых пород с льдистостью менее 15%. Прирост скорости криогенных процессов за счет  $\delta u_m$  не превышает 0,1 – 0,2 м/год. В данном случае  $\delta u_m$  может быть ниже естественной составляющей процесса, т.е. реакция мерзлоты направлена в сторону некоторого уменьшения эффективности прямого техногенного воздействия, а деструктивные криогенные процессы будут развиваться со скоростью не более 2 – 3 м/год.

Результаты моделирования показали некоторое уменьшение влияния техногенных факторов на развитие деструктивных процессов в малольдистых породах при сильном техногенном воздействии в условиях потепления:  $\delta u_m$  уменьшается на 0,2 – 0,7 относительно ее величин при климатической норме, что пока трудно объяснить в связи со слабой изученностью закономерностей взаимодействия природных и техногенных факторов в криолитозоне.

По прогнозу Главной геофизической

обсерватории, средняя летняя температура воздуха на севере Средней и Восточной Сибири к середине текущего столетия повысится на 2° С. В случае реализации этого сценария, деструктивные криогенные процессы в дисперсных грунтах с льдистостью более 20% при интенсивном природопользовании к середине XXI в. будут развиваться быстрыми темпами, достигая нескольких десятков метров в год.

### Список литературы

1. Разумов, С. О. Реакция криогенных комплексов арктического побережья на техногенные воздействия в нестационарных климатических условиях / С. О. Разумов // Теория и практика оценки состояния криосферы земли и прогноз ее изменений: Материалы международной конференции, 29-31 мая 2006 г., г. Тюмень, Россия. – Тюмень: ТГНГУ, 2006. – Т. I. – С. 275–277.

2. Разумов, С. О. Моделирование криогенных морфодинамических процессов в изменяющихся природно-техногенных условиях (на примере приустьевом участка р. Колымы) / С. О. Разумов // Геоморфология. – 2010. – № 4. – С. 26–36.

### References

1. Razumov, S.O. 2006. Reaction of Arctic coast cryogenic complexes on the technogenic influences in non-stationary climatic conditions. In: *Theory and practice of an estimation of Earth Cryosphere state and forecast of her changes, Proceedings of the international conference, 29-31 May 2006, Tyumen, Russia*, I: 275-277. Tyumen: Oil-and-gas State University Press (in Russian)

2. Razumov, S.O. 2010. Modeling of morphodynamic cryogenic processes under changing natural-technogenic conditions (the mouth part of the Kolyma River as an example). *Geomorphology* (4): 26-36 (in Russian)



## Simulation of the temperature regime of blasted permafrost

M.V. Kaimonov, S.V. Panishev, S.A. Ermakov

Chersky Institute of Northern Mining SB RAS  
Lenin St. 43, Yakutsk, Russia 677018, e-mail: gtf@igds.ysn.ru

**Abstract.** The formation of the temperature regime of blasted overburden is a multistage process. The first significant impact on the rock mass is imposed during blasting work. This results in the destruction of the rock mass and the changes in its density, porosity and thermophysical parameters. The second and third stages are determined by the dragline operation mode and the technological scheme of mining blocks. The temperature regime of the permafrost mass and the fragmented material after blasting and during mining is described by a mathematical model that takes into account the thermal properties of rocks, phase transitions, atmospheric air temperature changes, rock temperature, water content and density, overburden thickness, technological scheme of mining blocks, slope angles, and block size.

**Keywords:** mathematical modeling; regelation; quarry; cryolithozone.

## Моделирование температурного режима взорванных многолетнемёрзлых горных пород

М. В. Каймонов, С. В. Панишев, С. А. Ермаков

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН  
Россия, 677018, г. Якутск, пр. Ленина, д. 43, ИГДС СО РАН, e-mail: gtf@igds.ysn.ru

**Аннотация.** Процесс формирования температурного режима взорванных вскрышных пород многоэтапный. Первое значительное техногенное воздействие на породный массив оказывается при проведении взрывных работ. При этом происходит разрушение породного массива, изменение его плотности, пустотности, теплофизических параметров. Второй и третий этапы определяются особенностью работы драглайна и технологической схемой отработки блока. Температурный режим массива многолетнемёрзлых горных пород, породного развала после взрывной отбойки и в процессе его отработки описывается математической моделью, которая учитывает теплофизические характеристики пород, фазовые переходы влаги, изменение температуры атмосферного воздуха, температуру, влажность и плотность пород, мощность вскрыши, технологическую схему отработки блока, углы формируемых откосов и размеры обрабатываемого блока.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; смерзание; карьер; криолитозона.

## Моделирование температурного режима взорванных многолетнемерзлых горных пород

М. В. Каймонов, С. В. Панишев, С. А. Ермаков

Температурный режим взорванных вскрышных пород на карьерах расположенных в зонах распространения многолетней мерзлоты в значительной степени определяет эффективность работы выемочного оборудования и стабильность работы предприятия.

В условиях больших мощностей вскрышных пород на пластовых месторождениях основным оборудованием являются экскаваторы-драглайны. Несмотря на значительные экономические преимущества по сравнению с другим выемочно-погрузочным оборудованием, недостатком драглайнов является низкое усилие создаваемое ковшом. Это предопределяет высокую зависимость показателей его работы от свойств разрабатываемого массива.

Разработка многолетнемерзлых вскрышных пород с предварительным буровзрывным рыхлением в условиях месторождений криолитозоны осложняется повторным смерзанием кусков отбитых горных пород, причём прочность смерзания может достигать нескольких МПа, что значительно выше усилия создаваемого ковшом драглайна.

В связи с этим большой практический интерес представляет изучение температурного режима развала многолетнемерзлых горных пород. С этим связано решение следующих задач:

- определение закономерностей распределения температуры в целике уступа карьера в различное время года;
- определение закономерностей формирования физико-технических свойств многолетнемерзлых горных пород, сформированного в различное время года;
- определение влияния технологии обработки блока на температурный режим развала многолетнемерзлых горных пород.

Исходя из решения этих задач, будет возможно определение оптимальной длины экскаваторного блока, определяемой исходя из величины сменного подвигания забоя. Величина сменного подвигания забоя рассчитывается на основе установленной взаимосвязи между временем цикла драглайна и температурой пород в забое. При увеличении длины экскаваторного блока выше оптимальной многократно увеличивается вероятность смерзания взорванных пород в прочный монолит и, соответственно, падает общая производительность

работы драглайна, связанная с увеличением его времени цикла.

Процесс формирования температурного режима отбитых вскрышных пород многоэтапный и определяется технологическим режимом вскрыши. Первое значительное техногенное воздействие на породный массив оказывается при проведении взрывных работ. При этом происходит разрушение породного массива, изменение его плотности, пустотности, теплофизических параметров. Разогрев отбитой породы за счёт теплоты взрыва практически не происходит [1]. Второй и третий этапы определяются цикличностью работы экскаватора и особенностью технологической схемы.

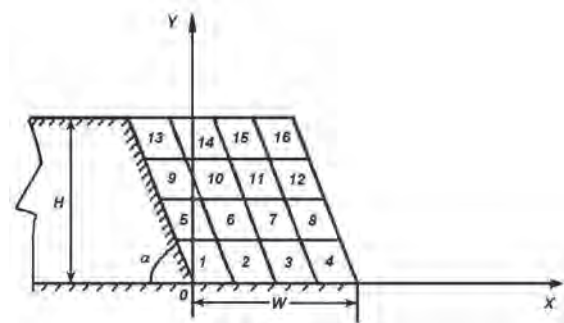
Существует большое количество работ по различным аспектам взрывных работ на карьерах. Тем не менее, до сих пор нет удовлетворительной схемы для описания трансформации внутренней структуры массива под воздействием взрыва и связано это с недостаточной изученностью кинематики этого процесса.

На сегодняшний день наибольшее распространение получила схема А.В. Гальянова [2]. Рассматривая действие взрыва в плоскости поперечного сечения, опираясь на общую теорию деформации, им предложено описывать трансформацию массива при взрыве, используя дифференциальный тензор деформации. Этот тензор представляется как сумма трёх тензоров

$$T = T_p + T_c + T_g,$$

где индексы «р», «с», «г» означают расширение, сдвиг, вращение.

Согласно этой схеме имеют место следующие закономерности формирования развала при буровзрывных работах (рис. 1):



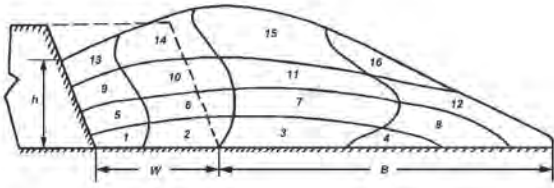


Рис. 1. Принципиальная схема деформации массива при буровзрывных работах в карьере.

- наибольшая деформация внутренней структуры массива происходит при однорядном взрывании скважин;
- в деформации массива отмечается расширение, сдвиг и ротация, она происходит неравномерно и имеет дифференциальный характер: нижние слои перемещаются в меньшей степени, чем верхние слои пород, прилегающие к середине откоса уступа, они «забрасываются» вперёд и как бы заваливают нижние слои; поверхностный слой развала образован породами тех же зон, что и в целике, которые претерпевают деформацию сдвига и расширения;
- плотность рудной массы в развале не является постоянной, а увеличивается к границе развала;
- геометрические параметры зарядов определяют начальные условия движения среды под действием энергии газообразных продуктов взрыва.

Задача формулируется следующим образом. На карьере угольного месторождения с установившимся тепловлажностным режимом горных пород в результате взрывной отбойки вскрыши образуется развал с заданным профилем. Выяснить динамику температурного поля развала пород вскрыши в процессе ведения горных работ.

Для прогноза температурного режима породного целика и развала после взрывной отбойки разработана математическая модель, которая учитывает теплофизические характеристики пород, фазовые переходы влаги, изменение температуры атмосферного воздуха, температуру, влажность и плотность пород, мощность вскрыши, технологическую схему отработки блока, углы формируемых откосов, а так же особенности технологии ведения буровзрывных работ в карьере.

При разработке математической модели исследуемого процесса приняты следующие упрощающие допущения:

1. Теплообмен на поверхности массива горных пород карьера с атмосферным возду-

хом определяется по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ .

2. Фильтрация воды в целике и развале отсутствует.

3. За время эксплуатации блока геометрические размеры развала изменяются согласно технологической схемы отработки блока.

Расчетная схема приведена на рис. 2.

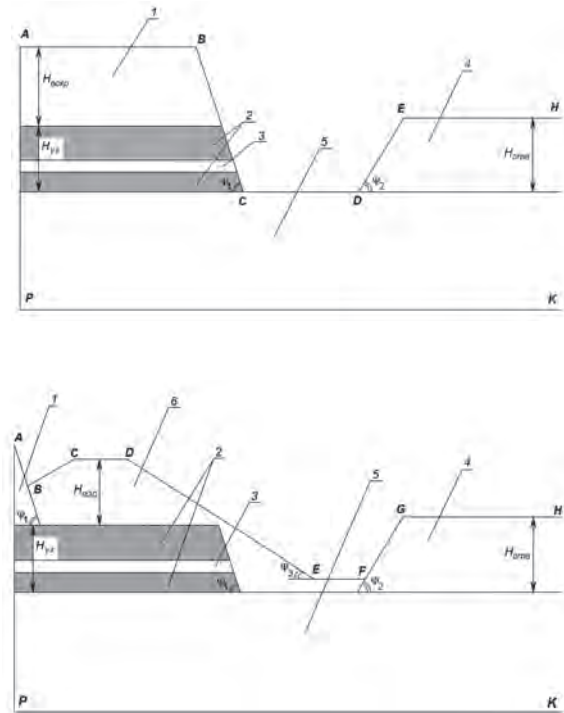


Рис. 2. Схема расчёта целика (а) и развала (б) горных пород на карьере.

1) вскрыша (целик); 2) угольный пласт; 3) пропласток; 4) отвал; 5) почва нижнего угольного пласта; 6) развал.

В соответствии с принятыми расчетной схемой и упрощающими допущениями расчет двумерного температурного поля многолетнемёрзлых горных пород карьера до и после буровзрывной отбойки, а также при отработке блока при нестационарном режиме сводится к решению системы дифференциальных уравнений теории теплопроводности [3]:

$$[C(T) + L_1 \cdot W \cdot \rho \cdot \delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right],$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases}$$

$$x \in D_x, \quad y \in D_y, \quad t > 0;$$

где  $T$  – температура породы,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T^*$  – температура фазовых переходов влаги в породе,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t, x, y$  – временная (с) и пространственные координаты (м);  $L_1$  – скрытая теплота

плавления (замерзания) льда (воды), Дж/кг;  $W$  - влажность породы, доли единицы;  $\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1, \rho_1, \lambda_1$  ( $c_2, \rho_2, \lambda_2$ ) - удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), плотность (кг/м<sup>3</sup>) и коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) соответственно для мерзлых (талых) пород;  $\delta(T-T^*)$  - функция Дирака.

Начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y)$$

Граничные условия:

на  $ABCDEFGH$ :

$$\lambda(T, x, y) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T(x, y, t) - T_B(t)) - Q_R(t) + L_2 E, \quad t > 0;$$

на  $AP, HK$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad t > 0;$$

на  $PK$ :

$$\frac{\partial T}{\partial y} = T_e, \quad t > 0,$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплообмена воздуха с грунтом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q_R$  - тепловой поток от солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $L_2$  - удельная теплота испарения воды, Вт·с/кг;  $E$  - интенсивность испарения, равная плотности диффузионного потока влаги в атмосферу, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Годовой ход среднемесячной температуры воздуха  $T_e$  может быть аппроксимирован гармонической функцией, например, косинусоидой [4]:

$$T_e(t) = A_a \cdot \cos[2 \cdot \pi \cdot t / t_0 + \varepsilon] + T_{0,a}, \quad t > 0,$$

где  $A_a$  - годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, °С;  $T_{0,a}$  - средняя годовая температура воздуха, °С;  $t$  - время;  $t_0$  - период колебаний ( $t_0 = 1$  год);  $\varepsilon$  - начальная фаза колебаний.

Коэффициент теплообмена  $\alpha$  атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород в зимний период зависит от толщины снежного покрова [5] и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_s}{\lambda_s}},$$

где  $\delta_s, \lambda_s$  - толщина (м) и коэффициент теплопроводности снега (Вт/(м·К));  $\alpha_0$  - эмпирический коэффициент конвективного теплообмена (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) рассчитываемый по формуле [5]:

$$\alpha_0 = \begin{cases} 6,16 + 4,19 \cdot v, & 0 < v \leq 5; \\ 7,56 \cdot v^{1,78}, & 5 < v \leq 30; \end{cases}$$

где  $v$  - скорость ветра, м/с.

Для расчета  $\alpha$  необходимы данные по месяцам о коэффициенте теплопроводности ( $\lambda_s$ ) и высоте ( $\delta_s$ ) снежного покрова. На основе большого объема экспериментальных материалов в работе [4] получены следующие осредненные зависимости для нахождения расчетных значений  $\lambda_s$ :

$$\lambda_s = \begin{cases} 1,165 \cdot \rho_s, & T_s > -10^0 \text{C}; \\ 1,035 \cdot \rho_s, & -10^0 \text{C} \geq T_s \geq -20^0 \text{C}; \\ 0,907 \cdot \rho_s, & T_s < -20^0 \text{C}; \end{cases}$$

где  $T_s, \rho_s$  - соответственно температура и плотность снежного покрова, г/см<sup>3</sup>.

Расчет плотности снега производится по формуле Э.Г. Коломыца [6]:

$$\rho_s = 0,182 + 0,18 \cdot \delta_s$$

Необходимо отметить, что плотность снега не является постоянной величиной и очень быстро меняется в период весеннего таяния: от 0,35 г/см<sup>3</sup> в начале, 0,45 г/см<sup>3</sup> в середине и 0,6 г/см<sup>3</sup> в конце снеготаяния.

Тепловой поток от солнечной радиации  $Q_R$  рассчитывается по формуле [5]:

$$Q_R = Q_c(1 - A) + I_a - \delta_{gr} \alpha_{gr} (T_{sur} + 273)^4,$$

где  $Q_c$  - суммарная коротковолновая радиация, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  - альbedo поверхности (ее отражательная способность);  $I_a$  - длинноволновое излучение атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta_{gr}$  - коэффициент серости поверхности (относительная излучательная способность или степень черноты, для большей части природных поверхностей близкая к 0,9);  $\alpha_{gr} = 5,76 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{sur}$  - температура на поверхности массива горных пород, °С.

Расчеты температурного режима производились методом конечных разностей с применением локально-одномерной схемы [7].

На основе разработанной программы для ПЭВМ, были проведены численные расчеты теплового режима уступа и развала горных пород карьера криолитозоны при следующих исходных данных: место расположения: Якутский район Республики Саха (Якутия), угольный карьер «Кангаласский», температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд  $T_e = -1,5^0 \text{C}$ .

Проведённые расчёты показали, что на



вероятность смерзания вскрышных пород наибольшее значение имеют дата взрывания, влажность пород, схема перераспределения пород внутри навала после взрыва, технологическая схема работы драглайна.

На базе математической модели разработана методика, позволяющая определить и вычислить геометрические параметры зон с высокой вероятностью смерзания в образованном породном навале, а также выявить особенности и динамику их образования, наметить способы управления процессом смерзания и разработать превентивные мероприятия.

Разработанная методика и математическая модель позволят обосновать период эффективной работы драглайна, а также рациональные параметры блока при безтранспортной разработке смерзающихся вскрышных пород в различные периоды года в условиях месторождений области многолетней мерзлоты.

#### Список литературы

1. Курилко, А. С. К вопросу вторичного смерзания минерального сырья в процессе его добычи на рудниках Севера / А. С. Курилко, М. В. Каймонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Региональное приложение Якутия. - 2005. Вып. 3. - С. 290-297.
2. Гальянов, А. В. Трансформация структуры горных массивов при взрывных работах на карьерах / А. В. Гальянов, В. Н. Рождественский, А. Н. Блинов. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 1999. – 139 с.
3. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
4. Павлов, А. В. Искусственное оттаивание мерзлых пород теплом солнечной радиации при

разработке россыпей / А. В. Павлов, Б. А. Оловин. – Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1974. – 182 с.

5. Перльштейн, Г. З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-востоке СССР / Г. З. Перльштейн. – Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1979. – 304 с.

6. Гаврильев, Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне / Р. И. Гаврильев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 146 с.

7. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.

#### References

1. Kurilko A.S., Kaimonov M.V. 2005. On the secondary freezing of mineral resources in the process of its production at the mines of the North. *Mining Informational and Analytical Bulletin. Regional Supplement Yakutia* (3): 290-297 (in Russian)
2. Galianov A.V., Rojdestvensky V.N., Blinov A.N. 1999. *The Transformation of the Structure of Mountain Ranges from Blasting at Quarries*. Ekaterinburg: Institute of Mining, UB RAS Press, 139 pp. (in Russian)
3. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. 1977. *The Equations of Mathematical Physics*. Moscow: Nauka, 736 pp. (in Russian)
4. Pavlov A.V., Olovin B.A. 1974. *Artificial Thawing of Frozen Ground by Solar Heat for Placer Mining*. Novosibirsk: Nauka, 182 pp. (in Russian)
5. Perlshtein G.Z. 1979. *Water Thawing of Frozen Ground in the North-Eastern USSR*. Novosibirsk: Nauka, 304 pp. (in Russian)
6. Gavriliev R.I. 2004. *Thermophysical Properties of Environmental Components in Permafrost Areas*. Novosibirsk: SB RAS Press, 146 pp. (in Russian)
7. Samarsky A.A. 1983. *Theory of Difference Schemes*. Moscow: Nauka, 616 pp. (in Russian)

## **Analysis of temperature waves in a two-layer medium in permafrost with varying mean daily air temperature**

R.I. Gavriliiev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: gubanova@mpi.ysn.ru

**Abstract.** This paper presents an analytical solution for temperature waves in a two-layer medium consisting of frozen ground and snow cover. Temperature waves represent diurnal temperature fluctuations about the mean daily value. In the literature they are known for a constant mean daily temperature value. In this paper, a solution is obtained for periodic temperature of the frozen ground – snow system with account for variations in mean daily air temperature over the entire winter. The solution can be used in estimating the effect of snow cover on the thermal state of frozen ground in the cold season.

**Keywords:** temperature wave; frozen ground; snow cover.

## **Расчет температурных волн в двухслойной среде криолитозоны при изменяющейся среднесуточной температуре воздуха**

Р. И. Гаврильев

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: gubanova@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Проведен аналитический расчет температурных волн в двухслойной среде из мерзлого грунта и снежного покрова. Температурные волны представляют собой суточные колебания температуры вокруг ее среднесуточного значения. В литературе она известна при постоянном значении среднесуточной температуры. В данной статье решена задача о периодической температуре системы из мерзлого грунта и снежного покрова при учете изменяющейся среднесуточной температуры воздуха за весь зимний период. Найденное решение может быть использовано для оценки влияния снежного покрова на тепловое состояние мерзлых грунтов в холодное время года.

**Ключевые слова:** температурная волна; мерзлый грунт; снежный покров.

# Расчет температурных волн в двухслойной среде криолитозоны при изменяющейся среднесуточной температуре воздуха

Р. И. Гаврильев

## Введение

В формировании температурного поля грунтов под воздействием климатических условий активное участие принимает промежуточная среда: почва и напочвенные покровы (снег, растительный и мохово-торфяной покров и др.), которые характеризуются резко отличными теплофизическими свойствами. При интерпретации результатов наблюдений за суточными, годовыми и другими периодическими колебаниями температуры деятельного слоя исходят из решения уравнения теплопроводности для полуограниченного пространства при периодическом (обычно синусоидальном) законе изменения температуры поверхности. При этом расчётное пространство представляется многослойной системой. В литературе работ, посвященных теоретическому расчёту периодического температурного поля многослойных сред, не так уж много. Так, случай двухслойной среды рассматривался Н.А. Огильви [1] и Ю.Г. Шасткевичем [2]. Трёхслойная среда исследовалась А.Х. Лахенбруком (А.Н. Lachenbruch) [3]. При дальнейшем увеличении числа слоёв математический аппарат чрезвычайно усложняется. Эти работы представляют традиционный классический подход к решению уравнения теплопроводности. Кроме них, известен ещё другой, матричный, подход к данной проблеме, используемый, обычно, в теории электрических цепей. На этой основе два случая полупространства, состоящего из  $n$  слоёв, применялся метод комплексного переменного [4, 5]. Он позволяет получить числовые величины параметров температурных волн сугубо для частных случаев.

Однако во всех этих работах предполагается постоянство среднепериодической, например, среднесуточной температуры, которая за зимний сезон испытывает значительные изменения. В данной работе автор ставит перед собой задачу учета динамики изменения среднесуточной температуры воздуха в расчёте периодического температурного поля мерзлого грунта в холодное время года при наличии снежного покрова.

Общая постановка задачи следующая. Рассматривается двухслойная среда: снежный покров и мерзлый грунт, как полуограниченное пространство. Допускается, что обе среды имеют начальную температуру в виде

постоянного градиентного распределения по высоте, притом каждая среда имеет свой градиент температуры. Для простоты математических операций в граничном условии двухслойной среды температуру воздуха заменили температурой поверхности снежного покрова. Они близки между собой. По данным А.В. Павлова [6] отличия среднесуточных значений температуры воздуха и поверхности снега в среднем за весь зимний период не превышают 1,0-1,8 °С, притом температура поверхности снега всегда ниже температуры воздуха на высоте 2 м. На поверхности снега задаются суточные колебания температуры в виде правильной синусоиды относительно среднего за сутки значения температуры. Среднесуточная температура со временем меняется. Это изменение температуры можно выразить посредством кусочно линейной функцией времени.

Схема задачи показана на рисунке.

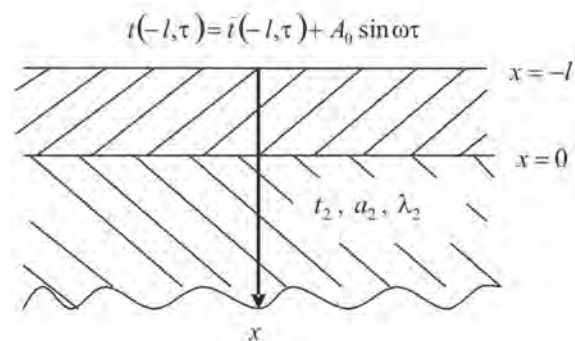


Схема задачи о периодическом температурном поле двухслойной среды.

В этой схеме индексами «1» и «2» обозначены соответственно покрывающая пластинчатая среда (снежный покров) и полуограниченное пространство (мерзлый грунт). Изменение температуры можно представить в следующем виде:

$$t_1(x, \tau) = \bar{t}_1(x, \tau) + \tilde{t}_1(x, \tau), \quad -l < x < 0, \quad (1)$$

$$t_2(x, \tau) = \bar{t}_2(x, \tau) + \tilde{t}_2(x, \tau), \quad 0 < x < \infty, \quad (2)$$

где  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$  – среднесуточные значения температуры сред;  $\tilde{t}_1$  и  $\tilde{t}_2$  – суточные колебания температуры.

#### Расчет суточного колебания температуры

В формулах (1) и (2) суточные колебания температуры можно рассчитать по формулам А.Х. Лахенбрука [3] для двухслойной среды, которые для установившегося периодического поля имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_1(x, \tau) = & A_0 e^{-x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}}} \frac{1}{S} \left[ \sin \left( \omega \tau - x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) + \right. \\ & + M e^{2x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}}} \sin \left( \omega \tau + x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) + \\ & + M \sin \left( \omega \tau - x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) + \\ & \left. + M^2 e^{2x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}}} \sin \left( \omega \tau + x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

при  $-l < x < 0$ ,

$$\begin{aligned} \tilde{t}_2(x, \tau) = & A_0 (1 + M) e^{-x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}}} \frac{1}{S} \left[ \sin \left( \omega \tau - x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) + \right. \\ & \left. + M \sin \left( \omega \tau - x \sqrt{\frac{\omega}{2a_1}} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

при  $0 < x < \infty$ , где  $M = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1 + \beta_2}$ ,  $\beta = \sqrt{\lambda c_\gamma}$  – коэффициент тепловой активности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_\gamma$  – объемная теплоемкость;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\omega$  – угловая частота, которая равна  $2\pi/T$  (здесь  $T$  – период колебания).

В формулах (3) и (4) выражение для  $S$  следующее:

$$S = 1 + 2M + M^2. \quad (5)$$

#### Постановка задачи для среднесуточной температуры

Для среднесуточной температуры сформулируем следующую задачу:

$$a_1 \frac{\partial^2 \bar{t}_1}{\partial x^2} = \frac{\partial \bar{t}_1}{\partial \tau}, \quad -l < x < 0, \quad \tau > 0, \quad (6)$$

$$a_2 \frac{\partial^2 \bar{t}_2}{\partial x^2} = \frac{\partial \bar{t}_2}{\partial \tau}, \quad 0 < x < \infty, \quad \tau > 0. \quad (7)$$

На поверхности пластины (снега) ( $x = -l$ ) температура переменная, которую в общем случае можно задавать кусочно линейной функцией времени:

$$\begin{aligned} \bar{t}_1(-l, \tau) = & \bar{t}_1(-l, 0) + b_1 \tau_1 + b_2 (\tau_2 - \tau_1) + \\ & + b_3 (\tau_3 - \tau_2) + \dots = \bar{t}_1(-l, 0) + \sum_1^n b_i (\tau_i - \tau_{i-1}), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_i$  – наклоны изменения температуры поверхности снега за промежутки времени  $\Delta \tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$ .

Задачу будем решать в пределах каждого отрезка времени при линейном изменении температуры снега:

$$\bar{t}_{1i}(-l, \Delta \tau_i) = \bar{t}_1(-l, \tau_{i-1}) + b_i \Delta \tau_i.$$

В дальнейшем для простоты записи в этом выражении опустим индексы  $i$  и  $\Delta$ :

$$\bar{t}_1(-l, \tau) = \bar{t}_1(-l, 0) + b \tau.$$

Рассмотрим условия задачи.

Начальные условия:

$$\bar{t}_1(0, x) = \bar{t}_1(0, -l) + \Gamma_1(x + l), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{t}_2(0, x) = & \bar{t}_1(0, 0) + \Gamma_2 x = \\ = & \bar{t}_1(0, -l) + \Gamma_1 l + (\Gamma_2 - \Gamma_1)x, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  – начальные градиенты температур в средах 1 и 2.

Граничные условия:

при  $x = -l$

$$\bar{t}_1(-l, \tau) = \bar{t}_1(-l, 0) + b \tau, \quad (11)$$

при  $x = 0, \tau > 0$

$$\lambda_1 \frac{\partial \bar{t}_1(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial \bar{t}_2(0, \tau)}{\partial x}, \quad (12)$$



$$\bar{i}_1(0, \tau) = \bar{i}_2(0, \tau), \quad (13)$$

при  $x \rightarrow \infty$

$$\bar{i}_2(\infty, \tau) = \bar{i}_2(\infty, 0), \quad (14)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности сред.

### Решение задачи

Введем обозначения:

$$\vartheta_1(x, \tau) = \bar{i}_1(x, \tau) - \bar{i}(x, 0),$$

$$\vartheta_2(x, \tau) = \bar{i}_2(x, \tau) - \bar{i}_2(x, 0).$$

Тогда получится задача с нулевыми начальными и граничным (при  $x \rightarrow \infty$ ) условиями. Все остальные условия и сами уравнения (1) и (2) в обозначениях  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  сохраняются.

Применим к системе уравнений (1)-(6) преобразования Лапласа:

$$\bar{\vartheta}_1 = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \vartheta_1(x, \tau) d\tau \quad \bar{\vartheta}_2 = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} \vartheta_2(x, \tau) d\tau.$$

Тогда задача запишется в виде:

$$\frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_1}{\partial x^2} - q_1^2 \bar{\vartheta}_1 = 0, \quad -l < x < 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_2}{\partial x^2} - q_2^2 \bar{\vartheta}_2 = 0, \quad x > 0, \quad (16)$$

$$\text{где } q_1 = \left(\frac{s}{a_1}\right)^{1/2}, \quad q_2 = \left(\frac{s}{a_2}\right)^{1/2}. \quad (17)$$

Граничные условия:

$$\lambda_1 \frac{d\bar{\vartheta}_1}{dx} = \lambda_2 \frac{d\bar{\vartheta}_2}{dx} \quad \text{и} \quad \bar{\vartheta}_1 = \bar{\vartheta}_2 \quad \text{при} \quad x = 0, \quad (18)$$

$$\bar{\vartheta}_1 = \frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2} \quad \text{при} \quad x = -l, \quad (19)$$

$$\bar{\vartheta}_2 \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \infty. \quad (20)$$

Решение уравнения (15), удовлетворяющее условию (19), имеет вид:

$$\bar{\vartheta}_1 = \left(\frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2}\right) chq_1(l+x) + Ashq_1(l+x). \quad (21)$$

Для уравнения (16), исходя из условия (20), получим следующее решение:

$$\bar{\vartheta}_2 = Be^{-q_2 x}. \quad (22)$$

Неизвестные  $A$  и  $B$  найдем из условия (18). Тогда решения уравнений (15) и (16) окончательно запишутся в виде:

$$\bar{\vartheta}_1 = \left(\frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2}\right) \frac{(chq_1 x - \sigma shq_1 x)}{(chq_1 l + \sigma shq_1 l)}, \quad (23)$$

$$\bar{\vartheta}_2 = \left(\frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2}\right) \frac{e^{-q_2 x}}{(chq_1 l + \sigma shq_1 l)}, \quad (24)$$

$$\text{где } \sigma = \frac{\lambda_2 k}{\lambda_1}, \quad q_2 = kq_1 \quad \text{и} \quad k = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}.$$

Для нахождения оригиналов  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  можно использовать теорему обращения или метод разложения в ряд. Однако, гораздо проще воспользоваться методом К. Карслоу и Д. Егера [5], выразив гиперболические функции через показательные. При этом для  $\vartheta_1$  имеем

$$\bar{\vartheta}_1 = \left(\frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2}\right) \frac{e^{-q_1(l-x)}(e^{-2q_1 x} - \alpha)}{(1 - \alpha e^{-2q_1 l})}, \quad (25)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{\sigma - 1}{\sigma + 1}.$$

Учитывая, что [5]

$$\frac{1}{1 - \alpha e^{-2q_1 l}} = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-2q_1 n l}, \quad (26)$$

из выражения (25) получим

$$\bar{\vartheta}_1 = \left(\frac{\bar{i}_1(-l, 0)}{s} + \frac{b}{s^2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-q_1[(2n+1)l+x]} - \alpha^{n+1} e^{-q_1[(2n+1)l-x]}. \quad (27)$$

Подобным же образом для  $\vartheta_2$  находим

$$\begin{aligned} \bar{\vartheta}_2 &= \left( \frac{\bar{i}_1(-l,0)}{s} - \frac{2b}{s^2} \right) \frac{e^{-\eta(kx+l)}}{(1+\sigma)(1-\alpha e^{-2\eta l})} = \\ &= \frac{2}{(1+\sigma)} \left( \frac{\bar{i}_1(-l,0)}{s} + \frac{b}{s^2} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n e^{-\eta[(2n+1)l+kx]}. \quad (28) \end{aligned}$$

Из таблицы изображений [5] окончательно получим следующие выражения для оригиналов:

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \bar{i}_1(-l,0) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] - \\ &- \alpha^{n+1} \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] + \\ &+ b \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left\{ \left[ \tau + \frac{[(2n+1)l+x]^2}{2a_1} \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l+x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] - \right. \\ &- \left. \left[ [(2n+1)l+x] \sqrt{\frac{\tau}{\pi a_1}} e^{-\frac{[(2n+1)l+x]^2}{4a_1\tau}} \right] \right\} - \\ &- \alpha^{n+1} \left\{ \left[ \tau + \frac{[(2n+1)l-x]^2}{2a_1} \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l-x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] - \right. \\ &- \left. \left[ [(2n+1)l-x] \sqrt{\frac{\tau}{\pi a_1}} e^{-\frac{[(2n+1)l-x]^2}{4a_1\tau}} \right] \right\}, \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vartheta_2 &= \frac{2\bar{i}_1(-l,0)}{(1+\sigma)} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l+kx}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] + \\ &+ \frac{2b}{(1+\sigma)} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n \left\{ \left[ \tau + \frac{[(2n+1)l+kx]^2}{2a_1} \right] \times \right. \\ &\times \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2n+1)l+kx}{2\sqrt{a_1\tau}} \right] - \\ &- \left. \left[ [(2n+1)l+kx] \sqrt{\frac{\tau}{\pi a_1}} e^{-\frac{[(2n+1)l+kx]^2}{4a_1\tau}} \right] \right\}, \quad (30) \end{aligned}$$

где  $\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u)$ ,  $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du$  – функция ошибок Гаусса.

### Обсуждение результатов исследований

Рассмотрим следствия формул (29) и (30).

1. Обе среды одинаковые. При этом  $k=1$ ,  $\sigma=1$  и  $\alpha=0$ . Тогда для  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  получаются одинаковые выражения:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \bar{i}_1(-l,0) \operatorname{erfc} \left[ \frac{l+x}{2\sqrt{a\tau}} \right] + \\ &+ b\tau \left\{ \left[ 1 + \frac{(l+x)^2}{2a\tau} \right] \operatorname{erfc} \left[ \frac{l+x}{2\sqrt{a\tau}} \right] - \frac{(l+x)}{\sqrt{\pi a\tau}} e^{-\frac{(l+x)^2}{4a\tau}} \right\} \\ &- l < x < \infty. \quad (31) \end{aligned}$$

Если в формуле (31) принять  $l=0$ , то из нее вытекает соотношение для полуограниченной среды с линейно изменяющейся температурой во времени на поверхности ( $x=0$ ) относительно какой-нибудь величины  $t_0$ :  $t(0, \tau) = t_0 + b\tau$  при нулевой начальной температуре [5]:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \bar{i}_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + b\tau \left[ 1 + \frac{x^2}{2a\tau} \right] \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \\ &- \frac{x}{\sqrt{\pi a\tau}} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}. \quad (32) \end{aligned}$$

2. На поверхности первой среды (снега) поддерживается постоянная температура  $\bar{i}_1(-l, \tau) = \bar{i}_1 = \text{const}$ . Тогда в формулах (29) и (30) остаются только первые члены, которые совпадают с выражениями, полученными Г. Карслоу и Д. Егерем [5].

### Заключение

Решена задача о периодическом температурном поле мерзлого грунта при наличии снежного покрова с учетом динамики изменения среднесуточной температуры воздуха за весь зимний период.

Полученные решения могут быть использованы в расчетах влияния снежного покрова на температурное поле мерзлых грунтов в холодное время года в различной стадии накопления

снежной массы. Всё это будет предметом дальнейших наших исследований.

### Список литературы

1. Огильви, Н. А. Вопросы теории геотемпературных полей в приложении к геотермическим методам разведки подземных вод / Н. А. Огильви // Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – Т. 1. – С. 53–85.
2. Шасткевич, Ю. Г. Температурные волны в двухслойной среде / Ю. Г. Шасткевич // Проблемы геокриологии. – Новосибирск : Наука, 1973. – С. 37–49.
3. Lachenbruch, A. H. Periodic Heat Flow in a Stratified Medium With Application to Permafrost Problems / A. H. Lachenbruch // Geological Survey Bulletin 1083-A. Washington: United States Government Printing Office. – 1959. – 37 p.
4. Шкловер, А. М. Теплопередачи при периодических тепловых воздействиях / А. М. Шкловер. – М.; Л. : Госэнергоиздат, 1952. – 80 с.
5. Карслоу Г., Егер Д., Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
6. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР / А. В. Павлов. – Якутск : Якутское кн. изд-во, 1975. – 302 с.

### References

1. Ogilvi N.A. 1959. Problems of the geotemperature field theory as applied to geothermal methods of groundwater exploration. *In Problems of Geothermy and Practical Use of Earth's Heat*. USSR Academy of Sciences Press: Moscow; Vol. 1 53-85 (in Russian)
2. Shastkevich Yu.G. 1973. Temperature waves in a twolayer medium. *In Problems of Geocryology*. Nauka: Novosibirsk; 37-49 (in Russian)
3. Lachenbruch A.H. 1959. *Periodic Heat Flow in a Stratified Medium with Application to Permafrost Problems*. U.S. Geological Survey Bulletin 1083-A. United States Government Printing Office: Washington; 37 pp.
4. Shklover A.M. 1952. *Heat Transfer at Periodic Thermal Conditions*. Gosenergoizdat: Moscow-Leningrad, 80 pp. (in Russian)
5. Carslaw H.S., Jaeger J.C. 1959. *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Clarendon Press: Oxford, 510 pp.
6. Pavlov, A.V. 1975. *Heat Exchange between Soil and Atmosphere in Northern and Temperate Latitudes of the USSR*. Yakutsk: Yakut Publishing House, 302 pp. (in Russian)



## **Study on the failure mechanism of roadbed with saline soil under cyclical freeze-thaw**

Hui BING, Shu-ping ZHAO

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy  
of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: binghui@lzb.ac.cn

**Abstract.** Saline soil is widely distributed in the arid and semiarid regions of northwest China. Due to the frost heave of seasonally frozen soil, salt expansion and thaw settlement a great deal of diseases occurs in the roadbed with saline soil, which results in the severe potential safety hazard. We performed the test of uniaxial compressive strength and the simulation tests of the roadbed with saline soil experienced cyclical freeze-thaw, and analyzed the failure mechanism of the roadbed with saline soil. The results indicated that even if there is no upper load on the roadbed with saline soil the strain of the phase change of ice-water and crystallization of salt in the roadbed is greater than the failure strain of the saline soil with the same condition when it experienced cyclical freeze-thaw. And with the increase of the cyclical freeze-thaw numbers the extent of the inhomogeneous settlement intensified and the middle of the roadbed had a tension failure.

**Keywords:** saline soil; cyclical freeze-thaw; uniaxial compressive strength; failure mechanism.

## **Изучение механизма разрушения засоленных грунтов насыпи при циклическом промерзании-протаивании**

Хуэй БИН, Шупин ЧЖАО

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов  
АН КНР  
Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: binghui@lzb.ac.cn

**Аннотация.** В аридных и полуаридных регионах Северо-Запада Китая широко распространены засоленные грунты. Морозное пучение при сезонном промерзании грунтов, отжатие солей и осадка при оттаивании вызывают деформации земляного полотна, что может серьезно угрожать безопасности движения. Нами выполнены испытания засоленных грунтов на одноосное сжатие, а также испытания на модели при циклическом промерзании-протаивании для изучения механизма разрушения засоленных грунтов земляного полотна. Результаты показывают, что даже при отсутствии внешней нагрузки на земляное полотно из засоленных грунтов деформации, вызванные фазовыми переходами лед-вода и отжатием солей, возрастают с увеличением циклов промерзания-оттаивания. С увеличением количества циклов промерзания-протаивания возрастает неравномерность осадки, а в средней части земляного полотна возникают деформации растяжения.

**Ключевые слова:** засоленные грунты; циклическое промерзание-протаивание; сопротивление одноосному сжатию; механизм разрушения.



# Study on the failure mechanism of roadbed with saline soil under cyclical freeze-thaw

Hui BING, Shu-ping ZHAO

## Introduction

Frozen saline soils are widely distributed throughout China, especially in northwestern China. The roadbed of many national projects in northwestern China, such as the Qinghai-Tibet Railway, Lanzhou-Xinjiang Highway and Railway are all encountered the saline soil. These soils have special engineering properties that are not only related to water content, salt content and density, but are also influenced and controlled by environmental factors [1]. The freezing of saline soils is a complex process for the soluble salts in the pore water fluid. The effects of salts on freezing behavior extend well beyond simply lowering of the freezing point. Salts are excluded among soil particles and concentrated in the adjacent pore fluid as the soil temperature decreases, and the concentrated salt dissolves as the soil temperature increases. Cyclical freezing and thawing is an important topic for engineering designs and studies in cold regions because of its considerable impact on the geotechnical properties of soil.

The mechanical properties influenced by cyclical freezing and thawing have been reviewed extensively. Tests on silty clay along the Qinghai-Tibet Railway indicated that stress-strain behavior was not be affected by the freeze-thaw process, but the failure strength was heavily influenced by the number of freeze-thaw cycles [2]. The stress-strain behavior of soil influenced by cyclical freezing and thawing depends on the experimental conditions (consolidation, triaxial system etc.), such that different experimental conditions have different mechanical behaviors [3]. Therefore, the results of soil strength influenced by cyclical freezing and thawing vary greatly. Yong [4] showed an increase in soil strength after a large number of freeze-thaw cycles, whereas Broms [5] and Chuvilin [6] found a decrease in strength after several freeze-thaw cycles. Other studies by Bon-darenko [7], Ono [8], and Swan [9] showed the soil strength remaining the same after freezing and thawing.

Velli [10] found that frozen saline soils have special properties and are distinguished by low bearing capacity. Frozen saline soils occupy the position between frozen and unfrozen soils because it freezes at lower temperatures and contain more unfrozen water than other frozen soils. The unidirectional freezing experiment indicated that in the early stage the deformation

of the soil mainly caused by the frost heave, while in the later phase crystallization of the salt played a larger role, and compared with the two type deformation the latter was very small [11]. The strength experiment of the saline soil revealed that the soil destroyed at the certain compressive stress and the soil strength is intensified or weakened during freezing and thawing due to the injection of sodium sulfate solute [12]. However, many engineering diseases such as frost boil, dissolve collapse occur in the saline soil regions, where the highway surface destroyed too heavily to utilize. As such, model experiments on the freeze-thaw experiment were performed to saline soil roadbed to explore the real reason on the roadbed failure without any load.

The paper describes the model experiments of the roadbed, one roadbed is with Lanzhou loess injected sulfate sodium solution, and the other is with Lanzhou loess without injected solution. Compare with the two different roadbeds with solution and without solution and combined with the test results of the uniaxial compressive strength at the same condition (salt content and water content), the failure mechanism of roadbed with saline soil under cyclical freeze-thaw is investigated.

## Experiment design

The experiment program was carried out in two phase. The first phase was the uniaxial compressive strength experiment. The soil used in this study is loess in Lanzhou, one of the main loess deposit regions in Gansu province. The grain size distribution and the physical parameters of the loess are given in Table 1, and the initial ions content are shown in Table 2. For the experiments the unsalted loess was dried and mixed with a solution of sodium sulfate. Water contents of 7%, 10% and 15% (optimum water content) were used in the experiments. During sample preparation, a specific amount of anhydrous sodium sulfate was dissolved in a specific amount of distilled water so as to investigate a specific salt content and a specific water content. The sodium sulfate solution was then incorporated into the prepared soil. The soil sample was placed into a plastic bag and sealed for 12 hours to provide an evenly distribution of water and salt. The homogenous soil was then tamped into a cylindrical sample mold (diameter of 61.8 mm and height of 125 mm). A total of 58 samples were prepared with

different water and salt contents. The samples used for freeze-thaw cycles were covered with preservative film to keep water from losing, and were placed in a freezer at  $-20^{\circ}\text{C}$  for 16 hours, then allowed to thaw at room temperature ( $18^{\circ}\text{C}$ ) for 16 hours. The height and diameter of the samples were measured with a sliding gauge after each freezing and thawing. So it finished the first freezing and thawing cycle. For this study, samples were subjected to 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, and 10 freeze-thaw cycles. Testing of the uniaxial compressive strength was carried out at room temperature ( $18^{\circ}\text{C}$ ) with a deformation rate of  $1.25\text{ mm/min}$ . Loading date and displacement were recorded automatically with a data logging instrument. The corresponding stress and strain were calculated and the stress-strain curves were plotted. Thus the uniaxial compressive strength of the saline soil with different condition (water content and salt content) was obtained, the influence of cyclical freeze-thaw on physical and mechanical prosperities of saline soil (injected sulfate sodium solution) presented elsewhere in detail [12].

Table 1. Grain-size distribution and physical parameters of the Lanzhou loess

Grain composition /%				Dry density $\text{g/cm}^3$	Saturation moisture content %	Liquid limit %	Plastic limit %	Plasticity index
>0.1	0.1-0.05	0.05-0.005	<0.005					
1.9	5.3	58.2	34.6	1.64	20	25.7	16.1	9.6

Table 2. Initial ions content of the Lanzhou loess

cation %				anion %		
$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$
0.06	0.01	0.24	0.03	1.16	0.01	0.05

The second phase was the model test of the roadbed with saline soil. Two cyclical freeze-thaw tests were performed, one was the roadbed with Lanzhou loess without injected sodium sulfate solution, and the other was the one with injected solution. The initial condition (size, water content and density) of the two roadbeds are the same except the salt content. The ratio of the geometry similitude of the two roadbeds was 1:20. The sample preparation was the same as the before. Fan control temperatures of the testing machine were adopted to control the roadbeds surface temperature, and the temperature at the bottom of the roadbeds was controlled by the coolant to reach the temperature that the experiments required. 67 thermistor sensors were inserted inside the

roadbed to measure the temperature continuously during the experiments. The distribution of the thermistor sensors inside the roadbed is show in Fig.1. Four centigrade scale distributed at the road surface and shoulder (two at surface and two at shoulder) were used to measure the deformation, and the data were recorded by manual read. During the experiments the surface temperature is setting at  $-20^{\circ}\text{C}$ , and the bottom temperature was setting at  $2^{\circ}\text{C}$  when the roadbed experience freezing, and the thaw experiment performed at room temperature opening the machine door. The two model experiments were finished experienced four cyclical freeze-thaw.

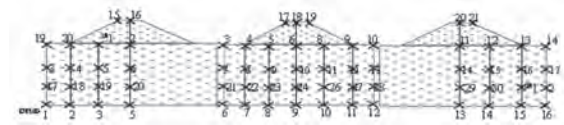


Fig. 1. Distribution of the thermistor sensors inside the roadbed. *Left*: the left profile of the roadbed; *middle*: the middle profile of the roadbed; *right*: the right profile of the roadbed.

## Experiment results and analysis

### *The shape and the deformation of the two model roadbeds*

Fig.2 shows the surface condition of the roadbeds before and after the cyclical freeze-thaw. To the roadbed without injected solution, crack and bump had not occurred at the surface after the cyclical freeze-thaw experiment. However, soil at the surface became looser with increasing the number of cyclical freeze-thaw. The thickness of the soil at roadbed surface with a pattern like that of a honeycomb was 2 cm which was a new disease in the region with freshening wind. With increasing the number of cyclical freeze-thaw and evaporation, the loose soil at the surface drifted with wind erode the roadbed surface further. To the roadbed with Lanzhou loess injected sulfate sodium the roadbed is destroyed heavily after the cyclical freeze-thaw. There was a thin salt bloom upon the roadbed surface after freezing 24 h. For the salt leaching during thawing, the salt bloom vanished after the first cyclical freeze-thaw. The acre of the salt bloom was greater with increasing the number of cyclical freeze-thaw, which acted as a cover to protect water to gasification during freezing. A transverse crack came at the one slope and a longitudinal crack turned up at the roadbed surface after the five days that the experiment beginning. Another transverse crack came at the other slope and the slopes become wider with increasing the number of cyclical freeze-thaw, and the three cracks joined up thoroughly after the third cyclical freeze-thaw. The roadbed destroyed

heavily at the end of the experiment, the maximum size of the cracks juncture was nearly 4 cm, and the deepest one was 7 cm.



Fig. 2. Surface condition of the roadbeds before and after the cyclical freeze-thaw (*upper left*: roadbed with Lanzhou loess before the experiment; *upper right*: roadbed with Lanzhou loess after the experiment; *lower left*: roadbed with Lanzhou loess injected sulfate sodium solution before the experiment; *lower right*: roadbed with Lanzhou loess injected sulfate sodium solution after the experiment).

Fig.3 shows the roadbed deformation of the two roadbeds. It is indicated from the figures that the deformation is less to the roadbed with Lanzhou loess while it is bigger to the roadbed with Lanzhou loess injected sulfate sodium solution. At the first cyclical freeze-thaw the roadbed soil consolidated and the deformation was negative for the gravity load which leads to the soil particles denser; however, the deformation of the shoulder increased continuously because the consolidated soil at the roadbed center given a compression to the soil at the shoulder, the compression is greater than the consolidation to the soil at the shoulder, thus the soil at the shoulder humped up for the compression and frost heave. The same condition came to the roadbed of the Lanzhou loess without injected salt solution. In the special soil regions it may well be another disease that the increased load of the roadbed.

Differed from the roadbed deformation of the roadbed with Lanzhou loess, the deformation of the roadbed with saline soil was the total of the frost heave and salt expansion after the consolidation at the second freezing period, and the deformation did not return to the original. During the experiment there was a salt shell covered the roadbed surface, the water content of the roadbed after the experiment decreased. The salt crystallized for the salt expansion when freezing, and the crystallized salt would not dissolve completely when thawing, so the soil water decreased after the each cyclical

freeze-thaw. Frost heave, salt expansion and crystallized salt collapsed came repeatedly at the freezing and thawing which made the roadbed at an unstable condition, thus the cracks occurred at the roadbed surface and destroyed finally.

It is indicated from the figures of roadbed shape and deformation curve that uneven settlement happened at the surface. Several physical and mechanical actions occurred when the roadbed experienced freezing and thawing. One is the compactness during the freezing, the other is the phase change of ice-water, and another one is the crystallization of sulfate sodium. The three macroscopic reasons lead to the deformation. In all the deformation is the result of the compactness, frost heave and salt expansion.

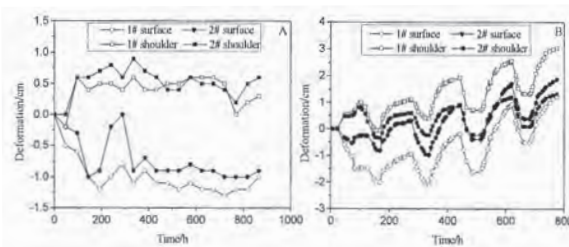


Fig. 3. Deformation curves of roadbed surface and shoulder during the experiments (A is the roadbed of Lanzhou loess without injected sulfate sodium solution, and B is the roadbed of Lanzhou loess with sulfate sodium solution).

#### *Failure mechanism of the roadbed with saline soil under cyclical freeze-thaw*

In general to the soil failure, the cohesion and inner friction angle are the two indexes to assess the soil strength with the physical force. But the roadbed with saline soil destroyed with the gravity only experienced several cyclical freeze-thaws. During the experiment the uneven deformation turned at the roadbed surface and the shoulder, the strain of the soil could be calculated after each cyclical freeze-thaw by the deformation curve (Table 3). From the uniaxial compressive strength experiment results, when the salt content was 1% the failure strain of the saline soil after the second, third and fourth cyclical freeze-thaw was 3.17%, 3.15% and 3.19%, respectively. Contrasted with the data with the calculated strain of the roadbed after each cyclical freeze-thaw, the strain of roadbed is far greater than the failure strain after the third cyclical freeze-thaw. Thus, the roadbed destroyed heavily after the third cyclical freeze-thaw.



Table 3. Strain of the roadbed after each cyclical freeze-thaw

Cyclic number	1# surface	2# surface	1# shoulder	2# shoulder
1	1.357%	1.418%	3.517%	3.504%
2	2.872%	3.265%	2.406%	2.833%
3	3.597%	3.253%	4.090%	3.797%
4	3.595%	3.295%	4.153%	3.690%

To the roadbed with saline soil the uneven settlement extent is greater with increasing cyclical freeze-thaw. The roadbed surface and the shoulder deformed, so the relative distance is changed between the surface and the shoulder. The roadbed soil strain could be obtained by calculating the relative displacement between the surface and the shoulder (Table 4). It can be seen in the table that during the freezing and thawing there was a greater different between the two relative displacements between the roadbed surface and shoulder because of the different extent water migration and salt transfer at the different regions. In addition it is showed in the table that the strain at 1# was always greater than the failure strain, while the strain at 2# was less than the failure strain until the fourth cyclical freeze-thaw, thus the roadbed had a tensile failure when the uneven extent was greater.

Table 4 Relative displacement and strain of the roadbed surface and shoulder

cyclic number	Relative displacement /cm		Strain/%		Failure strain %
	1#	2#	1#	2#	
2	0.486	0.124	4.860	1.240	3.17
3	0.432	0.172	4.320	1.72	3.15
4	0.349	0.483	3.490	4.83	3.19

The roadbed destroyed after cyclical freeze-thaw. Based on the soil deformation modulus in the compressive strength experiment of the saline soil and the strain of the roadbed failure in the model test, the soil strain after each cyclical freeze-thaw can be back-calculated (Table 5). In the model test of roadbed with saline soil, a transverse crack came at the one slope and a longitudinal crack turned up at the roadbed surface after the five days that the experiment beginning. Another transverse crack came at the other slope and the slopes become wider with increasing the number of cyclical freeze-thaw, and the three cracks joined up thoroughly

after the third cyclical freeze-thaw. The roadbed destroyed heavily finally experienced cyclical freeze-thaw. It is can be seen from the back-calculation that the stress at the roadbed center was less than the failure stress, and the stress at the shoulder was greater than the failure stress before the fourth cyclical freeze-thaw. After the third cyclical freeze-thaw the stress during freezing and thawing was always greater than the failure stress regardless of the center and shoulder of the roadbed. Therefore, the roadbed destroyed.

Table 5. Soil stress after each cyclical freeze-thaw

	Deformation modulus /MPa	Strain /%		Stress calculated /KPa		Failure stress /KPa
		center	shoulder	center	shoulder	
2	2.362	2.873	3.517	67.848	83.062	74.781
3	1.9382	3.598	4.090	69.736	79.283	61.387
4	1.887	3.595	4.153	67.833	78.362	60.305

### Conclusion

Two roadbed model testing revealed that the roadbed soil became looser with increasing the numbers of cyclical freeze-thaw to the roadbed without injected sodium sulfate solution though the roadbed had not structural destroy. But it was another road disease in the region with freshening wind. According to the criterion the salt content (1% in the experiment) was within the acceptable limits to the roadbed of saline soil with sulfate sodium, and the salt content was small compared with the salinity in dry and semidry areas of Northwest China. However, the roadbed destroyed heavily after experienced four cyclical freeze-thaw. During the freezing and thawing, the deformation of the roadbed was the total of the compactness, frost heave and salt expansion. Combined with the experimental results of uniaxial compressive strength, the study indicated that during the cyclical freeze-thaw the soil strain was far greater than the failure strain and destroyed even if there was no external force. The difference of the relative displacement between the surface and the shoulder was greater and the extent of the uneven settlement became more severe with increasing the number of cyclical freeze-thaw, which made a tensile failure to the roadbed. In addition the soil inner stress was greater than its ultimate stress under cyclical freeze-thaw by the back-calculation of the stress to each cyclical freeze-thaw. In a word during the freezing and thawing the inner strain and the stress of the roadbed were all greater its limit, thus the roadbed destroyed even if there was no external force.



### Acknowledgments

Funding for this work was provided by the National Natural Sciences Foundation of China (No.40901039, No.40971046), the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Sciences of China (No.40821001), the Western Project Program of the Chinese Academy of Sciences (No.KZCX2-XB2-10), and the West Light Doctoral Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No.290928591). All support is gratefully acknowledged.

### References

1. Guo J, Song J, Wang Y. 2007. Experimental analysis on the influence of cyclical freeze-thaw on strength parameters of saline soil. *Subgrade Engineering* 1: 46-48.
2. Wang D, Ma W, Chang X, Sun Z, Feng W, Zhang J. 2005. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing. *Chin. J. Rock Mech. Eng.* 24(23): 4313-4319. (in Chi-nese)
3. Qi J, Vermeer P, Cheng G. 2006. A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost. Periglac. Process.* 17: 245-252.
4. Yong R., Boonsinsuk P., Yin C. 1985. Alternation of soil behavior after cyclic freezing and thawing. *Proc. Int. Symp. Ground Freezing, 4<sup>th</sup>*, Rotterdam, Netherlands Balkema A (ed), 187-195.
5. Broms B, Yao Y. 1964. Shear strength of a soil after freezing and thawing. *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 90(4): 1-26.
6. Chuvilin Y, Yazynin O. 1988. Frozen soil macro and micro structure formation. *Proc Int. Conf. Permafrost, 5<sup>th</sup>*, Trondheim, Norway, Tapir Publishers, 320-323.
7. Bondarenko G., Sadovsky V. 1994. Water content effect of the thawing clay soils on shear strength. *Proc. Int. Symp. Ground Freezing 7<sup>th</sup>*, Rotterdam, Netherlands Balkema A (ed), 123-127.
8. Ono T., Mitachi T. 1997. Computer controlled triaxial freeze thaw shear apparatus. *Proc. Int. Symp. Ground Freezing, 8<sup>th</sup>*, Rotterdam, Netherlands Balkema A (ed), 335-339.
9. Swan C, Greene C. 1998. Freeze-thaw effects on Boston blue clay. *Proceedings, Soil Improvement for Big Digs, Annual Conference*, Am. Soc. Civ. Eng. Maher A (ed), Yang D (ed) 81:161-176.
10. Velli Y. 1980. *Foundations on complex permafrost soils*, In: "U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, SR 80-40 and Building under cold climates and on permafrost: collection of papers from a U.S.-Soviet joint seminar," Leningrad, USSR 204-217.
11. Bing H., He P., Yang C., Shi Y., Zhao S., Bian X. 2007. Impact of sodium sulfate on soil frost heaving in an open system. *App. Clay Sci.* 35: 189-193.
12. Bing H., He P. 2011. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil, *Env. Earth Sci.* 64(2): 308-313.

# Thermal ratchet uplift buckling and periglacial morphologies

James G A Croll

University College London  
London WC1 E 6BT England, e-mail: j.croll@ucl.ac.uk

**Abstract.** Growth of periglacial features such as hummocks, frost mounds, palsas, pingos, etc are generally believed to be the result of one or other form of differential heave process. This paper argues that the prevailing models for the development of these characteristic features appear to be incomplete. It postulates an alternative model which, in addition to any effects from differential heave, relies upon the development of high levels of in-plane compressive stress in the seasonally frozen surface layers or in the underlying permafrost. These compressions are suggested to result from the restraint to the expansions otherwise occurring when the frozen layers are subject to increases in temperature. A thermally induced upheaval buckling under these conditions is consistent with the observed dome-shapes characterising many of these periglacial morphological features. Nonlinearities in material properties will mean that upon cooling upward growth may not be recovered. The result is a gradual growth of non-recoverable increments of uplift, which might be characterised as forms of thermal ratchet uplift buckling.

**Keywords:** active layer; contraction; expansion; frost mounds; heave; hummocks; periglacial morphologies; palsa; permafrost; pingos; ratchetting; thermal loading

## Роль температурных деформаций пород в образовании перигляциальных форм рельефа

Джеймс Г. А. Кролл

Университетский колледж Лондона  
Англия, Лондон WC1 E 6BT, e-mail: j.croll@ucl.ac.uk

**Аннотация.** Принято считать, что рост перигляциальных форм рельефа, таких как земляные кочки, криогенные бугры, пальса, пинго и др., является результатом той или иной формы процесса дифференцированного пучения пород. В данной работе показано, что господствующие представления о развитии этих характерных форм рельефа, не совсем полны. Предложена альтернативная модель, которая помимо дифференцированного пучения учитывает возникновение больших плоскостных напряжений сжатия в сезонно-мерзлом слое или в многолетнемерзлых породах. Предполагается, что эти напряжения возникают вследствие ограничения возможности расширения при повышении температуры мерзлых пород. Поднятие пород, обусловленное температурными деформациями, в этих условиях согласуется с характерной куполообразной формой, которая наблюдается у многих рассматриваемых перигляциальных образований. При понижении температуры пород восстановление деформации поднятия может не происходить из-за неоднородности свойств массива пород. В результате происходит постепенный рост бугров вследствие накопления приращений поднятия.

**Ключевые слова:** деятельный слой; сжатие; расширение; мерзлотные бугры; пучение; кочки; перигляциальные формы рельефа; пальса; криолитозона; пинго; температурные деформации.

# Thermal ratchet uplift buckling and periglacial morphologies

James G A Croll

## Background

A common form of failure of asphalt pavements involves the formation of short wavelength, upheaval buckling, blister-type, deformations. Typical examples are shown in Fig 1. While these upheaval



Fig. 1. Asphalt blisters on pavements of London.

blisters have sometimes been explained in terms of a build-up of gas pressure beneath the asphalt, it is now becoming clear that a much more likely explanation for their development takes the form of thermal upheaval buckling caused by the compressions developed when in-plane expansion is restrained during the solar heating of the asphalt sheet (Croll, 1999, 2007a). The upheaval buckling mechanics for asphalt pavements represented an extension of some simple ideas that had previously been developed for the related problem of thermally induced uplift buckling of sub-sea oil and gas pipelines (Croll, 1998). In discussions following the analysis of asphalt blisters it became apparent that in areas of permafrost the growth of the geometrically very similar features known as pingos, despite being many orders of magnitude greater in spatial and temporal scales, could also be explained in terms of a form of upheaval buckling powered by the seasonal thermal expansion and contraction cycle (Croll, 2004) – see Fig. 2. Subsequent attempts to have the ideas accepted by the periglacial community have meet with considerable resistance (Croll, 2005), although the associated discussions have had the beneficial effect of drawing to the author's attention the possibility that related forms of thermal ratchetting may be even more prevalent in shaping of periglacial environments

than appears to have been previously acknowledged (Croll, 2006; Croll and Jones, 2006). The following summarises how in the development of a sub-class of these periglacial features, involving the growth of some form of seasonal or perennial upward surface dome formation, thermally induced uplift buckling may be playing an active part.



Fig. 2. Pingos in Northern Canada.

## Current Models

The most prevalent hypothesis explaining the development of the various periglacial surface dome features involves one or other form of differential frost heave (dfh). A recent collaborative research programme (Walker et alia, 2005) attempted to refine earlier classification schemes for periglacial features but concluded that “no single term applies to features across the bioclimate gradient that appear to have a similar genesis related to differential frost heave”. This study found support for the cause being basically “frost cracking and differential frost heave”. A theoretical model of the contribution from differential frost heave (dfh), especially in the development of hummocks, used a form of symmetry breaking heave triggered by the development of discrete ice lenses (Peterson and Krantz, 2003).

Palsas and pingos are distinguished from frost mounds and hummocks, by their relatively larger in-plane dimensions, and the extent to which underlying permafrost is present and involved in their development. Once again the explanation for their growth could be regarded as a form of dfh. Pingos, for example, normally occur in areas

of recent exposure to the effects of downward aggradation of permafrost. As such they often occur in the beds of lakes, or in river valleys, which have for various reasons been drained of the water that previously insulated the bed layers from the penetration of permafrost experienced by surrounding terrain. The generally accepted explanation for the formation of pingos was first suggested by Porsild (1938), with the mechanics greatly elaborated in the many works of Mackay, see for example (Mackay, 1962, 1987, 1998). This suggests that it is a build-up of pore water pressure beneath the lower permafrost boundary that causes a locally weakened area to be pushed-up into the characteristic dome formation. This local weakening gives rise to what is effectively a form of dfh. Ground water extruded into the space created by the upward incremental deformation of the permafrost layer, as a result of the high pore-water pressure in the underlying unfrozen talik, will partially freeze to form an ice lens, which is an additional feature of the developing pingo. This process is reasoned to continue over a period of many years, perhaps centuries, until some sort of stasis is reached between the downward growth of the lower permafrost boundary, the fluctuations of the underlying hydrostatic pressure within the unfrozen talik, and the upward deformation of the pingo.

There is very comprehensive field data, systematically collected over a long period of time, for the growth of at least closed system pingos. This convincingly demonstrates the conditions under which pingos are likely to emerge from areas of aggrading permafrost and furthermore that substantial pressure build-ups do occur beneath the growing pingos (Mackay, 1998).

#### **Some limitations of current models**

A problem with the current models for the growth of pingos, and to some extent palsas although the explanations for their growth is rather less well documented, is associated with their generic shape. As Figs. 1 and 2 illustrate there is a strong preponderance for either asphalt blisters or pingos to develop basically axisymmetric forms of geometry. The many photographs and field observations, see for example Mackay (1998), suggest that the extents of the recently drained lake-beds from which pingos typically grow can be measured in terms of kilometres. In contrast, the ponds and the eventual regular dome deformations characterising the pingo may be at most a few 10's to 100's of metre in horizontal extent. Even allowing for local thinning of the permafrost and pond ice layer relative to that over the rest of the aggrading lake bed, it seems

probable that the pressure would find relief through an overall heave deformation of the whole lake bed. As elaborated at greater length elsewhere, Croll (2005) the pressure required to produce a given level of upward pingo bulge deformation, for say pingo 14 summarised by Mackay (1998) in his Figures 34 to 40, would be nearly 900 times higher than for this same upward deformation to be produced through an overall heave of the very much thicker lake bed. A similar imbalance between the pressures required and the observed development of open system pingos has been highlighted by Muller (1963). If the preferred mode were to be assessed more realistically in terms of which mode, the local pingo, or the overall heave, see Figure 4 and appendix I of Croll (2005), would for a given excess pore pressure require the release of the lower energy, then the local pingo mode would be even less likely. For the pingo the pressure required would be almost 66000 times that required for the overall, heave, mode. It seems reasonably clear that without the intervention of some other fairly powerful mechanical cause there would be a tendency for the system to relieve the pressure energy through overall, long wavelength, heave deformations rather than the local, short wavelength, pingo distortion.

A second troubling aspect in the current modelling of pingos is the dominance of deformation geometries that exhibit a robust tendency towards axisymmetric forms, particularly for closed system pingos. Given the usually irregular shapes of the lake beds, or the relatively thinned residual pond areas, from which they emerge, it would seem more probable that the geometry into which any excess of underlying pore water pressure would distort the permafrost would reflect this base irregularity. In many instances shown in photo-graphs (Mackay, 1998), it is apparent that "most pingos tend to be more or less circular" (Washburn, p180, 1979), with a tendency for a single or sometimes a cluster of relatively small diameter, often circular plane-form, regular dome-like pingo geometries to form (see for example Figures 14, 22, Mackay, 1998). It is difficult to account for this generally regular nature of their geometry if excessive underlying pressure were to be the sole cause of their upward growth.

But there is a third aspect of the previous models suggested to account for pingo growth that for the present author is even more troubling. At least for open system pingos, Muller (1959, 1963) was similarly vexed by this same problem. As reported by Washburn (1979) there is "an objection to the purely artesian explanation of (open system) pingos" in that the "calculated



pressures required to dome a pingo are extreme compared to most measured artesian pressures” concluding that “therefore, additional pressure effects are probably involved”. Muller’s (1959,1963) ingenious attempts to invoke a form of mechanism analogous to the operation of a hydraulic press received little support from say Scheidegger (1970) and does seem to be based upon empirically unproven pressure levels being developed. Even for closed system pingos the evidence suggests that the build-up of underlying pore water pressures would not be adequate to induce the material distortions associated with the growth of the pingos. There is of course clear evidence that build-up of pore water pressure in the talik does occur. However, from all the evidence that the present writer has been able to gather, this pressure build-ups are generally not even sufficient to equilibrate the weight of the saturated sand and gravel that forms the permafrost overburden, Croll (2005). To induce an upward incremental deformation, in the form of a local bulge, the pore water pressure would have to overcome not just the overburden weight but also the elastic-plastic energy required to be sustain this incremental deformation. At small deformations, and assuming a bending rather than membrane resistance, the pressure  $p$  required to elastically deform a circular disk of radius  $a$  by an amount  $w$  will be given by

$$p = \frac{64 D.w}{a^4} = 5.3, \frac{Et^3.w}{(1-\nu^2)a^4}, \quad (1)$$

where  $D=Et^3/12(1-\nu^2)$  is the elastic bending stiffness of the disk having thickness  $t$ , modulus of elasticity  $E$  and Poisson’s ratio  $\nu$ . For Pingo 14 (see Mackay 1998) taken to have a thickness 22m, radius 70 m, an assumed Poisson’s ratio of 0.4 and elastic modulus taken conservatively to be 5 GPa, a 0.03 m deformation increment which is reported to have been the average annual increment over the period 1973 to 1976, Mackay (1998), would require an over-pressure  $p=423 \text{ kN/m}^2$ . With this being equivalent to an hydraulic head of 42 m, the total sub-pingo pore water pressure required to both equilibrate the weight of the 22 m of overburden and to overcome the elastic resistance would therefore need to be around  $(22 \times 1.5 + 42) = 75 \text{ m}$  of hydraulic head – and this conservatively as-sumes a density of overburden at just 1.5. Even making allowance for the somewhat reduced energy needed when visco-plastic effects are taken into account, this required pressure head is well beyond anything recorded in bore hole or pressure transducer tests. Under these circumstances it would appear to be somewhat less than “clear (that) the water pressure beneath Pingo 14 was great enough to uplift and deform

more than 25 m of super-incumbent material (ie the frozen pingo overburden and subjacent ice core)”, as suggested by Mackay (1998). It appears therefore that excess pore water pressure alone cannot be accounting for the growth of pingos. Just as was concluded by Muller (1963) there seems to be a need for some other mechanism capable of providing the missing energy that is driving the growth of both open and closed system pingos.

For the relatively smaller palsas, frost mounds and hummocks there are other reasons for supposing that dfh may not be the sole reason for their development. If dfh were to be triggered by say a perturbation from an otherwise uniform heave caused by growth of discrete and non-symmetrically disposed ice lens, as described in the previous theoretical treatment of Peterson and Krantz (2003), then it becomes difficult to understand why upon thaw the surface distortion caused by the dfh would not be fully recovered. As for the case of the pingos it appears that some other source of mechanical energy may be interacting with any dfh to induce the permanent growth of these surface dome formations.

As a potential candidate for this additional source of mechanical energy the following considers whether the forces resulting from constrained expansion during any period of warming of the frozen layers, be they seasonal surface freezing or perennial permafrost, may be sufficient to account for the development of surface dome formations.

### Alternative hypothesis

Surface temperatures are affected by various thermal cycles derived from the Earth’s interaction with the sun and to a lesser extent changes in the nature of the geothermal gradient. From the fleeting temperature changes experienced when heavy cloud passes across the sun, to the circadian fluctuations experience by the Earth spinning on its axis, to the seasonal cycles related to the tilt of this axis relative to the plane of the Earth’s annual orbital cycle, the surface and upper ground experience considerable fluctuations in temperature. How deep these temperature fluctuations penetrate is a complex function of many material parameters, but everything else being equal will be dominated by the time period of the thermal cycle being experienced. The depth of penetration of the thermal gradient will in its turn govern the spatial scale of any thermally induced upheaval deformations. Fig. 3 provides a representation of how upheaval could occur in permafrost when it is subject to a cycle of thermal loading. Although this description relates to the growth of long wavelength pingos

there are grounds for believing that closely related phenomena could be occurring in the development of short wavelength features such as hummocks, frost mounds etc. A drop in surface temperature over a thermal cycle would at a fairly early stage, somewhere between points (1) and (2) of Fig. 3(a), start to develop top-down cracking. Penetration of moisture into these cracks will as a result of freezing ensure that the tensile strains are not recovered during the subsequent warming phase. During the warming phase between points (2) and (3) compressive stresses will be generated as a result of the restraint to the outward expansion otherwise wanting to occur. Under certain conditions, and particularly if dfh had at an early stage induced what could be regarded as an initial geometric imperfection, these compressions could be expected to induce an upward deformation of the ice sheet. Why the upward deformation occurring during the warming period, up to point (3) of Fig. 3(a), is not recovered during the following cooling period will vary according to whether the upheaval occurs in permafrost or a seasonally frozen layer. For the pingo it will be development of ice lenses beneath the upwardly deforming permafrost that will tend to inhibit the recovery of the upheaval, together with the cracking that would relieve the tensile stresses developed during cooling.

Taking account of the consideration that the greatest intensity of thermal energy will be in the top few metres, the thermo-mechanical ratchet process would predict the greatest growth of pingos to occur between spring and late summer. Little if any growth would be expected during the cooling autumn to late winter period; indeed, the thermal contractions over this period could result in some recovery of the previous incremental upward growth. Published growth rates are not available to check whether predicted maximum growth rates occur over the spring to late summer period; were they to be available would help to decide whether underlying pore water pressure or thermal effects represent the driving force for pingo growth.

At least some forms of hummock, frost mound and palsas could be formed by related forms of thermo-mechanical ratchet. When in autumn the saturated ground starts to freeze, contraction cracks will fill with water and freeze. Any short term warming prior to thaw will develop compression in the frozen soil that could be sufficient to induce incremental uplift. Growth increments could be expected each time the temperature increases above that required to trigger additional growth.

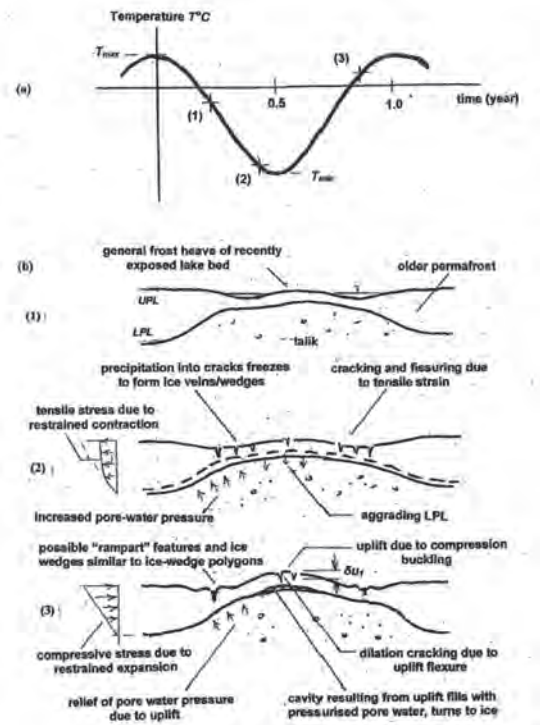


Fig. 3. Mechanism for the seasonal growth of pingos, showing: (a) a typical seasonal surface temperature cycle with indicative times for the; (b) sections through a typical location where pingos are likely to form, with the locking-in of the shape and material cracking during the cooling constrained contraction, period (1) – (2), and upheaval occurring during warming expansion, period (2) – (3).

Full recovery would be prevented by mass movements occurring during the thawing period.

Theoretical modelling reported elsewhere (Croll, 2005, 2007b) has demonstrated that the temperature increases needed to induce upward growth of surface domes, ranging in spatial scales from hummocks through to pingos, are well within the ranges reported from field studies.

### Closing Remarks

This paper has suggested that thermo-mechanical ratchet processes, derived from fluctuations in the levels of solar radiation reaching the Earth's surface, may be contributing to the development of periglacial features such as hummocks, frost mounds, palsas, pingos, etc. It has suggested that the prevailing models for the development of these characteristic features, based as they are on one or other form of differential frost heave, appear to be incomplete. An alternative model has been postulated which, in addition to any effects from differential heave,

relies upon the development of high levels of in-plane compressive stress in the seasonally frozen surface layers or in the underlying permafrost. These compressions would result from the restraint to the expansions otherwise occurring when the frozen layers are subject to increases in sub-zero temperature. Thermally induced upheaval buckling under these conditions would be consistent with the observed dome-shapes that characterize many of these periglacial morphological features.

The paper has suggested that thermo-mechanical ratchet buckling to form various classes of seasonal or perennial upward surface dome-like morphologies may be widespread in periglacial environments. However, in most cases there is a clear need for better growth data and for more reliable information on the many thermal and material properties that would be critical in controlling such thermal buckling processes.

### References

- Croll, J. G. A. 1998. A simplified analysis of thermally buckled subsea pipelines. *Int. J of Offshore and Polar Engng.*, 8: 283-291.
- Croll, J. G. A. 1999. Thermal buckling of pavement slabs. Internal Report, Department of Civil Engineering, UCL, eventually published, *J. of Transport*, 158, Proc ICE, 2005, 115-126.
- Croll, J. G. A. 2004. An alternative model for "pingo" formation in permafrost regions. *Paper presented at 21st Int. Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, ICTAM-04, Warsaw, 15-21 Aug., 2004.
- Croll, J. G. A. 2005. Aspects of the mechanics of pingo formation in permafrost regions, Internal UCL Research Report, 2004, submitted to *Proc Royal Society*.
- Croll, J. G. A. 2006. From asphalt to the Arctic: new insights into thermo-mechanical ratchetting processes, III *Int. Conf. on Computational Mechanics*, Lisbon, 5-8 June.
- Croll, J. G. A. 2007a. A new hypothesis for the de-velopment of blisters in asphalt pavements, appearing in *Int. J of Pavement Engineering*, 9(1), February, 2008, 59-67.
- Croll, J. G. A. 2007b. Thermal ratchet buckling and periglacial morphologies, full version of present paper, to be submitted for publication.
- Croll, J. G. A. 2008. Thermally induced pulsatile motion of solids. *Proc. Royal Society, A*, March, 2009, 465(2103), 791-807.
- Croll, J. G. A. and Jones, E. W. J. 2006. Thermal ratchetting in periglacial environments, *Asian Conf. on Permafrost*, Lanzhou, China, 7-9 August.
- Mackay, J. R. 1962. Pingos of the Pleistocene Mackenzie River delta area, *Geog. Bull*, 18: 21-63.
- Mackay, J. R. 1987. Some mechanical aspects of pingo growth and failure, western Arctic coast, Canada. *Canadian J. of Earth Sciences* 24: 1108-1119.
- Mackay, J. R. 1998. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study, *Geographie physique et Quaternaire* 52: 271-323.
- Muller, F. 1963. Observations on pingos (Beobachtungen uber pingos), *Canada Natl. Research Council*, Tech Translation, 1073, 117 pp.
- Peterson, R. A, Krantz, W. B. 2003. A mechanism for differential frost heave and its implications for patterned-ground formation, *J of Glaciology* 49(164): 69-80.
- Porsild, A. E. 1938. Earth mounds in unglaciated Arctic northwest America. *Geographic Review* 28: 46-58.
- Schidegger, A. E. 1970. *Theoretical Geomorphology*, 2nd Edit, Springer-Verlag, 435 pp.
- Walker, D. A, Epstein, H.E, Kuss, P, Michaelson, G, Ping, C.L, Raynolds, M. K, Romanovsky, V. E, Tarnocai, C. Interactions of multiple factors for patterned-ground features across the Arctic bioclimate gradient, [www.geobotany.uaf.edu/library/powerpoint/WalkerDA041027AGU.pdf](http://www.geobotany.uaf.edu/library/powerpoint/WalkerDA041027AGU.pdf)
- Washburn, A. L. 1979. *Geocryology: A Survey of Periglacial Processes and Environments*. Edward Arnold, 406 pp.

## Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay on freeze-thaw cycles

Mahmoud Ghazavi, Mahya Roustaei

Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology  
Tehran, Iran, e-mail: m\_ghazavi@kntu.ac.ir

**Abstract.** Admixtures and geotextiles are frequently used in practice to stabilize soils and to improve their load capacity but the effect of using these materials on decreasing the influences of freeze-thaw cycles has not been studied yet. Freeze-thaw cycling is a weathering process which is normal in cold climates. In freeze cycles thermodynamic conditions at temperatures just below 0°C cause translocation of water and ice which can change the engineering properties of soils, such as permeability, water content, stress-strain behavior, failure strength, elastic modulus, cohesion, and friction angle. In this study a fine-grained soil is reinforced with 1-3 layers of geotextile to evaluate the behavior of reinforced cohesive soil reinforced after 7 freeze-thaw cycles. The sample height, water content, stress-strain behavior, failure strength were measured in initial unfrozen soil as well as in subsequent thawed soil and the changes in soil behavior were observed.

**Keywords:** freeze thaw cycles; nonwoven geotextile; unconfined strength; silty soil.

## Лабораторная оценка влияния циклов промерзания-оттаивания на свойства глинистого грунта, укрепленного геотекстилем

Махмуд Газави, Махия Рустаеи

<sup>1</sup>Факультет гражданского строительства  
Тегеранского технологического университета им. Насирэддина Туси  
Иран, г. Тегеран, e-mail: m\_ghazavi@kntu.ac.ir

**Аннотация.** Для укрепления грунтов и повышения несущей способности оснований в строительной практике часто используются добавки и геотекстильные материалы. Однако эффективность использования таких материалов по снижению влияния циклов промерзания-оттаивания еще не исследовалась. Многократное промерзание-оттаивание является фактором процесса выветривания, характерным для холодных регионов. В циклах промерзания термодинамические условия при температуре чуть ниже 0° С вызывают перемещение воды и льда, что может привести к изменению инженерных свойств грунтов, таких как водопроницаемость, влажность, деформируемость, предел прочности, модуль упругости, сцепление и угол внутреннего трения. В данной работе представлены результаты исследований, выполненных на образцах мелкодисперсного грунта, укрепленного 1-3 слоями геотекстиля, для оценки поведения укрепленного связного грунта после 7 циклов промерзания-оттаивания. Определялись высота образцов, влажность, зависимость деформаций от напряжений, предел прочности грунта в талом состоянии, а также после оттаивания, и наблюдали их изменения.

**Ключевые слова:** циклы промерзания-оттаивания; нетканый геотекстиль; прочность при неограниченном сжатии; суглинок.



# Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay soil on freeze-thaw cycles

Mahmoud Ghazavi, Mahya Roustaei

## Introduction

Low strength of many cohesive soils has been overcome by reinforcing the soil with geosynthetic materials such as geotextiles. Several laboratorial and theoretical investigations have been conducted in this field, most of which are related to granular soils reinforced with geotextile, while limited studies have been made concern in cohesive soils reinforced with geotextiles. Lafleur et al. (1987) used a series of direct shear tests on highly plastic cohesive soil to evaluate and compare the behavior of woven and non-woven geotextiles on the behavior of clay. Krishnaswamy and Srinivasula Reddy (1988) reported the influence of the distance between the reinforced materials as well as moisture content of the sample by using undrained triaxial experiments on silty clay reinforced with a geotextile. Srivastava et al. (1988) studied the behavior of silty soil reinforced with geotextiles by using unconfined and triaxial tests. By analyzing the confining pressure, the number of reinforcing layers and the ratio of height to the diameter of the sample were evaluated. Al-Omari et al. (1989) performed CU and CD triaxial tests in order to study the behavior of clay reinforced with geomesh. In-draratna et al. (1991) studied the behavior of reinforced and unreinforced soft silty clays through UU triaxial test. Non-woven and woven geotextiles were used in that study. The use of non-woven geotextiles for reinforcing a near-saturated silty clay was evaluated by Ling and Tatsuoka (1993) using a plane strain device.

In cold climates, soils are exposed to freeze-thaw cycles which are important. Fine-grained soils influenced by freezing and thawing show changes in volume, strength, compressibility, densification, unfrozen water content, bearing capacity, and microstructure. In the permafrost regions like Canada, it was found that the embankment constructed on soil which had never experienced freeze-thaw cycles were damaged in just one year due to the loss of bearing capacity (Leroueil et al., 1991). Therefore, newly constructed highway embankments that are left unpaved for a few years may be damaged by freeze-thaw cycles (Eigenbrod, 1996).

Qi et al. (2006) reviewed the last efforts which were done to investigate the influences of freeze-thaw cycles on soil properties. They summarized these influences in two parts: physical properties like density and hydraulic permeability

and mechanical properties like ultimate strength, stress-strain behavior and resilient modulus of soils. According to this research, loose soils tend to be densified and dense soils become looser after freeze-thaw cycles. In addition, both loose and dense soils may retain the same void ratio after a number of cycles (Konrad, 1989). By increasing the large pores that are left after the thaw of ice crystals, the soil permeability will increase (Chamberlain et al., 1990). These cycles reduce the ultimate strength of soils. All over-consolidated soils exhibit a peak on the triaxial stress-strain curve and this peak is reduced or may even disappear (Graham and Au, 1985). Resilient modulus is one of the most important factors in pavement designs that will reduce significantly by even a small number of freeze-thaw cycles (Simonsen et al., 2002). Moreover, these cycles decrease the undrained shear strength considerably which is an important factor in fine-grained soil design (Graham and Au, 1985).

All above research work deals with unreinforced soil and thus the influence of freeze-thaw cycles on unconfined strength of soils is lacking, to the best knowledge of the authors. The main purpose of this study is to investigate the influence of freeze-thaw cycles on unconfined strength of a silty soil reinforced with geotextile.

## Methods

In this study, tests were carried out on a silty soil. This soil was selected because fine-grain soils are more susceptible to freeze-thaw cycles than coarse soils. The silt was classified as ML in the Unified Soil Classification System. The characteristics of this silt are presented in Table 1. The grain size distribution is illustrated in Fig. 1. The compaction curves developed by the standard Proctor compaction tests show that the soil has a maximum dry unit weight of approximately 1.6 g/cm<sup>3</sup> with optimum moisture content (OMC) of approximately 21%.

All prepared specimens are cylinder-shaped with 38.5 mm diameter and 77 mm height. A moisture content of 21% is chosen in specimen preparation. The samples were compacted in 4 layers in unreinforced condition and for reinforced condition geotextile layers were added to them in one and two layers (Fig.2). The physical and mechanical properties of the geotextile are provided in Table 2.

Table 1. Characteristics of the silty soil

Plastic Limit	49.75%
Liquid Limit	22.52%
Plasticity Index	9.66%

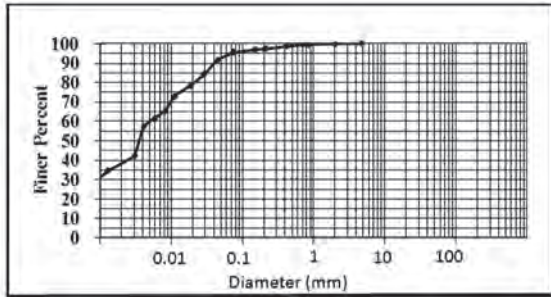


Fig.1. The grain size distribution of the silty soil.

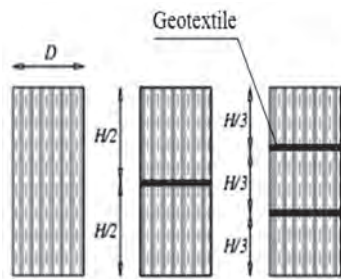


Fig.2. The arrangement of geotextile layers.

Table 2. Characteristics of the silty soil

Fabrication process	Non-woven
Thickness	2.5 mm
Mass per unit area	400 (g/m <sup>2</sup> )
Tensile strength	25 (kN/m <sup>2</sup> )

For freezing and thawing phases, specimens are placed in a digital refrigerator at -20°C for 6 hours and then at +25°C for thawing phase for 6 hours. The cycles were continued till 3 cycles. This was chosen because it was shown that the most decrease in soil strength would occur in primary cycles and after that a new equilibrium condition became predominant on samples (Ghazavi and Roustaei, 2010). These temperatures were used in some previous research work (Qi et al., 2004). 6 hours is a proportional period after which the alteration of specimens height would become constant.

Unconfined compression tests were performed on samples according to ASTM D5311-92. The strain rate was kept constant at 1.14 mm/min in all tests.

## Results

As mentioned in the previous section, several soil samples, with and without geotextile layers were tested to study the strength of reinforced soil in freeze-thaw cycles. Test results are shown in stress-strain variation. The samples are named GL-NC. Here GL and NC stand for geotextile layers and number of freeze-thaw cycle, respectively.

Fig. 3 shows the result of unconfined compression test on pure soil samples subjected to 0, 1 and 3 freeze-thaw cycles. As seen, by increasing the cycle number, the unconfined strength of soil decreases. The most strength reduction is about 75% and occurs after the 3 cycle.

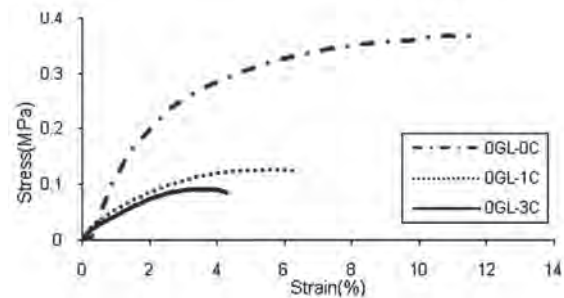


Fig. 3. Stress-strain variation of pure soil.

Fig. 4 represents the stress-strain variation for GL samples (soil with geotextile layers) before applying freeze-thaw cycles.

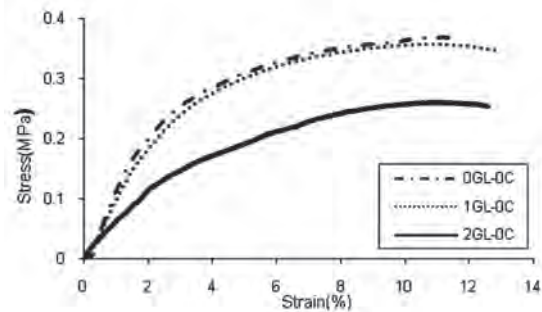


Fig. 4. Stress-strain variation of soil reinforced with geotextile layers before freeze-thaw cycles.

Figs. 5 and 6 illustrate the same results for GL samples after applying freeze-thaw cycles. As seen in these figures, although adding geotextile layers doesn't change the unconfined compression strength of silty samples before applying freeze-thaw cycles, but by applying the freeze-thaw cycles, the unconfined compression strength of reinforced soil samples increase. However, it is obvious that by adding 2 layers of geotextile to soil specimens, the strength reduction is negligible after cycles. This phenomenon can be illustrated from Figs.7 to 9.

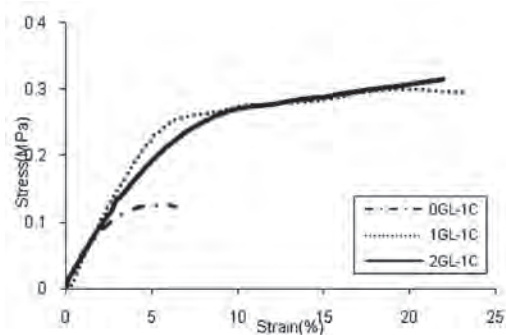


Fig. 5. Stress-strain variation of soil reinforced with geotextile layers after 1 freeze-thaw cycles.

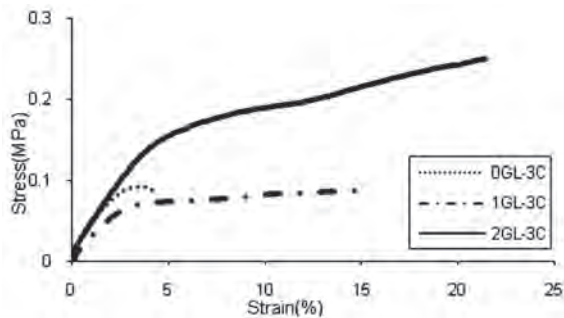


Fig. 6. Stress-strain variation of soil reinforced with geotextile layers after 3 freeze-thaw cycles.

Fig. 7 shows the compression strength reduction of pure samples versus the number of freeze-thaw cycles. Figs.8 and 9 illustrates the same results for reinforced samples. It is obvious from these figures that the final strength of the soil will decrease after applying the cycles in pure and 1-layer reinforced samples but in 2-layers reinforced samples there isn't reduction in final strength of the soil and the maximum strength will occur after the first cycles.

During freezing phase, ice crystals are formed and then, during thawing phase, these crystals start to melt and free water appears in the sample. The free water moves to lower parts of the sample due to gravity force. Consequently, upper parts of the specimen lose their moisture and soil grains become weaker. Therefore, the samples in thawing phase cannot return to its initial situation before freezing. This phenomenon leads to an increase in the sample height which is more than that of unreinforced sample. Fig. 10 shows the variation of the soil volume in freeze-thaw cycles. As it can be seen in this figure, volumetric increase of the soil specimens are considerable in pure samples and the samples which are reinforced with two layers of geotextile but for one layer reinforced samples there is a reduction in volume and after that the volume will increase to the initial amount.

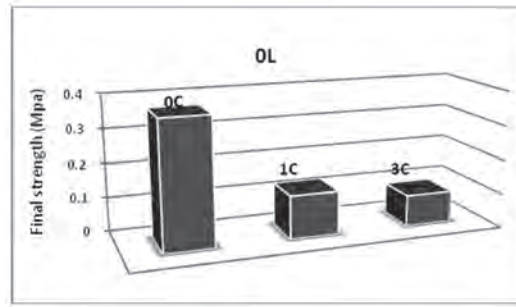


Fig. 7. Final strength variation of pure soil after 3 freeze-thaw cycles.

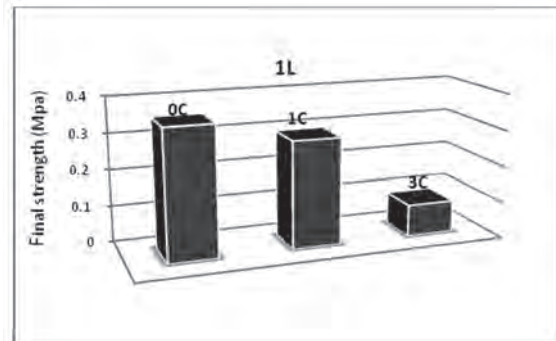


Fig. 8. Final strength variation of reinforced soil (1 layer of geotextile) after 3 freeze-thaw cycles.

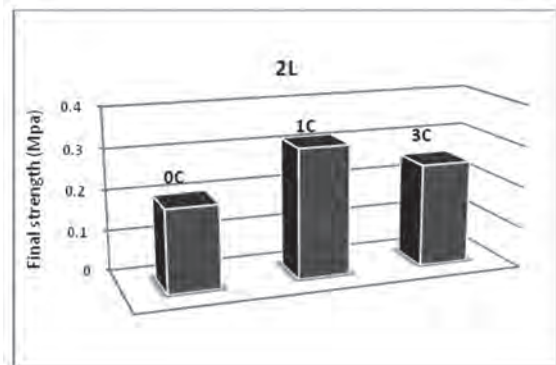


Fig. 9. Final strength variation of reinforced soil (2 layers of geotextile) after 3 freeze-thaw cycles.

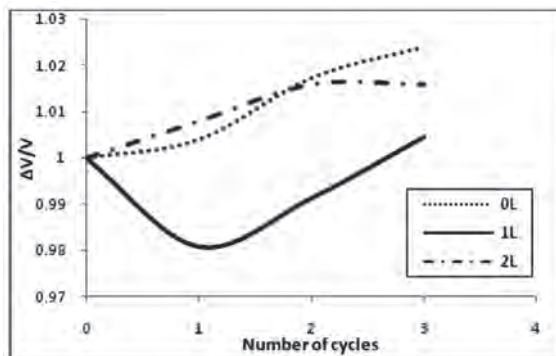


Fig. 10. Volume variation of pure and reinforced soil.



### Conclusion

In this paper, unconfined compression strength tests have been conducted to investigate the effects of freeze-thaw cycles on the strength of a silty soil reinforced with geotextile layers. The results show that:

- By increasing the number of freeze-thaw cycles, the unconfined compression strength of pure samples decrease about 40%.

- By using the 1 and 2 layers of geotextile in soil specimens, the unconfined compression strength of samples didn't experience considerable changes.

- After applying the first cycle the strength of one layer reinforced samples didn't change considerably but the third cycle reduces the unconfined compression strength of these samples about 40%.

- Freeze and thaw cycles doesn't have any considerable effect on 2 layers reinforced samples and

- Although the samples which are reinforced with 2 layers of geotextile have the least strength changes in freeze and thaw cycles but the least amount of frost heave occurs in 1 layer reinforced samples.

In general, based on the findings in this paper, it is recommended that in cold climates where soils are affected by freeze-thaw cycles, geotextile layers are preferable and the number of geotextile layers are affected by the aim of reinforcement (strength increase, frost heave decrease).

### References

1. Lafleur, J., Sall, M., Ducharme, A., 1987. Frictional characteristics of geotextiles with compacted lateritic gravels and clays. *Proceedings of Geosynthetics* 87 (1): 205–215.

2. Krishnaswamy, N.R., Srinivasula Reddy. 1988. Behavior of reinforced earth under triaxial compression. In: *Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles*.

3. Srivastava, R.K., Jalota, A.V., Pankaj Kumar. 1988. Strength and deformation behaviour of geotextile reinforced alluvial silt. In: *Proceeding of the First Indian Geotextiles Conference on Reinforced Soil and Geotextiles*.

4. Al-Omari, R.R., Al-Dobaissi, H.H., Nazhat, Y.N., Al-Wadood, B.A., 1989. Shear strength of geomesh reinforced clay. *Geotextiles and Geomembranes* 8 (4): 325–336.

5. Indraratna, B., Satkunaseelan, K.S., Rasul, M.G., 1991. Laboratory properties of a soft marine clay reinforced with woven and nonwoven geotextiles. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM 14 (3): 288–295.

6. Ling, H.I., Tatsuoka, F., 1993. Laboratory evaluation of a nonwoven geotextile for reinforcing onsite soil. *Proceedings of Geosynthetics* 93 (2): 533–546.

7. Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M., Konrad, J.M., 1991. Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain Sea clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(5): 690–697.

8. Eigenbrod, K.D., 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities on soft fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 529–537.

9. Qi, J., Vermeer, P.A., Cheng, G., 2006. A Review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and Periglac. Process.* 17: 245–252.

10. Qi, J., 2006. Influence of freeze-thaw on the strength of overconsolidated soils. *State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute*.

11. Konrad, J.M., 1989. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology* 16: 291–303.

12. Graham, J., Au, VCS, 1985. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. *Canadian Geotechnical Journal* 22(1): 69–78.

13. Chamberlain, E.J., Iskander, I., Hunsiker, SE. 1990. Effect of freeze-thaw on the permeability and macrostructure of soils. *Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A. Special Report 90-1: 145–155.

14. Simonsen, E., Janoo, V.C., 2002. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *ASCE Journal of Cold Regions Engineering* 16(1): 28–50.

15. Qi, J.L., Zhang, J.M., Zhu, Y.L., 2004. Influence of freezing–thawing on soil structure and its soils mechanics significance. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (supp. 2): 2690–2694.

16. Ghazavi, M., Roustaie, M. 2010. The influence of freezethaw cycles on the unconfined compressive strength of fiberreinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 61: 125–131.



# Low temperature freezing of water adsorbed on clays in view of DSC and MDSC experiments

Tomasz Kozlowski

Kielce University of Technology

Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce, Poland, 25-314, tomkoz@tu.kielce.pl

**Abstract.** Results of Differential Scanning Calorimetry DSC experiments on homoionic montmorillonites ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) and Na-kaolinite are reported. The low temperature exothermic peaks have been observed on cooling down to  $-90^\circ\text{C}$  after initial peak corresponding to breakdown of supercooling of water in macro- and mezopores. In some experiments, the samples were then warmed to  $-10^\circ\text{C}$  or  $-5^\circ\text{C}$  and cooled again to  $-90^\circ\text{C}$ . According to expectations, the non-equilibrium exothermic peaks were absent in this case, being replaced by a wide peak analogical to that obtained on warming. However, the low temperature exothermic peaks were still observed, but their fields were characteristically cut, proportionally to the extent of the earlier warming. The stochastic deconvolution applied to endothermic peaks obtained on warming allowed to compare the thermal effects corresponding to cooling and warming. The results unexpectedly give evidence that the portion of water, solidification of which can be attributed to the low temperature exothermic peaks, on warming melts in a wide temperature range and a separated melting point does not exist. Additional experiments by use of Modulated (MDSC) allowed to measure the apparent thermal capacity of the soil-water system down to  $-85^\circ\text{C}$ . The results show that in temperatures corresponding to the low temperature exothermic peaks only a small portion of water undergoes phase change, and even at  $-85^\circ\text{C}$  a significant amount of the adsorbed water remains unfrozen.

**Keywords:** soil freezing; DSC; MDSC; adsorbed water; homoionic clays.

## Замерзание прочносвязанной воды в глинах при низких температурах в свете экспериментов ДСК и МДСК

Томаш Козловски

Кельценский технологический университет

Польша 25-314, г. Кельце, ул. Тысячелетия Панства Польского 7, e-mail: tomkoz@tu.kielce.pl

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментов, проведенных на гомоионных формах монтмориллонита ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) и Na-каолинита с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Низкотемпературные экзотермические пики (скачки температуры) наблюдаются при охлаждении образцов вниз к  $-90^\circ\text{C}$  после начального пика, соответствующего прекращению переохлаждения воды в макро- и мезопорах. В некоторых экспериментах образцы нагревались до  $-10^\circ\text{C}$  или  $-5^\circ\text{C}$ , затем снова охлаждались до  $-90^\circ\text{C}$ . Как и ожидалось, в этом случае неравновесные экзотермические пики отсутствовали; вместо них наблюдался плавный ход в изменении температуры, аналогичный тому, что получался при нагревании. Однако, низкотемпературные экзотермические пики по-прежнему наблюдались, но их протяженность сокращается пропорционально степени предшествующего нагревания. Стохастический деконволюционный анализ эндотермических пиков, полученных при нагревании, позволил сравнить тепловые эффекты, соответствующие охлаждению и нагреванию. Результаты свидетельствуют вопреки ожиданиям, что часть воды, кристаллизацию которой можно соотнести с низкотемпературными экзотермическими пиками, при повышении температуры тает не при одной температуре плавления, а в широком спектре температур. Дополнительные эксперименты с использованием метода модулированной дифференциальной сканирующей калориметрии (МДСК) позволили провести измерения кажущейся теплоемкости водногрунтовой системы до температуры  $-85^\circ\text{C}$ . Выявлено, что при температурах, соответствующих низкотемпературным экзотермическим пикам, происходит фазовый переход лишь небольшой части воды, и даже при температуре  $-85^\circ\text{C}$  значительная часть прочносвязанной воды остается незамерзшей.

**Ключевые слова:** промерзание грунта; ДСК; МДСК; прочносвязанная вода; гомоионные глины.

# Low temperature freezing of water adsorbed on clays in view of DSC and MDSC experiments

Tomasz Kozłowski

## Introduction

In a paper of Anderson and Tice [1], who investigated several homoionic clays by DTA, an occurrence of characteristic low temperature exothermic peaks was reported. The authors observed, in addition to an exothermic peak corresponding to the initial freezing, one, two or three exothermic peaks between  $-35^{\circ}\text{C}$  and  $-60^{\circ}\text{C}$ . They attributed those peaks to the solidification of the water adsorbed on the flat surfaces of clay minerals. In a later paper [2], the existence of the exothermic peaks was confirmed by DSC. However, no corresponding endothermic peaks have ever been observed on warming.

Because of the role played by the phase changes of the water present in soils or other porous media in the heat and mass transport processes, the phenomena have been being investigated by many authors for at least 60 years. During the last decade, results of experiments by use of the nuclear magnetic resonance NMR [3]-[5], differential scanning calorimetry DSC [6], the time domain reflectometry TDR [7], and the dielectric capacity method [8] have been reported. Nevertheless, the nature of the unfrozen water phenomenon has not been clearly explained. Particularly, the question of the existence and nature of the low temperature exothermic peaks (LTEP) still remains open. The investigations are usually restricted to the range of temperatures too high to observe the LTEP or phenomena connected with them.

The objective of the research program reported in the paper was to answer several basic questions as follows:

- 1) Do the low temperature exothermic peaks (LTEP) really occur in soil-water systems on cooling?
- 2) Can they be attributed to the solidification of the water adsorbed on clay minerals?
- 3) Do the mineral composition and the exchangeable cations complex affect the number and characteristic temperatures of the LTEP?
- 4) Are the corresponding endothermic peaks observed on warming?

## Laboratory procedures

### *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*

The TA DSC Q200 differential scanning calorimeter with a refrigerated cooling system RCS90 was used in the experiments. The RCS90 enables cooling within an operating range of  $-90^{\circ}\text{C}$  to  $550^{\circ}\text{C}$ .

The soil samples placed in aluminum hermetic pans were cooled with the scanning rate  $2.5\text{ K/min}$  to  $-90^{\circ}\text{C}$  and then warmed with the scanning rate  $5\text{ K/min}$  to  $+20^{\circ}\text{C}$ . The selected cooling rate  $2.5\text{ K/min}$  was the same as in the experiments of Anderson and Tice [1]. During the experiment, the calorimetric cell was purged with dry nitrogen at a flow rate of  $50\text{ ml/min}$ .

### *Modulated DSC (MDSC)*

In MDSC, a sinusoidal temperature oscillation is overlaid on the traditional linear ramp. The net effect is that heat flow can be measured simultaneously with changes in heat capacity. Using Fourier transformation, the heat flow generated is separated in real time into a heat capacity component and a kinetic component. In MDSC, the DSC heat flow is called the Total Heat Flow, the heat capacity component is the Reversing Heat Flow, and the kinetic component is the nonreversing heat flow. The total heat flow signal contains the sum of all thermal transitions, just as in standard DSC. The reversing signal contains glass transition and melting transitions, while the nonreversing heat flow contains kinetic events like curing, volatilization, melting, and decomposition. In the present investigation, MDSC method was used to determine temperature dependence of the apparent specific heat of a soil sample on cooling. Independently, the specific heat of dry soil material was determined, the subtraction of which from the total apparent specific heat yielded the "water apparent specific heat" component as a function of temperature. This allowed to conclude on phase transition in the sample even in the case, when they are too weak to give a traditional peak on DSC thermogram.

The soil samples was cooled with the rate of  $2.5\text{ K/min}$  with temperature modulation  $\pm 0.26^{\circ}\text{C}$  every  $40\text{ s}$ . In a special series of experiments, the specific heat of dry soil material was determined within the temperature range  $50^{\circ}\text{C}$  to  $-80^{\circ}\text{C}$  on cooling, using the same parameters of temperature modulation as in the preceding experiment.

## Materials

Homoionic forms of montmorillonite and kaolinite were used as soil material. The forms had been obtained from natural bentonite from Chmielnik in Poland and kaolin from Sedlec in

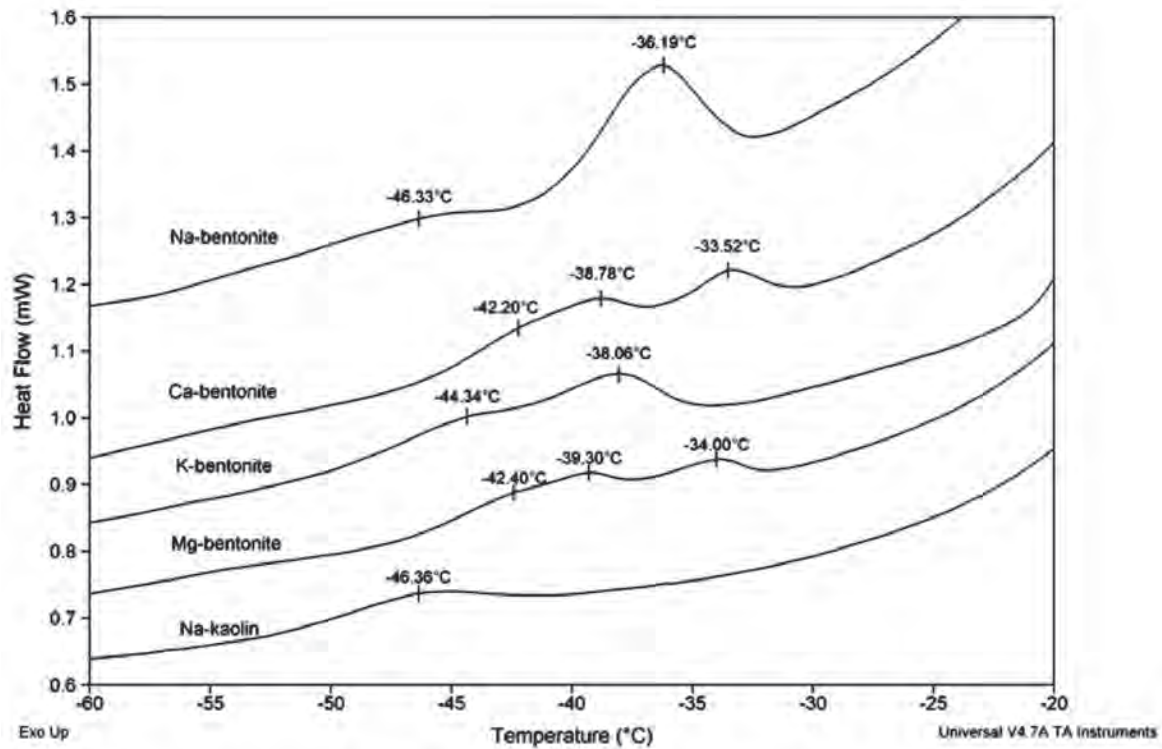


Fig. 1. Low temperature exothermic peaks observed in clays of various mineral and exchangeable cation composition.

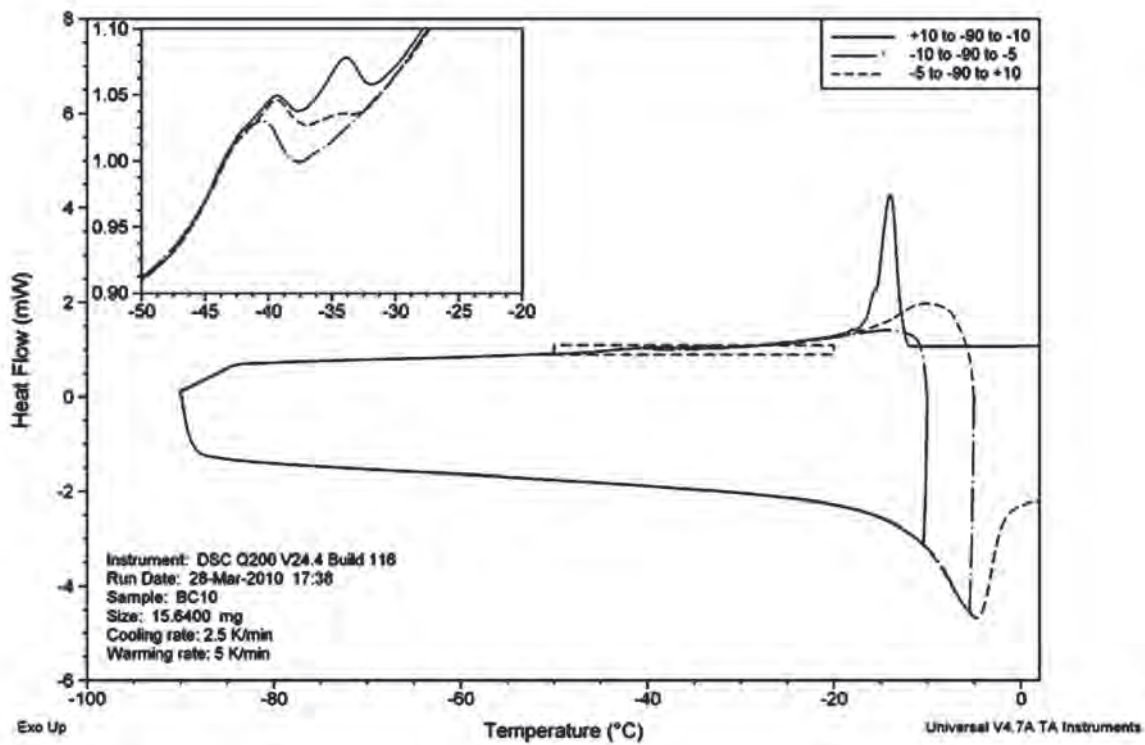


Fig. 2. Low temperature exothermic peaks in the partial melting experiment.

Czech by repeated saturation of the fraction less than 0.063mm and subsequent purifying from solutes by diffusion. The soil pastes were then air dried at room temperature. The desired water contents were obtained by two ways:

1) Keeping for two weeks at the relative humidity  $p/p_0=0.95$  (i.e. in exsiccator under 10% solution of  $H_2SO_4$  at room temperature). According to Stepkowska et al. [9], in such circumstances (relative humidity  $RH=0.95$ ) a full bi- or monolayer of strongly bound water forms on the flat surfaces of clay minerals, depending on the kind of the main exchangeable cation.

2) Keeping for several days in an exsiccator under pure  $H_2O$  ( $RH=1.0$ ). Depending on the period, different water contents were obtained.

Table 1. Soil properties

Type of soil†	C.E.C (meq/100g)	Hygroscopic water contents		Spec. surface (m <sup>2</sup> /g)	
		$W_{0.5}$ (%)	$W_{0.95}$ (%)	External	Total
B-Ca <sup>2+</sup>	108.05	20.46	27.37	122	732
B-Mg <sup>2+</sup>	109.20	18.44	26.93	122	732
B-Na <sup>+</sup>	111.12	16.01	28.72	110	644
B-K <sup>+</sup>	49.98	8.94	14.98	56	336
K-Na <sup>+</sup>	5.93	1.40	3.24	10	60

† The symbols B and K in the soil type column mean bentonite and kaolin respectively

The properties of the soils are given in Table 1. The hygroscopic water contents  $W_{0.5}$  and  $W_{0.95}$  relate to the water contents obtained at the relative humidities (RH) 0.5 and 0.95 after equilibration was reached after 10 and 14 days, respectively. The relative humidity  $p/p_0=0.50$  was obtained in an exsiccator under a saturated solution of  $Mg(NO_3)_2$  at room temperature.

## Results and analysis

### Arrangement and characteristic temperatures of the peaks

Table 2. Temperatures of the peaks

Soil	Characteristic peak temperatures, °C		
	$T_3$	$T_2$	$T_1$
B-Ca <sup>2+</sup>	-42.2±0.4	-39.3±0.2	-33.9±0.3
B-Mg <sup>2+</sup>	-42.0±0.7	-39.1±0.6	-33.6±0.8
B-Na <sup>+</sup>		-46.8±0.4	-36.5±0.1
B-K <sup>+</sup>		-45.7±1.4	-38.6±1.0
K-Na <sup>+</sup>			-43.7±3.3

The low temperature peaks following the big peak corresponding to the breaking of the supercooling were observed in all of the

investigated samples on cooling, though their intensity is one order of magnitude smaller. Their shape and arrangement prove to be strictly related to the kind of exchangeable cation and mineral composition. Exemplary low temperature exothermic peaks obtained for samples of the five investigated soils are shown in Fig. 1.

The temperatures of the low temperature exothermic peaks, determined on the base of all the results obtained, are presented in Table 2. The present results are not in full agreement with the results previously reported by Anderson and Tice [1].

### Partial melting experiments

A part of the samples underwent a special procedure, in which after cooling to -90°C a sample was warmed to -10°C, then cooled to -90°C again, warmed to -5 °C, once more cooled to -90°C and lastly warmed to +20°C. A 15 minutes isothermal equilibration followed each cycle. In Fig. 2, the effect of the partial melting on the low temperature exothermic peaks in a sample of calcium bentonite is shown. The results seem quite surprising. The exothermic peaks obtained after the partial melting are reduced proportionally to the highest temperature reached before cooling. Two conclusions can be drawn. Firstly, the low temperature exothermic peaks are not a manifestation of a non-equilibrium phase transition such as the solidification of supercooled water. Secondly, transitions related to the peaks occur in a temperature range (i.e. no distinguished one or two freezing points exist). Thirdly, the opposite transitions on warming do not occur at the same temperatures and the results seem to suggest that the opposite transitions have a continuous character.

### Reversible and nonreversible components

In Fig. 3, decomposition of the total heat capacity into the reversible and nonreversible components is shown. Notice that, in contrast to the initial freezing of the pore water, represented by the big exothermic peak, the low temperature endothermic peaks do not involve any reversible component.

### Apparent specific heat of soil water

Because of extremely small intensity of possible transitions, it is impossible to determine the content of the remained unfrozen adsorbed water by use of classical DSC. The question how much water in general solidifies, can be answered by use of the concept of the apparent specific heat [10]:

$$C_a = C_s + C_i \frac{w - w_u}{100} + C_u \cdot w_u + \frac{1}{\Delta T} \int_{T_1}^{T_2} L \frac{\delta w_u}{\delta T} dT \quad (1)$$



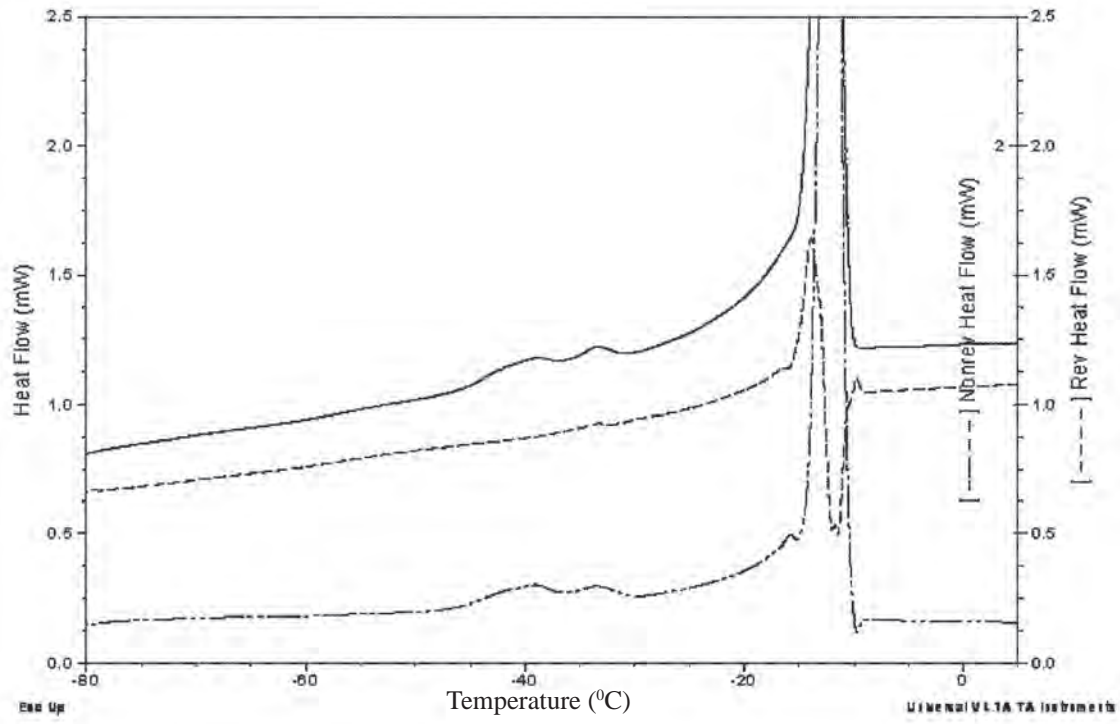


Fig. 3. Decomposition the total heat capacity measured on cooling into the reversible and nonreversible components.

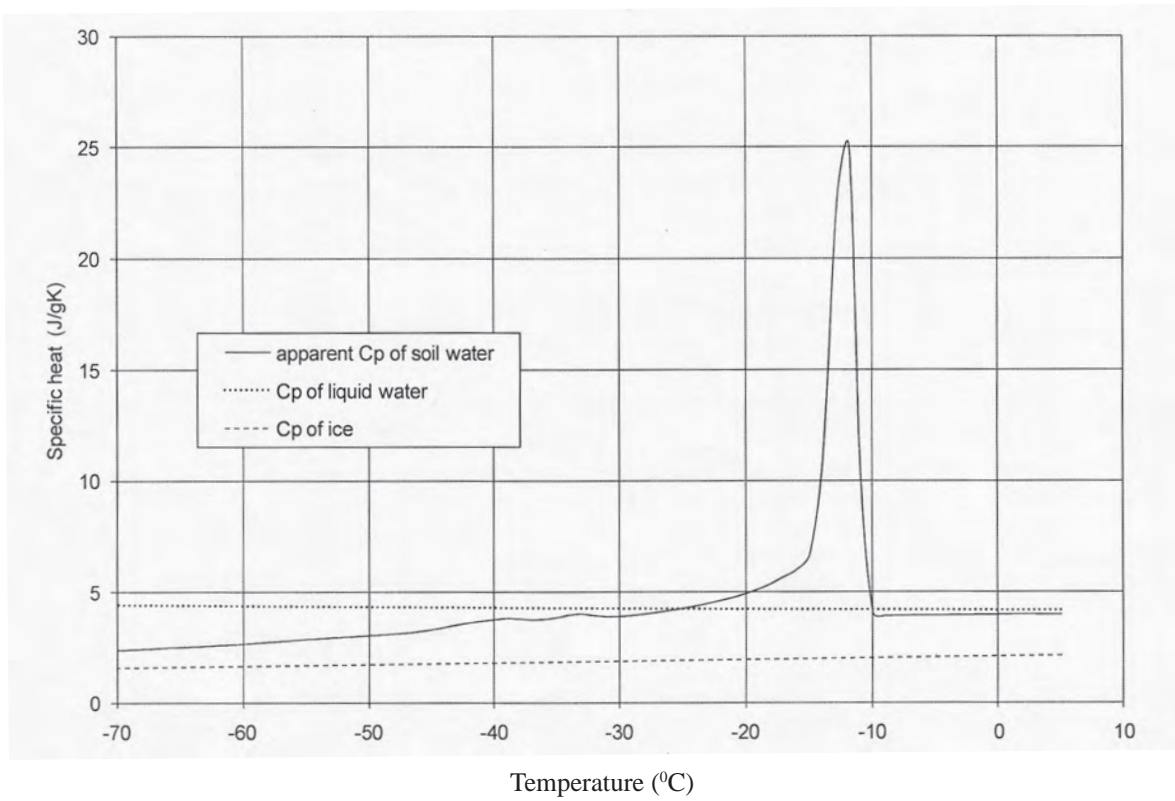


Fig. 4. Apparent specific heat of soil water.

where C is heat capacity of a constituent and subscripts *s*, *i*, *u* relate to dry soil, ice and unfrozen water, respectively.

In order to use Eq. (1) for calculating the unfrozen water content  $w_u$ , own measurements of specific heats of dry soils in question have been done. By subtraction of the dry soil heat capacity from the total heat, an apparent heat capacity of water in a sample was obtained, which divided by total mass of water in the sample yielded the apparent specific heat of water as a function of temperature. As seen in Fig. 4, in temperature range above the temperature of nucleation (about  $-10^{\circ}\text{C}$  in this case), the apparent specific heat capacity is, according to expectations, almost equal to the specific heat of liquid water. The sudden rise at  $-10^{\circ}\text{C}$  is due to the beginning of crystallization and the latent heat component predominates in this stage. However, the apparent specific heat of water, after reaching maximum at  $-12^{\circ}\text{C}$ , decreases and in the range below  $-25^{\circ}\text{C}$  remains lesser than the specific heat of liquid water, because of the presence of ice. Results of calculations of  $w_u$  by Eq. (1) at  $-70^{\circ}\text{C}$  are shown in Table 3.

Table 3. The quantity of water  $W_u$  unfrozen at  $-70^{\circ}\text{C}$  calculated from apparent specific heat measurements

Soil	B-Ca	B-Mg	B-Na	B-K	K-Na
$W_u$ , %	15.11	20.07	16.52	7.54	3.23
$W_{0.5}$ , %	20.46	18.44	16.01	8.94	1.40
$W_{0.95}$ , %	27.37	26.93	28.72	14.98	3.24

### Conclusions

1. The occurrence of the low temperature endothermic peaks (LTEP) between  $-33$  and  $-47^{\circ}\text{C}$  in homoionic clay-water systems have been confirmed by Differential Scanning Calorimetry.

2. The shape and characteristic temperatures of LTEP strongly depend on the kind of clay mineral and main exchangeable cation. Generally, the pattern for montmorillonites saturated with bivalent cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) are more complex than those for montmorillonites with monovalent cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) and kaoline.

3. The obtained results suggest that the low temperature peaks can be a manifestation of solidifying only a part of the adsorbed water. The reaction is irreversible in character and probably involves distraction of molecules of the adsorbed water and attaching them to the ice crystals present in pore spaces. On warming, two-stage

process is needed, i.e. melting individual crystals at temperatures corresponding to the sizes of pores and subsequent adsorbing liquid water on flat surfaces of a clay mineral.

### Acknowledgments

This work was partially supported by the Polish Ministry of Science under grant N N525 349538 and the Operational Program Human Capital (OP HC), contract number UDA-POKL.04.01.01-00-175/08-00.

### References

1. Anderson, D.M., Tice, A.R., 1971. Low temperature phases of interfacial water in clay-water systems. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.*, 35, 47-54.
2. Anderson, D.M., Tice, A.R., 1980. Low temperature phase changes in montmorillonite and nontronite at high water contents and high salt contents. *Cold Regions Science and Technology* 3, 139-144.
3. Turov, V.V., Leboda, R., 1999. Application of 1H NMR spectroscopy method for determination of characteristics of thin layers of water adsorbed on the surface of dispersed and porous adsorbents. *Adv. Colloid Interface Sci.* 79, 173-211.
4. Watanabe, K., Mizoguchi, M., 2002. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution. *Cold Regions Science and Technology* 34, 103-110.
5. Darrow, M.M., Huang, S.L., Akagawa, S., 2009. Adsorbed cation effects on the frost susceptibility of natural soils. *Cold Regions Science and Technology* 55, 263-277.
6. Kozłowski, T., 2003. A comprehensive method of determining the soil unfrozen water curves; 1: Application of the term of convolution, *Cold Regions Science and Technology* 36, 71-79.
7. Yoshikawa, K., Overduin, P.P., 2005. Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors. *Cold Regions Science and Technology* 42, 250-256.
8. Fabbri, A., Fen-Chong T., Coussy O., 2006. Dielectric capacity, liquid water content, and pore structure of thawing-freezing materials. *Cold Regions Science and Technology* 44, 52-66.
9. Stepkowska, E.T., Pérez-Rodríguez, J.L., Maqueda, C., Starnawska, E., 2004. Variability in water sorption and in particle thickness of standard smectites. *Appl. Clay Sci.* 24, 185-199.
10. Anderson D.M., R. Push, E. Penner. 1978. Physical and thermal properties of frozen ground. In: *Geotechnical Engineering for Cold Regions*, McGraw-Hill, 37-102.

# Strength characteristics of tire-clay mixtures in freeze-thaw cycles

Mahya Roustaei<sup>1</sup>, Mahmoud Ghazavi<sup>2</sup>, Hassan Aghabarati<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, QIAU

Iran, Qazvin, e-mail: mahya\_roustaei@yahoo.com

<sup>2</sup>Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

**Abstract.** Waste tires, rubbers, and plastic materials are normally produced in every society, entering the environment and causing serious problems. These problems may be somehow reduced by finding applications for them in engineering, for example, using them for geotechnical applications as backfill material and solving problems with low shear strength soils. Such materials may be subjected to freeze-thaw cycles, resulting in strength reduction. Freeze-thaw cycling is a weathering process which is normal in cold climates. In freeze cycles, thermodynamic conditions at temperatures below 0°C cause translocation of water and ice which can change the engineering properties of soils. The present study investigates the effect of reinforcing soil with tire chips and tire powder to reduce the effects of freeze-thaw cycles. For this purpose, a kaolinite clay reinforced with tire chips and tire powder was compacted in the laboratory and exposed to a maximum of 10 closed-system freeze-thaw cycles. The results of the study reveal that adding tires to clay prevents strength reduction due to freeze-thaw cycles. Other results will be explained in details.

**Keywords:** freeze thaw cycles; tire chips; unconfined strength; clay.

## Прочностные характеристики глинистых грунтов с добавками из отходов переработки автомобильных шин при циклическом промерзании-протаивании

Махия Рустаеи<sup>1</sup>, Махмуд Газави<sup>2</sup>, Хасан Агабарати<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Факультет гражданского строительства Казвинского независимого университета

Иран, г. Казвин, e-mail: mahya\_roustaei@yahoo.com

<sup>2</sup>Факультет гражданского строительства

Тегеранского технологического университета им. Насирэддина Туси, г. Тегеран, Иран

**Аннотация.** Количество производимых отходов из изношенных шин, резины и пластика возрастает по всему миру. Попадая в окружающую среду, такие материалы обычно становятся загрязнителями. Одним из способов решения проблемы является вторичное использование отходов, например, в строительной практике в качестве материала для отсыпки сооружений или укрепления грунтов с низким сопротивлением сдвигу. При воздействии циклов промерзания-протаивания происходит снижение прочности грунтов. Многократное промерзание-оттаивание является фактором процесса выветривания, характерным для холодных регионов. В циклах промерзания-термодинамические условия при температурах ниже 0°C вызывают перемещение воды и льда, что может привести к изменению инженерных свойств грунтов. Целью данной работы является изучение возможности уменьшения влияния циклов промерзания-протаивания на грунты путем введения добавок из резиновой крошки и порошка, полученных при переработке изношенных шин. Опыты проводились на образцах каолиновой глины с добавками из резиновой крошки и порошка, которые уплотнялись и подвергались максимум до 10 циклов промерзания-протаивания в условиях закрытой системы. Результаты исследований показывают, что введение продуктов переработки шин в глину предотвращает снижение ее прочности при многократном промерзании-протаивании.

**Ключевые слова:** циклы промерзания-протаивания; резиновая крошка из переработанных шин; прочность при неограниченном сжатии; глина.

# Strength characteristics of tire-clay mixtures in freeze-thaw cycles

Mahya Roustaei, Mahmoud Ghazavi, Hassan Aghabarati

## Introduction

Due to the development of industry and growing population, huge amounts of waste materials such as waste tires, rubbers, and plastic materials are produced increasingly and enter the environment. Such entrance causes serious problems. It is also harder and more expensive to dispose them safely without threatening human health and environment.

Scrap tires are one of wastes for which engi-neers must find applications. Although some of them are recycled and reused for producing low quality products, the procedure of recycling may have dangerous impacts to environment due to producing dust (Ghazavi 2004). Therefore, finding applications for them in engineering is highly demanding. For instance, waste tires are used for reinforcing soft soil in road construction (Bosscher et al., 1997; Heimdahl and Druscher, 1999; Nightingale et al., 1997), to control ground erosion (Poh and Broms, 1995), for stabilizing slopes (Poh and Broms, 1995; Garga and O'Shaughnessy, 2000a), as lightweight material for backfilling in retaining structures (Bosscher et al., 1997; Lee et al., 1999; Basheer and Najjar, 1996; Sumanarathna et al., 1997; Garga and O'Shaughnessy, 2000a; Garga and O'Shaughnessy, 2000b), as aggregates in leach beds of landfills (Foose et al., 1996), as an additive material to asphalt (Tuncan et al., 1998; Foose et al., 1996; Heimdahl and Druscher, 1999), as sound barriers (Hall, 1991), as limiting for freezing depth (Humphrey et al., 1997), as a source for creating heat (Lee et al., 1999), as a fuel-supplement in coal-fired boilers (Ahmed and Lovell, 1993; Park et al., 1993), for vibration isolation (Eldin and Senouci, 1994), as cushioning foams (Ahmed and Lovell, 1993), and for low strength but ductile concrete (Eldin and Senouci, 1993).

In cold climates, soils are exposed to freeze-thaw cycles which are important. Fine-grained soils influenced by freezing and thawing show changes in volume, strength, compressibility, densification, unfrozen water content, bearing capacity, and microstructure. In the permafrost regions like Canada, it was found that the embankment constructed on soil which had never experienced freeze-thaw cycles were damaged in just one year due to the loss of bearing capacity (Leroueil et al., 1991). Therefore, newly constructed highway em-bankments that are left unpaved for a few years may be damaged by

freeze-thaw cycles (Eigenbrod, 1996).

Qi et al. (2006) reviewed the last efforts which were done to investigate the influences of freeze-thaw cycles on soil properties. They summarized these influences in two parts: physical properties like density and hydraulic permeability and mechanical properties like ultimate strength, stress-strain behavior and resilient modulus of soils. According to this research, loose soils tend to be densified and dense soils become looser after freeze-thaw cycles. In addition, both loose and dense soils may retain the same void ratio after a number of cycles (Korad, 1989). By increasing the large pores that are left after the thaw of ice crystals, the soil permeability will increase (Chamberlain et al., 1990). These cycles reduce the ultimate strength of soils. All over-consolidated soils exhibit a peak on the triaxial stress-strain curve and this peak is reduced or may even disappear (Graham and Au, 1985). Resilient modulus is one of the most important factors in pavement designs that will reduce significantly by even a small number of freeze-thaw cycles (Simonsen et al., 2002). Moreover, these cycles decrease the undrained shear strength considerably which is an important factor in fine-grained soil design (Graham and Au, 1985).

All above research work deals with unreinforced soil and thus the influence of freeze-thaw cycles on unconfined strength of soils is lacking, to the best knowledge of the authors. The main purpose of this study is to investigate the influence of freeze-thaw cycles on unconfined strength of a clayey soil mixed with tire chips in order to find a new solution of reusing the waste materials.

## Methods

In this study, tests were carried out on a kaolinite clay soil. This soil was selected because fine-grain soils are more susceptible to freeze-thaw cycles than coarse soils. The clay was classified as MH in the Unified Soil Classification System. The characteristics of this clay are presented in Table 1. The grain size distribution is illustrated in Fig. 1. The compaction curves developed by the standard Proctor compaction tests show that the soil has a maximum dry unit weight of approximately 1.55 g/cm<sup>3</sup> with optimum moisture content (OMC) of approximately 39%. In order to inspect the purity of the soil tow XRD and XRF tests were performed on specimens.

The specimens were reinforced with 5, 10



and 15% (by weight of dry soil) of tire chips. These tire chips are producing as waste materials in repairing factory of tires which are shown in Fig. 2. In order to adding these tire chips, it is recommended to pass tire chips from sieve no.20 to get a uniform grain size of tires for a fine grained soil.

Table 1. Characteristics of the soil

$G_s$	2.61(g/cm <sup>3</sup> )
Plastic Limit	40.6%
Liquid Limit	69.4%
Plasticity Index	28.8%

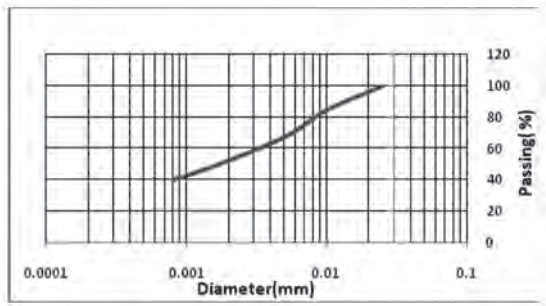


Fig. 1. The grain size distribution of the soil.



Fig. 2. Tire chips.

All prepared specimens are cylinder-shaped with 38.5 mm diameter and 77 mm height. A moisture content of 27% is chosen in specimen preparation, since the sample compaction is very difficult at lower moisture contents. At moisture contents greater than 27%, a uniform tire-clay mixture will not be obtained. To prepare the reinforced specimens, wet clay and tires are mixed easily. The mixture is divided into four parts. Each part is poured in the mold and compacted. This procedure is repeated to obtain a fully compacted sample.

For freezing and thawing phases, specimens are placed in a digital refrigerator at -20°C for 6 hours and then at +25°C for thawing phase for 6 hours. The cycles were continued till 4 cycles. This was chosen because it was shown that the most decrease in soil strength would occur in

primary cycles and after 5-10 cycles where a new equilibrium condition became predominant on samples (Ghazavi and Roustaei, 2010). These temperatures were used in some previous research work (Qi et al., 2004). 6 hours is a proportional period after which the alteration of specimen height would become constant.

Unconfined compression tests were performed on samples according to ASTM D5311-92. The strain rate was kept constant at 0.5 mm/min in all tests.

## Results

As mentioned in the previous section, several soil samples, with and without tire chips were tested to study the strength of soil-tire chip mixtures in freeze-thaw cycles. Test results are shown in stress-strain variation. The samples are named TC-NC. Here TC and NC stand for tire chips and number of freeze-thaw cycle, respectively.

Fig. 3 shows the result of unconfined compression test on pure soil samples subjected to 0, 2, and 4 freeze-thaw cycles. As seen, by increasing the cycle number, the unconfined strength of soil decreases. The most strength reduction is about 46% and occurs after the 4 cycle.

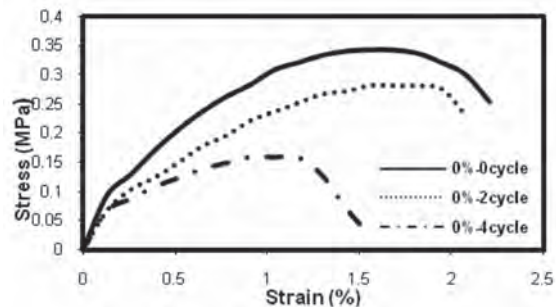


Fig. 3. Stress-strain variation of pure soil.

Fig. 4 represents the stress-strain variation for TC samples (soil-chip mixtures) before applying freeze-thaw cycles. Fig. 5 and Fig. 6 illustrate the same results for TC samples after applying freeze-thaw cycles. As seen in these figures, adding tire chips increases the unconfined compression strength of clayey samples before applying freeze-thaw cycles, especially for the samples which are mixed with 5% tire chips. By applying the freeze-thaw cycles, the unconfined compression strength of mixed and pure soil samples decrease. Although inclusion of 5% tire chips is most effective on increasing the unconfined compression strength before applying freeze-thaw cycles. However, it is obvious in Fig. 5 that by adding 10% tire chips to soil specimens, the strength reduction is negligible after cycles.

Fig. 7 shows the compression strength ratio of clay-chip samples versus the number of freeze-thaw cycles for various chip percentages. This ratio is defined as the strength of mixed sample at a given cycle divided by that of a same pure sample which is subjected to the same cycle number. These strengths are denoted by  $q_u-N$  and  $q_u-0$ , respectively. It is obvious from Fig. 6 that only by inclusion of 10% tire chips, the strength reduction rate causing by freeze-thaw cycles decreases. As seen, the unconfined compression strength of sample (pure and mixed with 5% and 15% tire chips) decrease by about 50% due to the application of 4 freeze-thaw cycles.

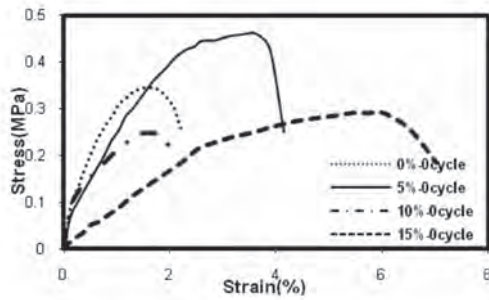


Fig. 4. Stress-strain variation of soil-chips mixtures before freeze-thaw cycles.

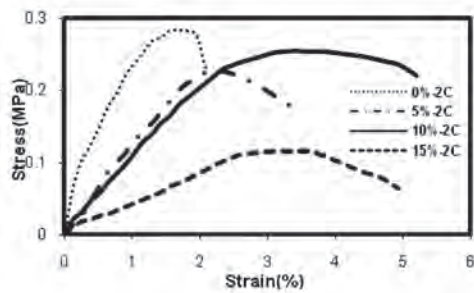


Fig. 5. Stress-strain variation of soil-chips mixtures after 2 freeze-thaw cycles.

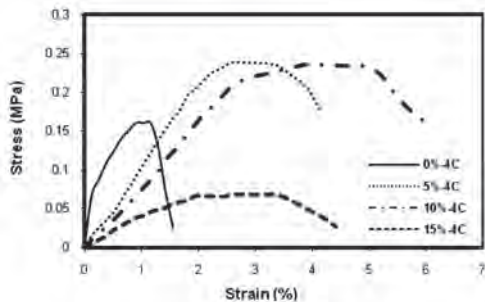


Fig. 6. Stress-strain variation of soil-chips mixtures after 4 freeze-thaw cycles.

By addition of 5-15% tire chips to soil, the sample height decreases or remains the same. During freezing phase, ice crystals are formed and a frost heave occurs in soil specimens. However, after thawing, the height of samples does not reach

the initial amount. This phenomenon leads to an increase in the sample height which is reduced by inclusion of tire chips especially when 10% tire chips is used.

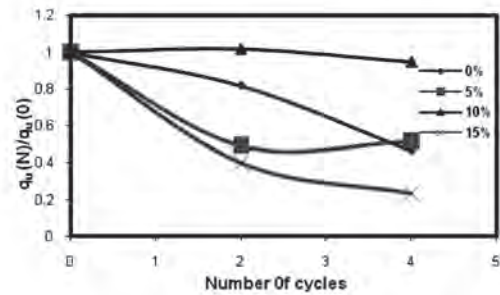


Fig. 7. Final strength variation of soil after 4 freeze-thaw cycles.

Fig. 8 illustrates the height variation of soil samples after freeze-thaw cycles. As observed, by addition of 5-15% tire chips to soil, the sample height decreases or remains the same. During freezing phase, ice crystals are formed and a frost heave occurs in soil specimens. However, after thawing, the height of samples does not reach the initial amount. This phenomenon leads to an increase in the sample height which is reduced by inclusion of tire chips especially when 10% tire chips is used.

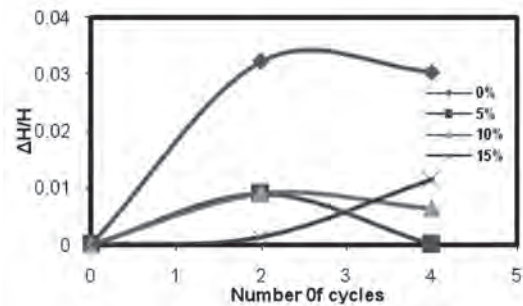


Fig. 8. Height variation of samples after freeze-thaw cycles.

### Conclusion

In this paper, unconfined compression strength tests have been conducted to investigate the effects of freeze-thaw cycles on the strength of a kaolinite type clayey soil mixed with tire chips. The results show that:

- By increasing the number of freeze-thaw cycles, the unconfined compression strength of all mixed and pure samples decrease about 46%.
- The use of 15% by weight tires in mixtures, the unconfined compression strength of samples increases to about 30%.

- By increasing the number of freeze-thaw cycles, the height of specimens increases.

The inclusion of tire chips to clayey samples can affect the height changes due to freeze-thaw cycles. The increase of sample height is reduced by inclusion of tire chips to soil specimens especially when 10% tire chips is used.

In general, based on the findings in this paper, it is recommended that in cold climates where soils are affected by freeze-thaw cycles, tire chips are preferable. This preference is more supported due to environmental consideration for which an application for waste tires is suggested.

### Acknowledgements

The tests were performed in Soil Mechanics Laboratory of Qazvin Azad University (QIAU). The authors would like to appreciate the financial support provided by the Civil engineering department of Qazvin Azad University (QIAU).

### References

- Ahmed, I. and Lovell, C. 1993. Use of rubber tires in highway construction. In: *Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*, ASCE, New York, N.Y., 166–181.
- Basheer, I.A. and Najjar, Y.M. 1996. Rubber tires and geotextiles. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 10(1): 40–44.
- Bosscher, P.J., Edill, T.B. and Eldin, N.N. 1992. Construction and performance of a shredded waste-tire test embankment. *Transportation Research Record No. 1345, Transportation Research Board, Washington DC*, 44–52.
- Bosscher, P.J., Edill, T.B. and Kuraoke, S. 1997. Design of highway embankments using tire chips. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(4): 297–304.
- Chamberlain, E.J., Iskander, I., Hunsiker, S.E. 1990. Effect of freeze-thaw on the permeability and macro-structure of soils. *Proceedings of the International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agriculture, Range, and Forest Lands*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A. Special Report 90-1: 145–155.
- Eigenbrod, K.D., 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities on soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal* 33: 529–537.
- Eldin, N.N. and Senouci, A.B. 1993. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* 5(4): 478–496.
- Foose, J., Benson, H. and Bosscher, J. 1996. Sand reinforced with shredded waste tires. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(9): 760–767.
- Garga, V.K. and O'Shaughnessy, V. 2000a. Tire-reinforced earthfill. Part 2: Pull-out behavior and reinforced slope design. *Canadian Geotechnical Journal* 37: 97–116.
- Garga, V.K. and O'Shaughnessy, V. 2000b. Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design. *Canadian Geotechnical Journal* 37: 75–96.
- Garga, V.K. and O'Shaughnessy, V. 2000c. Tire-reinforced earthfill. Part 3: Environmental assessment, *Canadian Geotechnical Journal* 37: 117–131.
- Ghazavi, M. 2004. Shear strength characteristics of sandmixed with granular rubber. *Geotechnical and Geological Engineering* 22: 401–416.
- Ghazavi, M., Roustaei, M. 2010. The influence of freezethaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology* 61: 125–131.
- Graham, J., Au, VCS, 1985. Effects of freeze-thaw and softening on natural clay at low stresses. *Canadian Geotechnical Journal* 22(1): 69–78.
- Hall, T. 1991. Reuse of shredded tire material for leachate collection system, In: *Proc. 14th. Annu. Conf. Dept. of Engrg. Prof. Devel, Uni. of Wisconsin, Madison, Wis.*, 367–376.
- Heimdahl, C. and Druscher, A. 1999. Elastic anisotropy of tire shreds. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(5): 383–389.
- Humphrey, D.N. and Nickels, W.L. 1997. Effect of tire chips as lightweight fill on pavement performance, In: *Proceedings 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India*, 1617–1620.
- Humphrey, D.N., Katz, L.E. and Blumenthal, M. 1997. Water quality effects of tire chip fill placed above the groundwater table, In: *M.A. Wasemiller and K.B. Hoddinott (eds.), Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials*, ASTM STP 1275, 299–313.
- Konrad, J.M., 1989. Physical processes during freeze-thaw cycles in clayey silts. *Cold Regions Science and Technology* 16: 291–303.
- Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C.W. 1999. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(2): 132–141.
- Leroueil, S., Tardif, J., Roy, M., Konrad, J.M., 1991. Effects of frost on the mechanical behavior of Champlain Sea clays. *Canadian Geotechnical Journal* 28(5): 690–697.
- Nightingale, D.E.B. and Green, W.P. 1997. An un-solved riddle: tire chips, two roadbeds, and spontaneous reactions, In: *M.A. Wasemiller and K.B. Hoddinott (eds.), Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials*, ASTM STP 1275, pp. 265–285.
- Poh, P.S.H. and Broms, B.B. 1995. Slope stabilization using old rubber tires and geotextiles, *Journal of Performance of Constructed Facilities* 9(1): 76–80

Qi, J.L., Zhang, J.M., Zhu, Y.L., 2004. Influence of freezing–thawing on soil structure and its soils mechanics significance. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (Supp. 2)*: 2690–2694.

Qi, J., Vermeer, P.A., Cheng, G., 2006. A Review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. *Permafrost and Periglac. Process.* 17: 245-252.

Simonsen, E., Janoo, V.C., 2002. Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *ASCE Journal of Cold Regions Engineering*, 16(1): 28-50.

Sumanarathna, I.H.D., Mallawarctchie, D.P. and Kulathilaka, S.A.S. 1997. Stabilization of slopes by anchored type retaining structures. In: *Proceedings 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India*, 1261–1264.

Tuncan, M., Cetin, A., Tuncan, A. and Koyuncu, H. 1998. Assessment of waste tires and plastic on asphalt concrete pavement mixtures. In: *Proceedings of Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisbon, Portugal*, 2, 667–672.



## Experimental study on monitoring automation technology of freezing depth of seasonal frozen soil

En-liang WANG<sup>1,2</sup>, Jing-lu SUN<sup>1,2</sup>, Zhan-kun GAO<sup>1,2</sup>, Jun-de CHANG<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin China, 150080,  
HLJSKYWEL@163.com

<sup>2</sup>Heilongjiang Seasonal Frozen Soil Region Engineering Frozen Soil Key Laboratory,  
Harbin, China.

**Abstract.** The remote real-time monitoring system of temperature automation in the field was established. Through testing the initial freezing temperature, the thickness of seasonal frozen soil was calculated, with the depth of freezing point isotherm instead of the freezing front. Which provide the basis for automatic observation of freezing depth. Conclusions: The correlation coefficient in freezing process was 0.97, which was 0.98 in melting process and freezing-thaw process. It showed that freezing depth observation based on the depth of freezing point isotherm is available. The freezing-thaw process could realize remote real-time monitoring, and the observation accuracy was higher.

**Keywords:** seasonally frozen soil region; freezing depth; automatic monitoring; freezing point isotherm; experimental study.

## Экспериментальное исследование по автоматизации мониторинга глубины сезонного промерзания пород

Эньлян ВАН<sup>1,2</sup>, Цзинлюй СУНЬ<sup>1,2</sup>, Чжанькунь ГАО<sup>1,2</sup>, Цзюньдэ ЧАН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Гидротехнический институт провинции Хэйлунцзян  
Китай 150080, г. Харбин, e-mail: HLJSKYWEL@163.com

<sup>2</sup>Хэйлунцзянская главная лаборатория по строительству на сезонномерзлых грунтах,  
г. Харбин, Китай

**Аннотация.** Разработана и испытана система дистанционного мониторинга температуры пород в реальном времени. С использованием лабораторных определений температуры начала замерзания рассчитывалась мощность сезонномерзлого слоя по глубине залегания изотермы температуры замерзания, а не нулевой изотермы. Такой способ позволяет автоматизировать наблюдения за глубиной промерзания. Сравнение результатов дистанционного мониторинга с данными замеров с помощью мерзлотомера Данилина показывает коэффициент корреляции 0,97 для процесса промерзания и 0,98 для процесса протаивания и всего цикла промерзания-протаивания. Таким образом, глубину промерзания можно определять по глубине залегания изотермы температуры замерзания. Это дает возможность дистанционного мониторинга процессов промерзания-протаивания.

**Ключевые слова:** сезонная мерзлота; глубина промерзания; автоматизированный мониторинг; изотерма температуры замерзания; экспериментальное исследование.

# Experimental study on monitoring automation technology of freezing depth of seasonal frozen soil

En-liang WANG, Jing-lu SUN, Zhan-kun GAO, Jun-de CHANG

## Introduction

Frozen soil, generally refers to a variety of rock-soil and soil that contain ice-cemented bodies at the temperature of 0°C or below 0°C [1]. About 98.9% of China's land is covered by different types of frozen soil, among which seasonally frozen soil region is 5.137 million km<sup>2</sup>, accounting for 53.5% of the whole region, mainly in the northeast, northwest and north China [2]. In the vast seasonally frozen soil region, the destruction of engineering structures caused by foundation frost heaving can be seen everywhere and has not yet been solved absolutely [3]. Therefore, the experimental study on frost heaving damage of engineering structures in seasonally frozen soil region is of great significance.

The technology study of the resistance to freezing of engineering structures must have simulation equipment in laboratory and field test site which can reveal the damage characteristics and rules of engineering structures. At present, the experimental facilities about engineering frozen soil in our country, the test methods, the data acquisition devices and the degree of simulation develop very quickly, which can basically realize the collection and analysis of test data automatically. However, in observing the model tests of freezing soil, the thickness of soil layer is usually measured by Dannilin freezing depth device artificially and still can't achieve high-precision and automatic real-time monitoring. The calculation of freezing depth in seasonally frozen soil region is shown in Figure 1.

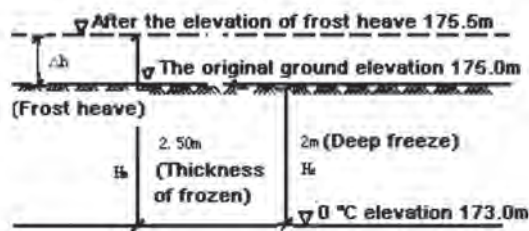


Fig. 1. The calculating diagram of freezing depth.

From Figure 1 we can know that the freezing depth formula of seasonally frozen soil can be shown below:

$$H_z = H_m - \Delta h \quad (1)$$

where:

$H_z$  - freezing depth

$H_m$  - freezing thickness

$\Delta h$  - amount of frost-heaving

In exploring the relationship between the depth of frozen soil and temperature field, the paper proposed substituting freezing front with the initial freezing temperature isotherm, using the temperature field data to obtain the thickness of frozen soil layer, in order to achieve the automatic and real-time monitoring of the depth of seasonally frozen layer.

## The content and method in test

First, selected soil samples in test site, measured the initial freezing temperature. And then, established automatic real-time monitoring system of temperature in test site, at the same time, utilized Dannilin freezing depth device to measure the thickness of frozen layer manually. Finally, compared the manual measurements with the automatic monitoring results.

### The initial freezing temperature test

The soil samples in the test were taken from research base for integrated tests in Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, referred to the requirements of "Specification of soil test" [4] (SL237-1999) to conduct the initial freezing temperature test.

According to the calorimetry determination principle of freezing temperature test in "Specification of soil test", we designed and processed the freezing temperature test device, which was shown in Figure 2.

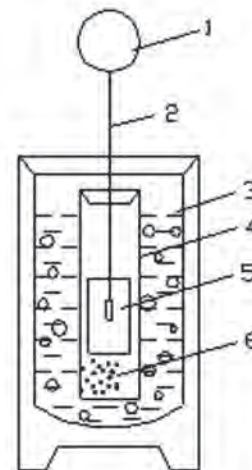


Fig. 2. The schematic diagram of freezing temperature test device.

1-Data Collection Instrument; 2-Temperature Sensor; 3-Cold bottle; 4-Plastic pipe; 5-Sample; 6-Dry sand.

Data collection instrument in Figure 2 could automatically collect changing process of temperature at any time.

### *Automatic real-time monitoring system of temperature*

#### Test instruments

This experiment established the remote real-time monitoring system of temperature automation in the frozen soil observation field of Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute. The test device consisted of temperature sensors, data acquisition systems, wireless transmission module, solar power system, data receiving and processing system and so on, the layout of field site was shown in Figure 3.



Fig. 3. The remote real-time monitoring system of field temperature.

#### Testing program

##### 1) The burying of sensors

Put 17 PT100 temperature sensors into the PVC tubes to a certain distance, measured the soil temperature in different depths beneath the ground from 0 to 3.50m, and installed another PT100 temperature sensors in the location of 1.50m beneath the ground, for measuring temperature.

##### 2) Power system installation

Solar power system was equipped with 200 W solar panels, 195 AH batteries and 20 A charge controllers to provide power for the data acquisition system and wireless transmission module.

##### 3) The composition of data collection case

The data collection case was composed of one DT515 data acquisition instrument host, two CEM expansion modules and one GPRS DTU wireless transmission module, responsible for data acquisition and remote transmission.

##### 4) Data processing system

The computer sent the program to the DT515 host, and acquisition system collected data according to the design program at a certain time. The GPRS DTU wireless transmission module

could achieve the control of data acquisition system and the remote transmission of data, and achieve the automatic remote real-time monitoring with the help of a remote computer terminal.



Fig. 4. Manual measurement of freezing depth with Danilin freezing depth device.

#### *Artificial observations of freezing depth*

The conventional observation of freezing depth is mainly about measuring the thickness of frozen soil layer by Danilin freezing depth device, and measures the amount of frost-heaving with frost layer device. While, the freezing depth can be obtained by subtracting the amount of surface frost-heaving from the observed thickness of frozen soil layer. The observation site can be seen in Figure 4.

#### **The analysis of test results**

##### *The initial freezing temperature results in the test*

Collected data using data acquisition instrument and drew the process curve of temperature and time, which could be seen in Figure 5.

Literature five has pointed out that the freezing process of fine-grained soil is divided into four stages: the soil starting to cool and over-cooling stage; the soil temperature mutation stage; the pore water freezing stage; the soil continuing to cool stage. The freezing process curve of soil in Figure 5 shows the general rules that completely match the freezing process of fine-grained soil. From the figure we know that the initial freezing temperature of the soil samples is  $-0.15^{\circ}\text{C}$ .

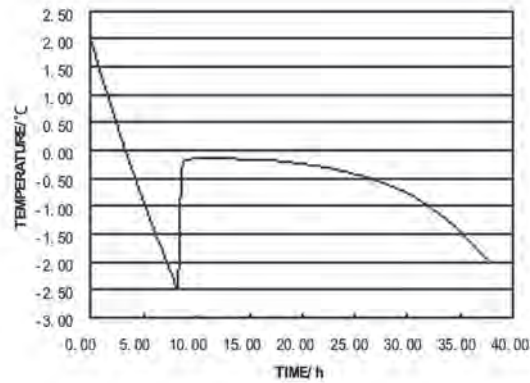


Fig. 5. The freezing process curve of soil.

*The Automatic realtime monitoring results of temperature*

With the data collected by data acquisition instrument, we drew the real-time temperature curve with different depth of frozen-soil-observed field in 2007-2008, which was shown in Figure 6.

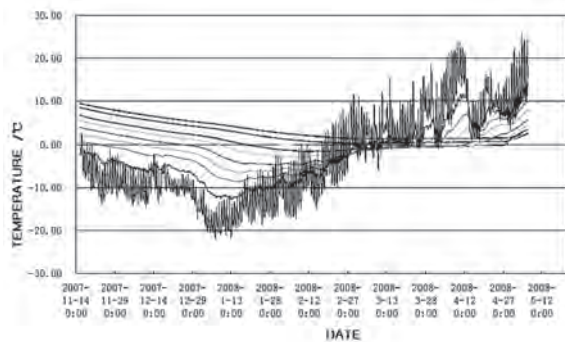


Fig. 6. The real-time temperature curve with different depth of frozen-soil-observed field in 2007-2008.

*Artificial observations of freezing depth*

With the measurements of freezing depth by Danilin freezing depth device, we drew the real-time freezing-thaw process curve of frozen-soil-observed field in 2007-2008, which was shown in Figure 7.

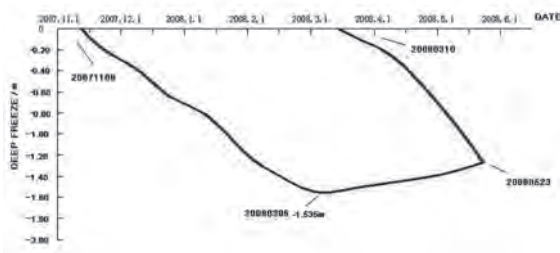


Fig. 7. The real-time freezing-thaw process curve of frozen-soil-observed field in 2007-2008.

*The correlation of two kinds of depth observations*

To verify the method of measuring frozen soil layer by substituting the freezing front with the depth of freezing point isotherm, we analyzed the data with different depth of frozen-soil-observed field in 2007-2008, and calculated the depth of freezing point isotherm at different times, and compared with the real-time freezing-thaw process of frozen-soil-observed field in 2007-2008, getting the freezing-thaw process curve with different observation methods, which was shown in Figure 8.

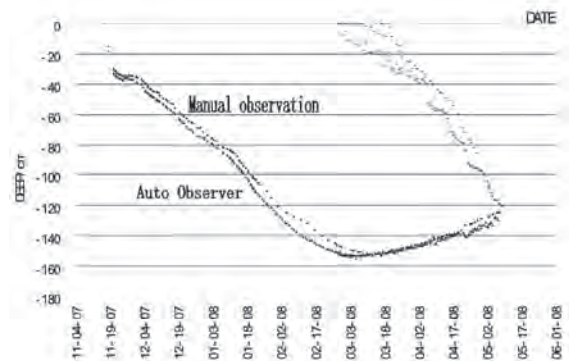


Fig. 8. The comparison of freezing-thaw process curve with different observation method.

Table 1. The comparison of freezing-thaw process curve with manual measurement and automatic measurement

	manual observation of freezing depth with Danilin freezing depth device	observation of freezing depth with freezing point isotherm
The initial freezing date	November 4, 2007	November 4, 2007
Maximum freezing depth date	March 13, 2008	March 7, 2008
The initial thawing date	March 10, 2008	February 27, 2008
Completely thawed date	May 6, 2008	May 8, 2008
The time of freezing thaw process/d	187	189
Maximum freezing depth/m	1.520	1.535

Comparing two freezing-thawing process curves in manual observation and automatic observation, it was seen that the trends of the graphics were the same on the whole. The correlation analysis of two samples during



the whole freezing-thaw process: correlation coefficient of the freezing process was 0.97; correlation coefficient of the thawing process was 0.98; correlation coefficient of the whole freezing-thaw process was 0.98. It was seen that the scheme of observing depth with freezing point isotherm was feasible.

The comparison of freezing-thaw process curve with manual measurement and automatic measurement in 2007-2008 was shown in Table 1.

Because the temperature sensors began to collect data after being installed on November 16, the initial freezing data could be applied as the conventional data.

From Table 1 we know that:

1) The maximum freezing depth measured with freezing point isotherm instead of freezing front was 1.535 m, which was 0.015 m deeper and 6d earlier than artificial observations.

2) When measuring freezing depth with freezing point isotherm instead of freezing front, the initial thawing time was 11d earlier. And also the measurement of temperature field at 30-min intervals, we could accurately record the affect of changing temperatures on the surface layer of 40 cm, which was more accurate and more truly reflected the actual situation.

3) Under routine observation the completely thawed time was ahead of 2d. The mainly reason was that under routine observation, every time when reading, the rubber tube of instrument for measuring freezing depth must be taken out, so the outside temperature and the observer's hand temperature would affect the final measurement.

When the thickness of frozen soil layer was measured by Dannilin freezing depth device, because the soluble salt concentration of water solution in rubber tube couldn't be exactly the same as the soluble salt composition and concentration of actual soil pore water, the

deviation between observational results and the actual location of freezing front was relatively large; While the method of substituting the freezing front with the freezing point isotherm was theoretically more scientific. Determined the initial freezing temperature of soil by test, and considered it as the thickness of frozen soil layer determined by freezing front, which was more accurate. Meanwhile, the temperature field could be used to observe the freezing depth, so as to solve the long-standing problem that the observation of freezing depth couldn't be automatic.

### Conclusion

1. Observe initial freezing temperature of samples in test site and substitute the freezing front with the freezing point isotherm to calculate the depth of seasonal frozen soil, this method is feasible.

2. Freezing-thaw process can be realized automatic remote real-time monitoring and the observing results are more accurate.

### References

1. Youwu Zhou, Guo Dongxin, Qiu Guoqing et al. 2000. *Permafrost in China*. Science Press, 1-2. (in Chinese)
2. Xuezu Xu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin et al. 2001. *Frozen Soil Physics*. Science Press, 9-12. (in Chinese)
3. Enliang Wang. 2008. *PhD thesis*. Harbin Institute of Technology, Harbin, 1-2. (in Chinese)
4. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 1999. *Specification of Soil Test (SL237-1999)*. China Water Power Press. (in Chinese)
5. Changjiang Tong, Fengnian Guan. 1985. *Frost Heaving and Frost Damage Prevention of Buildings*. Water Resources and Electric Power Press, 9-12. (in Chinese)

## Pressuremeter test in warm and ice-rich permafrost

Hu ZHANG<sup>1</sup>, Jianming ZHANG<sup>1</sup>, Shiwei LIU<sup>1</sup>, Kai SU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences

320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: a3708303977@126.com

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

**Abstract.** In order to investigate the in-situ mechanical behavior of warm and ice-rich frozen soils, a series of pressuremeter tests were carried out in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau. Based on the test results, the relationships between the stress and strain are obtained, and the shapes of the stress-strain curves as well as their influence factors are classified and discussed subsequently. Moreover, the two critical mechanical parameters, initial deformation modulus and failure strength, for each test are deduced from the stress-strain curves. Finally, the relationships between the two parameters and their influence factors, temperature and moisture, are analyzed.

**Keywords:** Qinghai-Tibetan Plateau; pressuremeter test; stress-strain curve; initial deformation modulus; failure strength.

## Прессиометрические испытания высокотемпературных и сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов

Ху ЧЖАН<sup>1</sup>, Цзяньмин ЧЖАН<sup>1</sup>, Шивэй ЛЮ<sup>1</sup>, Кай СУ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных  
регионов АН КНР

Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: a3708303977@126.com

<sup>2</sup>Аспирантура Академии наук КНР, г. Пекин, Китай

**Аннотация.** Для определения механических свойств высокотемпературных и сильнольдистых мерзлых грунтов в месте залегания на территории Цинхай-Тибетского нагорья проведена серия прессиометрических испытаний. По их результатам получены зависимости деформаций от напряжений. Рассмотрены виды полученных зависимостей и факторы, влияющие на их форму. Кроме того, по кривым зависимости деформаций от напряжений для каждого испытания определены две основные характеристики механических свойств – модуль начальной деформации и предел прочности. Проанализировано влияние температуры и влажности на эти характеристики.

**Ключевые слова:** Цинхай-Тибетское нагорье; прессиометрическое испытание; кривая зависимости деформаций от напряжений; модуль начальной деформации; предел прочности.

# Pressuremeter test in warm and ice-rich permafrost

Hu ZHANG, Jianming ZHANG, Shiwei LIU, Kai SU

## Introduction

The largest area of permafrost in China is on the Qinghai-Tibetan Plateau, which is 1.5 million km<sup>2</sup> [1]. On the Qinghai-Tibetan Plateau, the distribution of the warm permafrost is widespread, and it has been enlarging with the phenomenon of global warming. The mechanical behavior of the warm permafrost, especially the warm and ice-rich permafrost, is very unstable ([4], [5], [6] and [7]). Consequently, it is significant to study the mechanical properties of warm and ice-rich permafrost for predicting settlement of the foundations built in permafrost regions.

As an in-situ test method, pressuremeter test has been applied in permafrost successfully. Yu Wenbing ([8], [9]) carried out pressuremeter tests in permafrost on the Qinghai-Tibetan Plateau, and obtained the qualitative relationships between pressuremeter parameters and temperature as well as water content. Ma Xiaojie ([10], [11]) found that the pressuremeter parameters of the permafrost under the Qinghai-Tibet Railway declined at a certain extent compared with that under the natural ground surface, and analyzed the primary factors affecting rheological behavior of the permafrost.

However, the interpretation of the test data used by the two aforementioned researchers is based on a linear elastic/perfectly plastic theory. Considering that the frozen soil is a non-linear material, it seems to be no longer appropriate to analyze in that way. Since 1972, most investigators have been using one of the methods based on the discretization of the stress-strain curve for pressuremeter test interpretation in clays [12]. Using the non-linear elastic/perfectly plastic solution, Ladanyi [13] drew a series of undrained plain-strain stress-strain curves of the short-term pressuremeter tests in frozen soil.

In this paper, we employed the Menard pressuremeter to carry out a lot of tests in warm permafrost region on the Qinghai-Tibetan Plateau, and got the stress-strain curve for each test using the method proposed by Ladanyi [12]. Furthermore, we deduced the pressuremeter parameters (failure strength, pressuremeter modulus) from these curves and analyzed the relationship between the parameters and the main influencing factors (temperature, water content).

## Test Site

A series of in-situ tests were carried out at Beiluhe Basin on the Qinghai-Tibetan Plateau,

as shown in Fig.1. The elevation of the test site is about 4618 m. It is cold and arid in this area. The mean annual air temperature is -3.8°C, with extremely highest temperature of 23.2°C and extremely lowest temperature of -37.7°C. The ground surface is flat with sparse vegetation, and it is covered by silty sand in many places, below which it is almost clay according to the drilling data. The permafrost table varies from 2.5 to 3.0 m, from which to the following 3 m deep ice-rich frozen soils are usually found. The mean annual ground temperature is in the range of -0.3~-1.2°C, belonging to the warm unstable permafrost type. The test depth, soil temperature and water content for each test we conducted in this area are shown in Table 1.

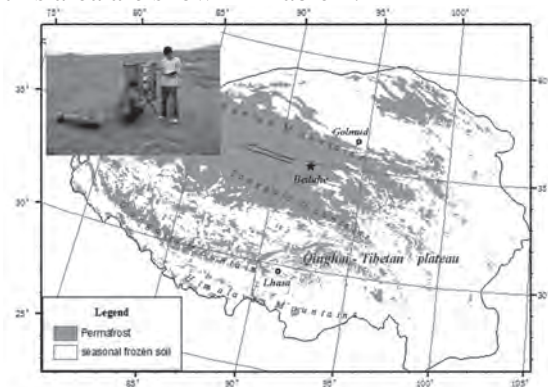


Fig. 1. Location of test site.

## Instrumentation

### Test equipment

The pressuremeter test is an in-situ stress-strain test performed on the wall of a borehole using a cylindrical probe that is expanded radially. The instrument used in this research was the Menard pressuremeter, which is made up of three main parts: a monitoring box, a radially expandable cylindrical probe, and a gas cylinder, as illustrated in Fig.2.

### Saturating the system

After the system had been connected correctly, half diluted automobile antifreeze as the pressure transmission medium was injected into the system because of the low temperature of the test environment. To improve the test precision, the saturating operation was also carried out to exclude the air out of the system.

### Calibrating

The instrument should be calibrated before each experiment to compensate for pressure losses due to the rigidity of the probe wall and volume losses due

Table 1. Permafrost conditions and pressuremeter parameters

Test No.	Depth (m)	Water content (%)	Temperature (°C)	$E_m$ (MPa)	$P_L$ (MPa)
4	6.2	31.6	-0.24	14.79	0.83
5	4.1	50.0	-0.34	16.82	0.83
6	5.8	20.9	-0.27	7.40	0.73
7	5.0	30.6	-0.23	4.68	0.74
8	6.4	20.9	-0.23	8.86	1.37
9	2.6	36.0	-0.69	15.65	1.76
10	3.8	14.7	-0.82	25.66	3.00
11	4.6	31.9	-0.32	5.56	1.61
12	5.6	30.1	-0.37	15.69	1.15
13	4.6	17.7	-0.21	11.04	1.32
14	5.6	40.5	-0.24	13.57	0.81
15	4.6	12.8	-0.16	4.15	1.09
16	5.6	61.3	-0.22	15.80	0.97
17	2.6	16.5	-0.26	2.61	0.66
18	5.6	19.5	-0.64	17.65	2.21
19	6.6	196.0	-0.82	80.21	1.85
20	2.6	132.3	-0.82	67.90	1.55

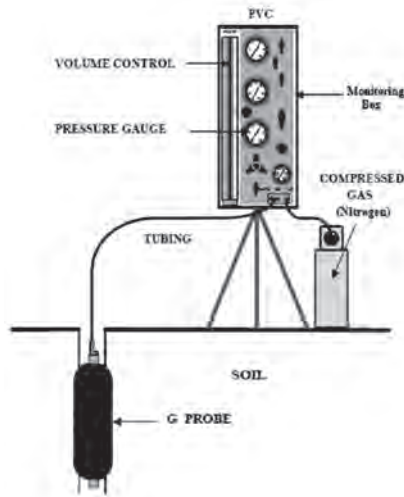


Fig. 2. Schematic drawing of test equipment.

to expansion of the system itself. Otherwise, the system error will be considerable.

### Drilling

Two conditions are necessary to obtain a satisfactory test cavity: the diameter of the hole should meet the specified tolerances, and the method used to prepare the test cavity should cause the least possible disturbance to the frozen soil. The diameter of the pressuremeter probe  $D$  is 74 mm, and the diameter of the drilling tool we used  $D_T$  is 76 mm, so the diameter of the test cavity  $D_H$  which is a little greater than  $D_T$  satisfied the following condition derived from experience:

$$1.03 D < D_H < 1.2D \quad (1)$$

Then the probe was put into the borehole and the test was conducted the next day to allow the soil temperature to recover somewhat.

### Performing test

After a night's recovery of the soil temperature, the pressuremeter tests were conducted in the morning. The initial volume and pressure were recorded before the test started, and then the pressure was applied onto the frozen soil in equal increment by 0.1 or 0.15 MPa according to the soil type and temperature at the depth of tests. Each pressure level was kept constant for 30 min, and the volume change of the probe was recorded at a proper interval from 1 to 5 min. The test was stopped when the volume reading was around 750 cm<sup>3</sup> by deflating the probe to its original volume and removing the probe from the hole.

## Results and Analyses

### Data preparation

After finishing the tests, the corrected pressure and volume readings are calculated using the calibration formulas [12]. Then the relationship between the accumulative volume and time is obtained as shown in Fig.3.

Overall, with the increase of time, the volume

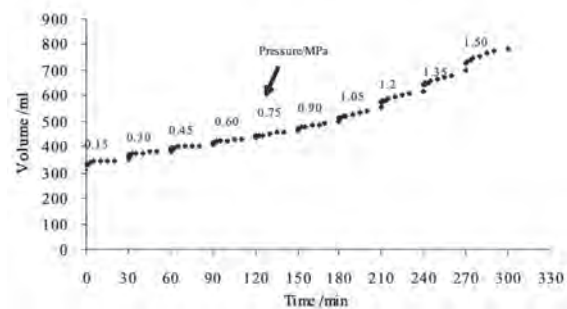


Fig. 3. Volume-time curve.



increases and the slope of the curve augments; locally, the volume increases over time during the period of each pressure level, but the slope decreases gradually.

### Stress-strain relationship

A series of stress-strain curves are gained in this paper using the theory proposed by Ladanyi [13]. The average mobilized strength  $q_{i,i+1}$  and the corresponding average shear strain  $\gamma_{i,i+1}$  can be calculated by the following formulas.

$$q_{i,i+1} = \sigma_r - \sigma_\theta = \frac{p_i - p_{i+1}}{\frac{1}{2} \left[ \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_i - \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{i+1} \right]} \quad (2)$$

$$\gamma_{i,i+1} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_i + \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{i+1} \right] \quad (3)$$

Where  $q_{i,i+1}$  denotes the average mobilized principle stress difference;  $\gamma_{i,i+1}$  is the average shear strain;  $i$  is the loading number,  $i=1, 2, 3, \dots$ ;  $p_i$ , is the corrected pressure reading of the No.  $i$  loading;  $V$  is the current volume of the probe;  $\Delta V = V - V_0$  and  $V_0$  is the volume of the probe corresponding to the original lateral pressure  $p_0$ .

Two kinds of the stress-strain curves gained from the pressuremeter tests in terms of  $q$  vs.  $\gamma$  are shown in Fig.4. Tests 4-5, 7-9, 12, 14, 16, 19-20 present the form of curve **a**, and the rest of the tests present the form of curve **b**. But both the two curves seem to be different from the most stress-strain curves of the short-term tests, which have the peak strengths, carried out by Ladanyi [14]. The reason for the difference, we conclude, is the duration per pressure stage by comparing the test programs. The time intervals per stage are 2 min in Ladanyi's short tests, while ours are 30 min. Observing his test 3-1 in which the time interval is 15 min, however, the stress-strain curve is very similar to the curve **a**. So the rate of loading is an important factor affecting the shape of the stress-strain curve. The reason of producing the shape **a** is that the soils, mainly present plastic, show brittleness partly. At low loads the frozen soil behaves quasi-elastically with radial stress  $\sigma_r$  increasing and circumferential stress  $\sigma_\theta$  decreasing. When  $\sigma_\theta$  attains the tensile strength of the soil, however, radial cracks appear and  $\sigma_\theta$  becomes zero. With further increasing  $\sigma_r$  the cracks are healed and the soil can again sustain tensile stresses until the tensile strength is attained for the second time ([14], [15]). The soils which produce the shape **b** are completely plastic; the deviator stresses are always increasing with the decreasing slope of the curves. For both the two curves the peak strength is not reached.

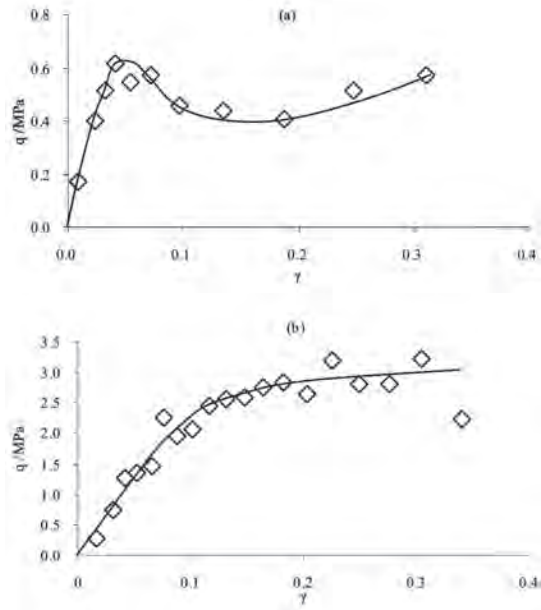


Fig. 4. Two kinds of stress-strain curves.

In this paper, considering the relationship between the shapes of the stress-strain curves and the soil conditions, it is found that the water content is the primary factor to decide the shape of the stress-strain curve. The water content ranges between 20.9 and 196% with regard to the shape **a**, between 14.7% and 31.9% with regard to the shape **b**. The borderline is about 30%.

In addition, the initial deformation modulus  $E_p$  and the failure strength  $P_L$  can be deduced from the stress-strain curves of the tests. On the curves, the slope of the pseudo straight line is calculated as the initial deformation modulus  $E_p$ . Traditionally the pressure corresponding to the volume  $V_c + 2V_0$  on the pressuremeter curve is regarded as limit pressure ( $V_c$  is the initial volume of the probe), then the shear strain is obtained using Formula (3),  $\gamma = \frac{(V_c + 2V_0) - V_0}{V_c + (V_c + 2V_0)} = 0.5$ ,

this value is taken as the failure strain of the pressuremeter test so as to get the failure strength of the soil by extending the stress-strain curve. Table 1 gives the values of the initial deformation modulus  $E_p$  and the values of the failure strength  $P_L$  for all the pressuremeter tests.

### Parameters analysis

Looking at Table 1, we can see that the overall variation of the parameters is as follows:  $E_p$  from 2.61 to 80.21 MPa, average 19.30 MPa;  $P_L$  from 0.66 to 3.00 MPa, average 1.32 MPa. The temperature ranges from -0.16 to -0.82°C, average -0.40°C; the water content ranges from 12.8 to 196%, average 44.9%. Accordingly the results of the tests generally reflect the mechanical behavior

of the warm and ice-rich permafrost. In this paper, the mechanical behavior of frozen soils mainly depend on the temperature and water content, because the soils we encountered in all the tests were clay. Fig. 5 and Fig. 6 show the relationships between initial deformation modulus  $E_p$  or failure strength  $P_L$  and soil temperature, indicating that  $E_p$  and  $P_L$  increase with decreasing temperature for all kinds of permafrost. Especially for the icy, ice-rich or saturated permafrost,  $E_p$  and  $P_L$  nearly have a linear relationship with the negative temperature, respectively.

Fig. 7 and Fig. 8 show the relationships between  $E_p$  or  $P_L$  and the water content in the higher temperature range (-0.16~ -0.37°C) and in the lower temperature range (-0.64~ -0.98°C), respectively. It is found that,  $E_p$  and  $P_L$  positively correlated with the water content in the case of temperature higher than -0.37°C and water content lower than 60%. The tendency is the same as the former case when the temperature is lower than -0.64°C, but further study is necessary because of the irregular distribution of the data points.

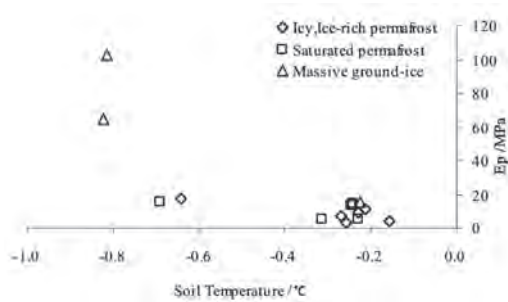


Fig. 5. Relationship between initial deformation modulus  $E_p$  and soil temperature.

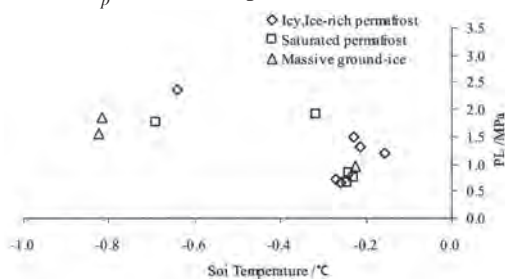


Fig. 6. Relationship between failure strength  $P_L$  and soil temperature.

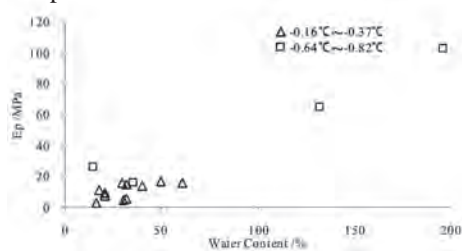


Fig. 7. Relationship between initial deformation modulus  $E_p$  and water content.

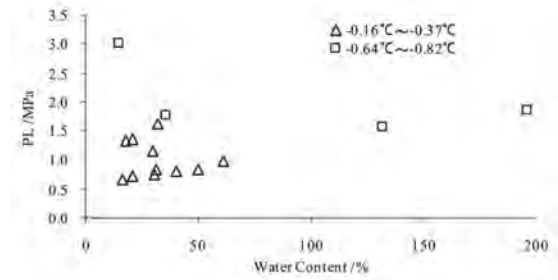


Fig. 8. Relationship between failure strength  $P_L$  and water content.

## Conclusions

1. Based on the data of pressuremeter tests in permafrost, the relationships between stress and strain for frozen soils can be obtained by using the non-linear elastic/perfectly plastic solution.

2. Generally there are two kinds of stress-strain curves. Both of them, however, are different in shape from the short-term pressuremeter tests because of the loading rate. In our tests, the two curves do not reach the peak strengths. The primary factor affecting the shape of the stress-strain curves is water content, and the boundary is 30%.

3. The initial deformation modulus  $E_p$  as well as the failure strength  $P_L$  of the permafrost can also be deduced from the stress-strain curve. Both of the two parameters have positive correlation with the absolute value of the temperature and the water content generally. However, further research is necessary on account of the complex relationships.

## Acknowledgements

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (40971045) and State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (09SF102007)

## References

1. Zhou Youwu, and Guo Dongxin. 1982. Principal characteristic of permafrost in China. *Journal of Glaciology and Geocryology* 1: 737-747. (in Chinese)
2. Cheng Guodong. 2003. Research on engineering geology of the roadbed in permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences* 2: 134-139. (in Chinese)
3. Cheng Guodong. 2003. Construction of Qinghai-Tibet Railway with cooled roadbed. *China Railway Science* 3: 1-4. (in Chinese)
4. Tsytoovich, N.A. 1985. *Mechanics of Frozen Soil*. Translated by Zhang Changqing, Zhu Yuanlin. Science Press, 476 pp. (in Chinese)

5. Vialov, C. C. 2005. *Rheology of Frozen Soil*. Translated by Liu Jiankun, Liu Yaojun et al. China Railway Science, 390 pp. (in Chinese)
6. Zhu Yuanlin and Zhang Jiayi. 1982. Elastic and compressive deformation of frozen soils. *Journal of Glaciology and Geocryology* 3: 29-40. (In Chinese)
7. Zhu Yuanlin, Liu Yongzhi and Xie Xiande. 1983. In-situ creep test research of ground ice on Qinghai-Tibet Plateau. *Proceedings of the Permafrost Research on Qinghai-Tibet Plateau*, 124-130. (in Chinese)
8. Yu Wenbing and Lai Yuanming. 2002. In-situ determination of mechanical properties of frozen soils with the pressuremeter. *Cold Regions Science and Technology* 3: 179-189.
9. Yu Wenbing, Zhu Yuanlin, Zhang Jianming et al. 2002. Study on the borehole pressuremeter test in permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* 3: 287-291. (in Chinese)
10. Ma Xiaojie, Zhang Jianming et al. 2008. Study on warm and ice-rich permafrost beneath Qinghai-Tibet Railway embankment with pressuremeter. *Rock and Soil Mechanics* 3: 764-768. (in Chinese)
11. Ma Xiaojie, Zhang Jianming et al. 2008. Experimental study on the lateral pressure creep of warm permafrost in Qinghai-Tibet Plateau. *China Railway Science* 6: 1-5. (in Chinese)
12. ASTM D4719-00. *Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils*.
13. Ladanyi, B. 1972b. In-situ determination of undrained stress-strain behavior of sensitive clays with the pressuremeter. *Canadian Geotechnical Journal* 3: 313-319
14. Ladanyi, B. 1972. Interpretation of Pressuremeter Test Results in Frozen Soils. *Internal Report No.401 of the Division of Building Research*.
15. Wang Changke. 1994. The calculative method of bearing capacity of composite foundation with granular materials. *Ground Improvement* 2: 40-46. (In Chinese)

# Hysteretic energy and temperature behavior of frozen soils under cyclic loading

Shujuan ZHANG, Zhizhong SUN, Shuangyang LI

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions  
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Donggang West Road 320, Lanzhou, China, 730000, e-mail: sjzhang@lzb.ac.cn

**Abstract.** Based on the results from a series of testing with temperature monitored, using embedded thermistor temperature sensor in frozen specimen during cyclic compressive loading, it is known that, when the environmental temperature surrounding the specimen keeps constant, the temperature in the frozen specimen increases, and the temperature rise nonlinearly increases with accumulated hysteretic energy. The hysteretic energy can be obtained from the area of the stress-strain curve, so the temperature change may be indirectly estimated according to the area of hysteretic loop during the cycle.

**Keywords:** frozen soil; cyclic loading; temperature evolution; hysteretic energy.

## Гистерезисная энергия и характер изменения температуры мерзлых грунтов при циклическом нагружении

Шуцзюань ЧЖАН, Чжичжун СУНЬ, Шуанян ЛИ

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН  
КНР

Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: sjzhang@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Выполнена серия опытов по определению изменения температуры образцов мерзлых грунтов при циклическом компрессионном нагружении. Температура образцов измерялась с помощью вставленных в них термисторных датчиков. Выявлено, что при постоянной температуре внешней среды температура образцов мерзлого грунта возрастает и что повышение температуры увеличивается нелинейно с накоплением гистерезисной энергии. Величину гистерезисной энергии можно получить по площади кривой зависимости деформаций от напряжений, поэтому изменение температуры можно косвенно оценить по площади петли гистерезиса во время цикла.

**Ключевые слова:** мерзлый грунт; циклическое нагружение; изменение температуры; гистерезисная энергия.



# Hysteretic energy and temperature behavior of frozen soils under cyclic loading

Shujuan ZHANG, Zhizhong SUN, Shuangyang LI

## Introduction

Frozen soil is made up of solid mineral particles, ice inclusions, liquid water (unfrozen water and tightly bound water) and gaseous inclusions (water vapor and air) [1]. It distinguishes itself from other geotechnical engineering materials due to existence of ground ice. Physical and mechanical properties of the frozen ground are highly variable and extremely sensitive to changes in soil temperature [2]. Based on the literatures of mechanics feature on frozen soils, they are approximately sorted into two categories: on the one hand, the mechanics property of frozen soils are discussed when the initial temperature of specimen (that is test temperature) changes and the other testing conditions are fixed ([3]-[8]). On the other hand, under condition of the fixed initial temperature of specimen, the influence of the soil type, the initial dry density and water content of specimen, load type et al. on the mechanics feature are analyzed ([9]-[11]).

In all the aforementioned literatures, the specimens are in constant negative temperature environment in the course of testing, thus the temperature change in the specimens is not been generally considered during loading. Based on the studying results on metal and polymeric materials, it is known that under the simple tension or compression, a large part of the mechanical energy converts into heat, which causes the temperature rise of materials ([12]-[15]). As far as polymeric materials are concerned, the effect of hysteretic heating has been clearly shown to

dramatically affect the mechanical response of the material [16]. Frozen soils, as a material with high sensibility to temperature, when the heat is not allowed to fully flow out of the structure during compressive load, its temperature or unfrozen water content will change, and thus its mechanical property will be changed. The study from Parameswaran shows that the temperature of frozen sand rises from  $-3.5^{\circ}\text{C}$  to  $-2.5^{\circ}\text{C}$  during cyclic loading; it also reported that, in truth, the internal temperature of frozen specimen gradually increases when the confining pressure or cyclic loading with high frequency or high stress amplitude is applied to it, or when it is subjected to rapid strength testing [17]. In recent years, some simply results are also described by Zhang et al. ([18], [19]). Except for the four relative literatures above, the further relevant work can not be found. The objective of the present research is to experimentally determine the temperature change of cylindrical frozen samples and hysteretic energy behavior during cyclic loading, and discuss the relationship between temperature change and hysteretic energy.

## Experiments

In this study, the soil used was silty sand and silty clay taken from Qinghai-Tibet Railway constructions' site and clay from Qinghai-Jiangcang, which has been used as subgrade material and foundation soil in the process of building railway and roadway in cold regions. Their physical parameters were listed in Table 1.

Table 1. Basic physical properties of tested soils

Composition of grains /%					Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Water content (%)	Dry density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Soil type
2~0.5 (mm)	0.5~0.25 (mm)	0.25~0.075 (mm)	0.075~0.005 (mm)	<0.005 (mm)					
1.85	8.03	47.44	36.57	6.03	/	/	15.00	1.80	Silty Sand
/	/	5.64	60.22	34.14	32.88	17.50	15.23	1.80	silty clay
/	0.26	21.20	65.60	12.94	37.8	17.7	15.00	1.80	clay

The procedure of preparing samples is performed according to the Specification of Soil Test (GB/T50123-1999) issued by the Ministry of Water Resources, PRC. All the specimens, 125.0 mm in height and 61.8 mm in diameter, were compacted in four layers. Then the samples with mold were frozen in a refrigerators at  $-20.0^{\circ}\text{C}$

for over 24 h, and afterwards the molds were removed, and the samples were covered with rubber sleeve and placed in an incubator at the test temperature for over 12 h so that the sample had a uniform temperature. It is noticed that at the same test temperature, the initial temperature difference between specimens was less than

0.1°C, and the difference between cross-sections in each specimen was not beyond 0.05°C before the test was conducted.

All the specimens were loaded in compression by a prescribed sinusoidal load at different conditions using a machine-MTS 810, which is installed inside a room at constant normal temperature, the environment temperature of specimen is controlled by combination of a constant temperature cycle device and a specially designed thermotank, which structure is described in the invention patent [20]. The testing specimen is placed the centre of the thermotank, the end plates is glass steel with similarity in strength and anti-deformation to frozen soils, and it has good heat-insulation property. A slight pressure (the minimum sinusoidal load) was applied to ensure sustained contact with the specimen. The maximum sinusoidal load was chosen according to the static strength ( $F$ ) of the specimen. The static strength, at a shear rate of 5.0 mm/min, is the peak value on the stress-strain curve or the stress value at 20% strain when no peak value appears on the stress-strain curve.

Thermistor temperature sensor (shown in Fig.1) used to measure temperature is described in the reference [21]. The diameter and length of the temperature sensor are 2.0 mm and 35.0 mm (10.0 mm exposed metal and 25.0 mm insulated metal), respectively, and the length of lead wire is 1.5m, the bearing capacity is not beyond 10.0 MPa.

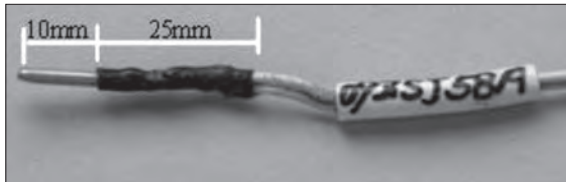


Fig. 1. Thermistor temperature sensor.



Fig. 1. Specimen with two thermistor temperature sensors.

For ensuring a close contact of the thermistor temperature sensor with the specimen, three small holes were first drilled at three given corresponding points on the sample mold, and the temperature sensors were then inserted through the holes and directly embedded in the specimen, respectively during the specimen was prepared.

All of the tests were conducted in a constant surrounding temperature (initial temperature of sample) of -4.0°C, and stopped when the total strain basically keep constant with increasingly cycles or when the total strain is beyond 10.0%. The data were collected by computer continually.

### Test results and discussions

#### *Hysteretic energy of each cycle*

Cyclic loading of a viscoelastic or elastoplastic material (beyond the elastic domain) yields a hysteresis loop in the stress-strain relationship. Such a loop indicates that part of the strain energy is not recovered but dissipated during the cycle. In materials subjected to cyclic loading, the temperature evolution is complicated by the accompanying inelastic deformation, dynamic loading, and heat dissipation. However, the dissipated mechanical energy can be characterized by hysteresis effects. Most of the energy manifests itself as heat [22].

For frozen soils, at the same frequency the hysteretic energy of each cycle is different when maximum sinusoidal load changes. Fig. 4 shows the developing trend of hysteretic energy of each cycle with increasing number of cycle for silty clay, clay and silty sand. From Fig. 2(a<sub>1</sub>), (b<sub>1</sub>) and (c<sub>1</sub>), it is found that when maximum sinusoidal load is 0.31 $F$ , the hysteretic energy of each cycle initially decreases, and then basically keeps constant with increasing cycles, which indicates that the strain increases at the first cycles, and then the cyclic stress and strain responses are stabilized, i.e., the strain is hardly unchanged. When maximum sinusoidal load is beyond 0.70 $F$ , the hysteretic energy of each cycle decreases during the initial cycles, and then drastically increases with increasing cycles, as shows that the large deformation produces when the hysteretic energy of each cycle abruptly increases under the constant load.

#### *Temperature rise versus accumulated hysteretic energy*

Under the cyclic compressive loading, most of the dissipated energy is converted into heat,

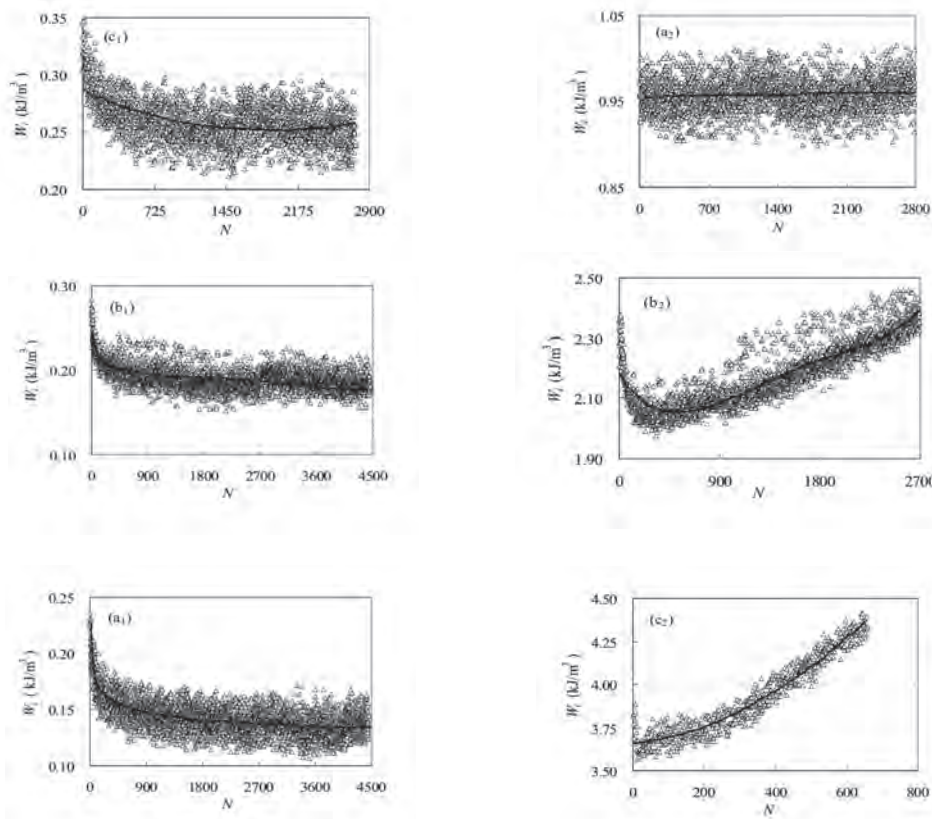


Fig. 2. Hysteretic energy of each cycle at 3Hz with a initial temperature of  $-4.0^{\circ}\text{C}$ , maximum sinusoidal load is: (a<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (a<sub>2</sub>)  $0.75 F$  for silty clay, (b<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (b<sub>2</sub>)  $0.64 F$  for clay, (c<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (c<sub>2</sub>)  $0.90 F$  for silty sand.

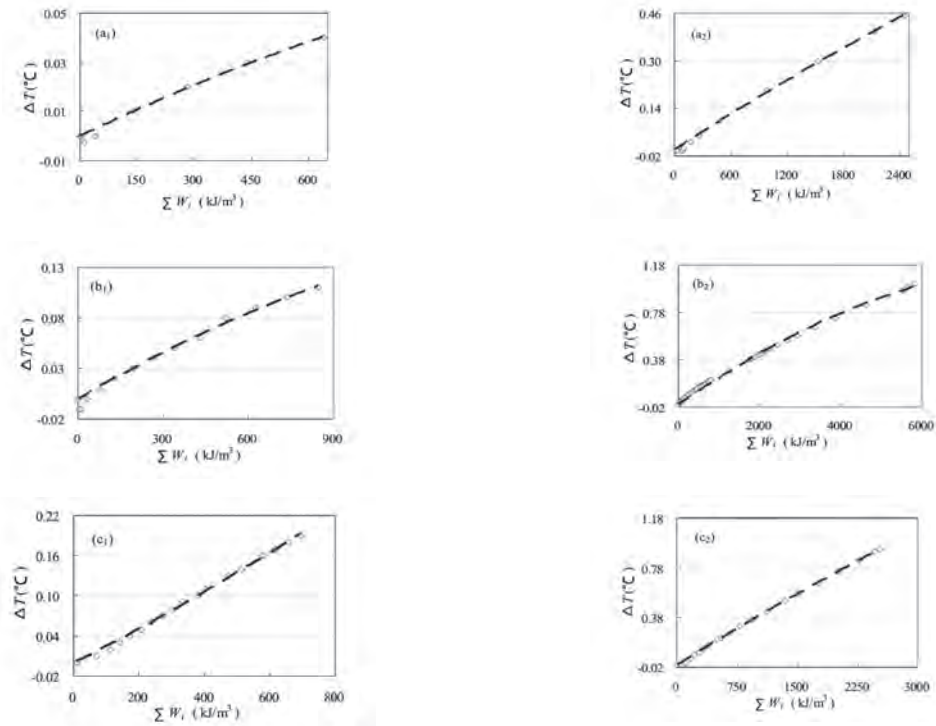


Fig. 3. Temperature rise versus accumulated hysteretic energy of each cycle at 3Hz with a initial temperature of  $-4.0^{\circ}\text{C}$ , the maximum sinusoidal load is: (a<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (a<sub>2</sub>)  $0.75 F$  for silty clay, (b<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (b<sub>2</sub>)  $0.64 F$  for clay, (c<sub>1</sub>)  $0.31F$  and (c<sub>2</sub>)  $0.90 F$  for silty sand. Note that the dotted line is fitted values, and the data points are obtained according to experimental data.



manifested by the change in temperature. Fig. 3 describes the effect of accumulated hysteretic energy on the temperature change. It can be seen that the temperature rise nonlinearly increase with increasingly accumulated hysteretic energy except for the initial several temperatures decrease due to the energy absorbed against the defects of specimen itself.

By fitting the data points, the following equation is obtained,

$$\Delta T = a \sum W_i^2 + b \sum W_i \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

Where  $a$  is parameter dependent on frozen soil type and maximum sinusoidal load, and it is constant with the various soil types when maximum sinusoidal load is beyhone  $0.60F$ .  $b$  is considered to be a constant, listed in Table 2.

Table 2. Values of  $a$  and  $b$

Soil type	Maximum load	$a$	$b$
Silty clay	$0.31F$	$-2 \times 10^{-8}$	$0.7 \times 10^{-4}$
	$0.64F$	$-0.8 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$
clay	$0.31F$	$-4 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$
	$0.75F$	$-1 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$
Silty sand	$0.31F$	$5 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-4}$
	$0.90F$	$-1 \times 10^{-8}$	$4 \times 10^{-4}$

### Conclusions

According to the present study, the following conclusions are obtained:

1) Under the constant cycle load, the hysteretic energy of each cycle decreases in the initial cycles, and then increases with increasing cycles. The tendency of the hysteretic energy changes with maximum load.

2) Temperatures rise in frozen specimen nonlinearly increase with increasingly accumulated hysteretic energy.

3) An equation is put forward in order to directly estimate the temperature change according to the area of the stress-strain curve.

A serials of experiments need to be conducted in future for determining a relationship of parameter  $a$  and  $b$  with soil type and maximum load.

### Acknowledgements

The work is supported by the National Natural Science Foundation of China (40801029, 40801024), the West Light Foundation of The Chinese Academy of Sciences for PhD Zhizhong Sun, the Grant of Western Project Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2-XB2-10), and the project of State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLFSE-ZQ-01, SKLFS-ZY-02).

### References

1. Tsytoovich, N.A. 1985. The Mechanics of Frozen Ground. *Science Press*, Beijing (Translated by Zhang Changqing, Zhu Yuanlin).
2. Zhou, Y.W., Guo, D.X., Qiu, G.Q. et al., 2000. *Frozen Ground in China*. Science Press, Beijing, pp. 7-41. (in Chinese)
3. Tsytoovich, N. A., Sumgin, M.I. 1937. Principles of Mechanics of Frozen Ground. *Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscow*. SIPRE Transl. 19,106-107.
4. Sayles, F.H., Carbee, D.L. 1981. Strength of frozen silt as a function of ice content and dry unit weight. *Engineering Geology* 18: 55-66.
5. Zhu, Y.L. 1987. Tensile strength of frozen silt. *USA CRREL Report* 87(15): 56-78.
6. Wu, Z. W., Ma, W. 1994. *Strength and creep of frozen soil*. Lanzhou University Press, 36-87. (in Chinese)
7. Zhao, S.P., He, P., Zhu, Y.L., Chang, X.X. 2006. Comparison between dynamic and static creep characteristics of frozen silt. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 28(12): 2160-2163. (in Chinese)
8. Zhang, S.J., Lai, Y.M., Sun, Z.Z. et al. 2007. Volumetric strain and strength behavior of frozen soils under confinement. *Cold Regions Science and Technology* 47(3): 263-270.
9. Gardner, A.R., Jones, R.H., Harris, J.S. 1984. A new creep equation for frozen soils and ice. *Cold Regions Science and Technology* 9: 271-275.
10. Li, H.P., Zhu, Y.L., Zhang, J.B. et al. 2004. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay. *Cold Regions Science and Technology* 39(1): 39-45.
11. Yang, Y.G., Lai, Y.M., Chang, X.X. 2010. Experimental and theoretical studies on the creep behavior of warm ice-rich frozen sand. *Cold Regions Science and Technology* 63(1-2): 61-67.
12. Dillon, O.W. 1966. The heat generated during the torsional oscillations of copper tubes. *Int. J. Solids Structures* 2: 181-204.
13. Dillon, O.W. 1976. Adiabatic heating as a cause of low cycle fatigue failure. *Mech. Res. Comm* 3: 367-372.
14. Rittel, D. 1999. On the conversion of plastic work to heat during high strain rate deformation of glassy polymers. *Mech. Mater* 31: 131-139.
15. Riddell, M.N., Koo, G.P., O'Toole, J.L. 1966. Fatigue mechanisms of thermoplastics. *Polym. Eng. Sci October*: 363-368.
16. Constable, I., Williams, J.G., Burns, D.J. 1970. Fatigue and thermal softening of thermoplastics. *J. Mech. Eng. Sci* 12 (1): 20-29.
17. Parameswaran, V.R. 1985. Cyclic creep of frozen soils. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing*, August 5-7, 1985, Sapporo, Japan.
18. Zhang, X.Z., Zhu, G.C. 1999. Effect of



confining pressure on temperature-resistance of thermistor and temperature field. *Journal of Glaciology and Geocryology* 21(1): 39-41. (in Chinese)

19. Zhang, S.J., Lai, Y.M., Sun, Z.Z. et al. 2011. An experimental study of the heat generated during cyclic compressive loading of frozen soils, *Cold Regions Science and Technology*. doi: 10.1016/j.coldregions. 2011. 02. 012.

20. Chang, X.X., Sheng, Y., Ma, W., 2001. *Multi-functional Lathe Turning Machine under Negative Temperature*. China Patent Infonet, application date

2001-06-06, application No CN01115289.1, patents granting date 2003-04-31, patent No CN01115289.3. (in Chinese)

21. Liu, J.M., Shen, Y., Guo, Y.D., Zhao, S.P. 2010. Demonstration on technology of high-precision thermistor temperature sensor. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in press). (in Chinese)

22. Jiang, L., Wang, H., Liaw, P.K. et al. 2004. Temperature evolution of low-cycle fatigue of ULTIMET alloy: experiment and modeling. *Mechanics of Materials* 36: 73-84.

# The impact of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristics of frozen Qinghai-Tibet clay

Shu-ping ZHAO<sup>1</sup>, Wei MA<sup>1</sup>, Gui-de JIAO<sup>1,2</sup>, Fei LUO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of  
Sciences

320 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: shuping@lzb.ac.cn

<sup>2</sup>Civil and Engineering Department, Lanzhou University, Lanzhou, China

**Abstract.** Based on the test result of Qinghai-Tibet clay before and after freeze-thaw cycles under long-time cyclic dynamic loading, following conclusion can be drawn. The change rule of the accumulative strain with time is same before and after freeze-thaw cycles. The accumulative strain increases continually with the time increasing. Larger the stress amplitude, greater the accumulative strain. For all frozen soil samples before or after freeze-thaw cycles, higher the frequency, less the critical dynamic stress. The critical dynamic stress will decrease obviously after freeze-thaw cycles. The freeze-thaw cycles have influence on the failure characteristic of frozen soil. The failure strain will decrease, the time to failure will be shorter, and the minimum strain rate will increase after freeze-thaw cycles. In other words, frozen soil will be easier to failure after freeze-thaw cycles.

**Keywords:** freeze-thaw cycles; long-time cyclic dynamic loading; frozen Qinghai-Tibet clay; accumulative strain; critical dynamic stress; failure characteristics.

## Влияние циклов промерзания-протаивания на динамические характеристики Цинхай-Тибетской мерзлой глины

Шупин ЧЖАО<sup>1</sup>, Вэй МА<sup>1</sup>, Гуйдэ ЦЗЯО<sup>1,2</sup>, Фэй ЛО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН  
КНР

Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: shuping@lzb.ac.cn

<sup>2</sup>Факультет гражданского строительства Университета Ланьчжоу, г. Ланьчжоу, Китай

**Аннотация.** Выполненные испытания Цинхай-Тибетской глины до и после циклов промерзания-протаивания при длительном циклическом динамическом нагружении показали следующее. Закономерность изменения накопленной деформации во времени одинакова до и после циклов промерзания-протаивания. Накопленная деформация непрерывно возрастает с увеличением количества циклов промерзания-протаивания. Чем больше амплитуда действующих напряжений, тем больше накопленная деформация. У всех образцов мерзлого грунта до и после циклов промерзания-протаивания с ростом частоты снижается критическое динамическое напряжение. Критическое динамическое напряжение снижается закономерно после циклов промерзания-протаивания. Циклы промерзания-протаивания влияют на характеристики прочности мерзлого грунта. После циклов промерзания-протаивания разрушающая деформация уменьшается, время до разрушения сокращается, а минимальная скорость деформации увеличивается. Другими словами, после циклов промерзания-протаивания мерзлый грунт легче разрушается.

**Ключевые слова:** циклы промерзания-протаивания; длительное циклическое динамическое нагружение; мерзлая Цинхай-Тибетская глина; накопленная деформация; критическое динамическое напряжение; характеристики прочности.

# The impact of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristics of frozen Qinghai-Tibet clay

Shu-ping ZHAO, Wei MA, Gui-de JIAO, Fei LUO

## Introduction

The soil will undergo repeated freeze-thaw cycles in cold region. So the influence of freeze-thaw cycles on the characteristic of soil should be taken into account during the engineering construction in cold region. Many researchers compared the physical parameters, namely permeability, grain size distribution, density, void ratio of thawed soil before and after freeze-thaw cycles. Jilin Qi concluded these achievements in his paper [1]. However, studies on the mechanical characteristic of thawed soil before and after freeze-thaw cycles, such as stress-strain relation, module, cohesion and internal friction angle, dynamic parameters and dynamic strength, soil structure et al. are relative little ([2]-[10]). What's more, until now, most research results are about the influence of different times of freeze-thaw cycles on the characteristic of thawed soil until now. Few researches are about the impact of freeze-thaw cycles on the characteristic, especially the dynamic characteristic of frozen soil. As to engineering in cold regions, base soil will undergo freeze-thaw cycles, and maybe in two conditions, freezing and thawing. So it's important to study the influence of freeze-thaw cycles on frozen soil also. The base soil of road engineering will experience the long-time repeated vehicle loading. The static design standard will be unreasonable, with the increasing of vehicle speed. More and more researchers focus on the dynamic characteristic of the special soil under vehicle loading ([11]-[14]). Frozen soil is a kind of special soil because of its rheological character. So it's necessary to study the influence of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristic of frozen soil, which is discussed in this paper through freeze-thaw test and mechanical test of frozen soil under long-time dynamic loading.

## Methods

### *Samples preparation*

The material used in this investigation is from Beiluhe test section of Qinghai-Tibet railway. The liquid limit is 32.88%, plastic limit is 17.5%, plastic index is 15.38, and the grain specific gravity is 2.57. The particle distribution curve is shown in Figure 1. This soil should be classified as CL (low liquid limit clay) based on the Unified Soil Classification System.

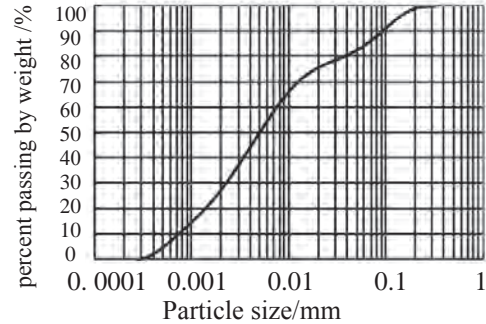


Fig. 1. The particle distribution curves of test soil.

All samples use remolded soil. First, air dry, grind and sift out the raw soil samples. Second, add distilled water to soil with grain diameter less than 2 mm, to make the water content 13% by weight. After storage overnight to allow for moisture equilibration, the moist soil was carefully compacted using the Standard Specimen Instrument. The samples are then placed in the device to air-bleed for 2 h and water-saturated for more than 12 h. In the end, the diameter of specimen is 61.8 mm, the height is 125 mm, water content increase to 17.4%, and the dry density is 1.856 g/cm<sup>3</sup>.

### *Freeze-thaw test*

Many tests are performed by author to study the influence of different confining way on the characteristic of soil during freeze-thaw test ([15]). The results show that copper mould should be chosen during the freeze-thaw experiment, as shown in Figure 2. The copper mould consists of 3 pieces, so vaseline is smeared in the gap of the mold, to reduce the water lose during the freeze-thaw cycles.

The freeze and thaw experiment is performed in the temperature-controlled cabinet and room respectively. To decrease the water migration in the samples during the freeze-thaw cycles and make sure the specimen is still more uniform, quick multidirectional freeze and thaw method are used. The temperature of cabinet and room is designed as -25°C and 15°C respectively. There is no water supply during freeze-thaw experiment. The samples can be frozen thoroughly under -25°C after 17 h and thaw thoroughly under 15°C after 7 h. The samples after first frozen

are considered as frozen soil before freeze-thaw cycles (BFTC in abbreviation). Other samples undergo 10 times of freeze-thaw cycles are considered as frozen soil after freeze-thaw cycles (AFTC in abbreviation). Finally, the samples are unmolded, put on rubber and put into another temperature-controlled test cabinet.



Fig. 2. The photos of sample in Copper Mould.

#### Mechanical test under long-time dynamic loading

Mechanical test under long-time cyclic dynamic loading is performed to the samples before and after freeze-thaw cycles. All mechanical experiments are performed on the Material Test System with temperature -controlled test cabinet. Temperature is designed as  $-0.95^{\circ}\text{C}$  in these mechanical test. After the sample stay in the temperature-controlled test cabinet for 24 h, the uniaxial test is performed. The dynamic loading with sin wave was forced on the samples, which can be described as following function:

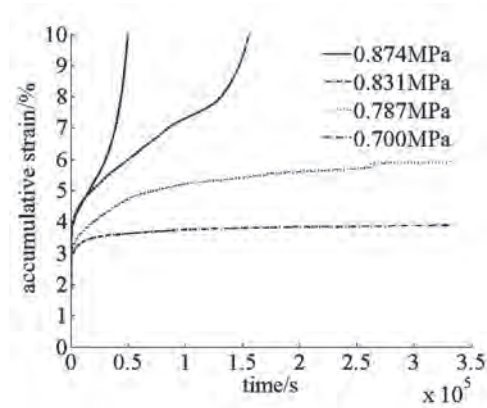
$$\sigma_d = \frac{\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}}{2} (1 + \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{2})) + \sigma_{d\min} \quad (1)$$

where  $\sigma_{d\max}$  and  $\sigma_{d\min}$  is the maximum and minimum value of dynamic stress respectively, and  $f$  is the frequency of loading. To make sure the samples and the loading cap is always contact, the minimum value of dynamic loading is designed as 0.053 MPa. The maximum value of dynamic loading is 20%-50% of the static strength, namely 0.35-1.032 MPa. The frequency is 3 Hz and 5 Hz in these tests. In the end, loading is stopped when the vibration cycles reach one million times or the samples failure.

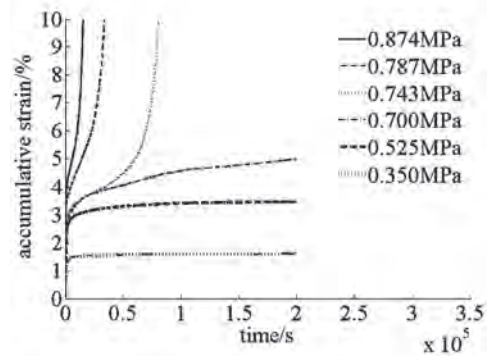
## Result and Discussion

### The accumulative strain and critical dynamic stress of frozen soil before and after freeze-thaw cycles

All the accumulative strain curves of frozen soil are shown in Figures 3 and 4. The change rule of the accumulative strain with time is same before and after freeze-thaw cycles.



a.  $f=3\text{Hz}$

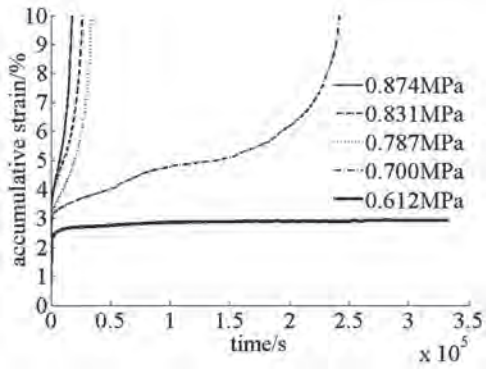


b.  $f=5\text{Hz}$

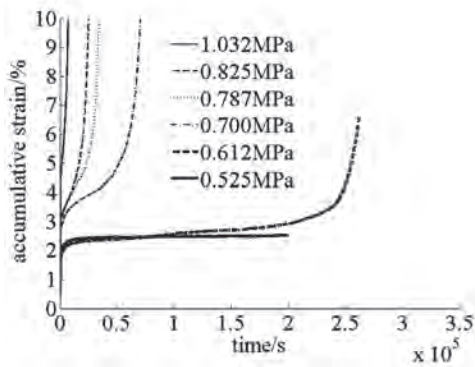
Fig. 3. The accumulative strain curves of frozen soil before freeze-thaw cycles under dynamic loading.

The accumulative strain increases continually with the time increasing. Larger the stress amplitude, greater the accumulative strain, when the loading time is same. There are three kinds of curves, unstable type, transitional type and stable type. When the dynamic stress is greater, the curves are unstable, in other words, the accumulative strain is undamped, and will increase continually until the sample failure. The strain curves include three stages, namely primary stage, steady stage and gradually flowing stage. When the dynamic stress is less, the samples will not failure in the end. The accumulative strain increase at first, then the strain rate will change to constant or zero, so the curves are transitional type or stable type respectively.





a.  $f=3\text{Hz}$



b.  $f=5\text{Hz}$

Fig. 4. The accumulative strain curves of frozen soil after freeze-thaw cycles under dynamic loading.

In view of the fatigue effect, the corresponding loading region when the accumulative curves change from transitional type to unstable type is considered as critical dynamic stress. The value of critical dynamic stress of frozen soil before and after freeze-thaw cycles is shown in Table 1. The change rule of critical dynamic stress with frequency is same, that is, higher the frequency, less the critical dynamic stress. The freeze-thaw cycles have obvious influence on the critical dynamic stress of frozen soil. The critical dynamic stress will decrease 19% and 22% respectively after freeze-thaw cycles, when frequency is 3 Hz and 5 Hz.

Table 1. The critical dynamic stress of frozen soil before and after freeze-thaw cycles

Freeze-thaw cycles	Frequency (Hz)	Critical dynamic stress (MPa)	Percent of Decrease
Before	3	0.787 - 0.831	
	5	0.700 - 0.743	
After	3	0.612 - 0.700	19%
	5	0.525 - 0.612	22%

The failure characteristic of frozen soil before and after freeze-thaw cycles

On the unstable type strain curves, the turning point, where strain change from steady stage to gradually flowing stage, indicates the beginning of the destruction of frozen soil. The corresponding strain, time and strain rate to above turning point or the end point on the transitional and stable type strain curves, are called failure strain, time to failure and minimum creep rate, respectively. Figure 5-7 show the failure characteristic of frozen soil before and after freeze-thaw cycles under different dynamic loading.

Figure 5 shows that the failure strain changes without obvious rule when the frequency or the dynamic stress increases. However, the freeze-thaw cycles has obvious influence on the failure strain, on the whole, the failure strain will decrease and less than 5% after freeze-thaw cycles.

According to Figure 6, we can conclude the rule of time to failure change with frequency or dynamic stress is same. Higher the frequency or greater the dynamic stress, shorter the failure time. The freeze-thaw cycles have great influence on the time to failure. The time to failure will be shorter after freeze-thaw cycles.

The relationship between the minimum strain rate and dynamic stress is shown in Figure 7. The rule of the minimum strain rate change with frequency or the dynamic stress is same. Higher the frequency or greater the dynamic stress, greater the minimum strain rate. The minimum strain rate will increase after freeze-thaw cycles.

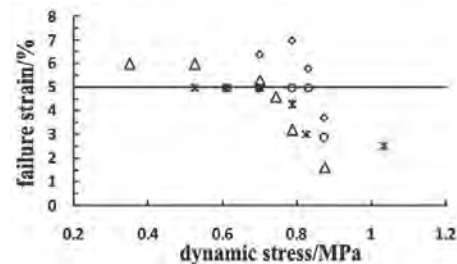


Fig. 5. The failure strain of frozen soil before and after freeze-thaw cycles.

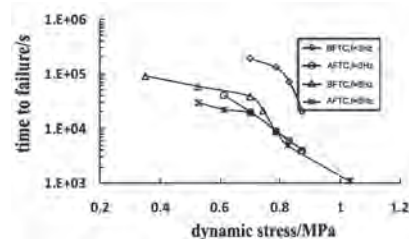


Fig. 6. The time to failure of frozen soil before and after freeze-thaw cycles.

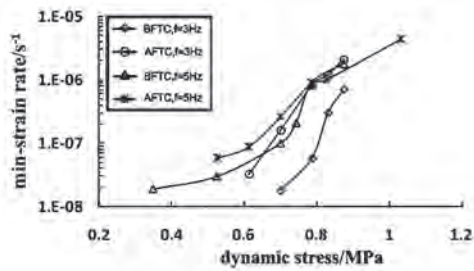


Fig. 7. The minimum strain rate of frozen soil before and after freeze-thaw cycles.

### Conclusion

According to the results of freeze-thaw test and mechanical test under long-time dynamic loading, following conclusion can be drawn.

(1) The change rule of the accumulative strain with time is same before and after freeze-thaw cycles. The accumulative strain increases continually with the time increasing. Larger the stress amplitude, greater the accumulative strain.

(2) For all frozen soil samples before or after freeze-thaw cycles, higher the frequency, less the critical dynamic stress. The freeze-thaw cycles have influence on the critical dynamic stress of frozen soil. The critical dynamic stress will decrease obviously after freeze-thaw cycles.

(3) The freeze-thaw cycles have influence on the failure characteristic of frozen soil. The failure strain will decrease, the time to failure will be shorter, and the minimum strain rate will increase after freeze-thaw cycles. In other words, frozen soil will be easier to failure after freeze-thaw cycles.

### Acknowledgments

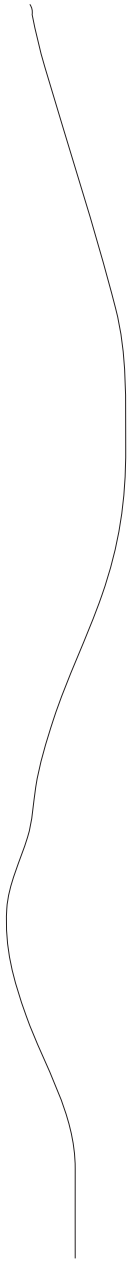
This work is supported by the Western Project Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-XB2-10), the National Natural Science Foundation of China (No. 40971046, 40901039), and self-determinating Project the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering of China (No. 09SF102003).

### References

1. Ji-lin Q., Guo-dong C., VERMEER P.A. 2005. State of the art of influence of freeze-thaw on engineering properties of soils. *Advances on Earth Science* 20(8): 887-893. (in Chinese)
2. Alkire B.D., Morrison J.M. 1983. Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading. *Transportation Research Record* 918: 15-21.
3. Lee W., Bohra N.C., Altschaeff A.G. et al. 1995. Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal* 32(4): 559-568.
4. Simonsen E., Isaksson U. 2001. Soil behavior during freezing and thawing using variable and constant confining pressure triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal* 38(4): 863-875.
5. Broms B.B., Yao L.Y.C. 1964. Shear strength of a soil after freezing and thawing. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 90(4): 1-26.
6. Ogata N., Kataoka T., Komiya A. 1985. Effect of freezing thawing on the mechanical properties of soil. *Proceeding of the Fourth International Symposium on Ground Freezing, August 5-7, 1985, Sapporo, Japan*: 201-207.
7. Ji-lin Q., Wei M., Chun-xia S. 2008. Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil. *Cold Regions Science and Technology* 53: 397-404.
8. Christ M., Kim Y.C., Park J.B. 2009. The influence of temperature and cycles on acoustic and mechanical properties of frozen soils. *Geotechnical Engineering* 13(3): 153-159.
9. Hai-bin W., Han-bing L., Yi-ping G. et al. 2007. Effect of freeze-thaw cycles on dynamic strength of fly ash soils. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)* 37(2): 329-333. (in Chinese)
10. Wen-ting D., Hai-bin W., Han-bing L. et al. 2007. Dynamic damage model of silty clay after freeze-thaw cycles. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)* 37(4): 790-793. (in Chinese)
11. Jian-min Z., Mao-tian L., Lan-min W. et al. 2007. Soil dynamics and geotechnical seismological engineering. *Proceeding of the Tenth National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Vol. 1)*. Chongqing, China, 2007: 100-113. (in Chinese)
12. Xue-zhu L., Guo-xing C. 2007. The research progress on the dynamic characteristic of roadbed soil under traffic loading. *Proceeding of the Tenth National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Vol. 3)*. Chongqing, China, 2007: 656-663. (in Chinese)
13. Yunmin C., Xuecheng B. 2006. Vibration and settlements generated by high-speed traffics. *Proceeding of the Seventh National Conference on Soil Dynamics, Beijing, China, 2006*: 3-13. (in Chinese)
14. Zhan-yuan Z., Xian-zhang L., Qing-li H. et al. 2009. Experimental research of vibration excited subsidence of frozen soil under long-term dynamic loads. *Rock and Soil Mechanics* 30(4): 955-959. (in Chinese)
15. Shu-ping Z., Wei M., Gui-de J. et al. The impact of different confining way during thaw-freeze cycles on the mechanical characteristic of frozen soil. *Journal of CUMT Mining Science and Technology* 2011, in press. (in Chinese)

**Session 2**  
**Thermal and Mechanical Interaction between Engineering  
Structures and Frozen Ground**

**Секция 2**  
**Тепловое и механическое взаимодействие мерзлых грунтов  
и инженерных сооружений в криолитозоне**





## On the issue of permafrost control for engineering structures

S.A. Velikin, A.V. Malyshev, V.V. Neklyudov, A.A. Panichev

Vilyui Permafrost Research Station, Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
VNIMS St. 1, Chernyshevsky, Russia 678185, e-mail: frozen@mirny.sakha.ru

**Abstract.** Approaches to the establishment of permafrost control systems for large engineering structures are proposed in application to a mine shaft as an example. Elements of the permafrost monitoring system are described. A description of the operating system of permafrost control based on the temperature field is given. Components of direct and feedback coupling in the system are defined. A special feature of this approach is the use of the technology of three-dimensional isothermal surfaces of the subsurface temperature field as a separate or auxiliary tool. Dynamic characteristics of the isothermal surfaces of the three-dimensional temperature field are suggested to be constructed in order to determine the thermal regime in foundation materials. The importance of permafrost monitoring covering adjacent areas from the design stage through the service life of the structure is emphasized. Thermophysical monitoring tools are proposed which have been developed in compliance with the Russian building code RSN-67-87, *Engineering Survey for Construction. Prediction of Permafrost Temperature Changes by Numerical Methods* (1988).

**Keywords:** permafrost conditions; temperature field; temperature control system; data loggers; isothermal surface.

## К вопросу о системе управления мерзлотной обстановкой на инженерных объектах в криолитозоне

С. А. Великин, А. В. Малышев, В. В. Неклюдов, А. А. Паничев

ВНИМС ИМЗ им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, пос. Чернышевский, ул. ВНИМС, д. 1, ВНИМС ИМЗ СО РАН, e-mail: frozen@mirny.sakha.ru

**Аннотация.** На примере одного из шахтных сооружений предлагаются подходы к построению систем управления мерзлотной обстановки на крупных инженерных объектах в криолитозоне. Описываются составляющие мониторинга мерзлотной обстановки на инженерном объекте. Приводится описание действующей системы (макета) управления мерзлотной обстановки на инженерном объекте на основе температурного поля. Определены компоненты прямой и обратной связи этой системы. Отличительной чертой предлагаемого подхода, является использование технологии трехмерных изометрических поверхностей температурного поля фундамента объекта в качестве отдельного, или дополнительного инструмента. Предлагается строить динамические характеристики изометрических поверхностей объемного температурного поля инженерного объекта с целью выявления особенностей теплового режима объекта. Отмечается необходимость учета инженерно-геокриологического окружения инженерного сооружения со стадии его проектирования и до окончания жизненного цикла предприятия. В области теплофизического мониторинга мерзлотной обстановки инженерного сооружения предлагаются инструменты, разработанные с учетом требований РСН-67-87 Госстроя РСФСР от 1988 г.

**Ключевые слова:** мерзлотная обстановка; температурное поле; система термоконтроля; логгеры; изометрическая поверхность.

## К вопросу о системе управления мерзлотной обстановкой на инженерных объектах в криолитозоне

С. А. Великин, А. В. Малышев, В. В. Неклюдов, А. А. Паничев

### Введение

Еще на второй отечественной геокриологической конференции 2001 г. в декларации основных и актуальных проблем отечественной геокриологии выделены: «Управление мерзлотной обстановкой на производственных площадях» и «Разработка специализированных геофизических методов оценки состояния оснований фундаментов инженерных сооружений в криолитозоне» [1]. Таким образом, необходимость разработки систем управления мерзлотной обстановкой крупных инженерных сооружений в криолитозоне осознана ведущими специалистами-геокриологами РФ достаточно давно.

В качестве примера можно привести во многом экстремальные условия эксплуатации рудников в криолитозоне, настоятельно требующие нестандартных решений, эффективных с точки зрения безопасной эксплуатации объекта. Самой распространенной ситуацией при эксплуатации инженерных сооружений в криолитозоне является техногенное растепление грунтов оснований фундамента, что требует незамедлительных мер по восстановлению их несущей способности.

В статье приводится иллюстративный пример управления мерзлотной обстановкой на уникальных в инженерном смысле рудниках «Мир» и «Интернациональный» на основе температурных данных.

### Составляющие мониторинга мерзлотной обстановки на инженерном объекте

Возведение масштабных сооружений на льдистых грунтах дающих осадку порождает сложнейший комплекс проблем, связанных с безопасностью их эксплуатации. Можно выделить три основных компоненты общей системы управления мерзлотной обстановкой на таких объектах: 1 - система термоконтроля, 2 - система замораживания грунтов фундамента и 3 - система управления и мониторинга мерзлотной обстановки. При этом каждая из подсистем имеет свою надстройку управления.

Задачей *системы термоконтроля* (термометрической системы) является контроль температурного состояния грунтов свайного поля. Задачей *замораживающей системы*

является поддержание с помощью системы замораживающих колонок определенной температуры грунтов, необходимой для поддержания несущей способности грунтов фундамента на уровне расчетных параметров. Задачей *системы управления мерзлотной обстановкой* является согласование работы всех подсистем с целью поддержания оптимального по заданным критериям режима несущих способностей грунтов основания инженерного сооружения, особенно в присутствии негативных инженерно-геокриологических процессов типа заводнения фундамента грунтовыми водами, техногенного засоления, и т.п.

### Система термоконтроля

При непосредственном участии ИМЗ СО РАН, к настоящему времени на руднике «Мир» внедрена новая цифровая термометрическая система. Цифровая система термоконтроля позволяет регистрировать температурное поле с частотой, необходимой в текущих инженерно-геокриологических условиях. Опыт ИМЗСО РАН по проведению исследований по мерзлотному контролю подобных объектов показал, что развивающиеся в окрестности инженерного объекта т.н. негативные инженерно-геологические процессы протекают скрытно в латентной фазе, что не всегда или не в должной мере учитывается проектными организациями. Когда, по истечении времени порядка от трех лет, такие процессы начинают фиксироваться системой КИА инженерного объекта, последние уже находятся в зрелой фазе своего развития (зачастую катастрофической), имеют развитую сеть точечных «таликов», погасить которую весьма трудно или дорого. Здесь также необходимы специальные исследования еще на стадии изысканий, причем не только на проектной площади, но и в ее инженерно-геокриологическом окружении, где ведущими методами мониторинга являются геофизические методы.

### Температурный мониторинг

1) Для мониторинга и управления мерзлотной обстановкой необходимо знание распределения температур во всем объеме фундамента, а не только на скважинах тер-

мометрической сети. И прежде всего, для контроля несущей способности сваи требуется знание распределения температур вдоль каждой сваи свайного поля фундамента. Далее по тексту целесообразно различать температурный и теплофизический мониторинги. В ряде случаев применение температурного подхода может оказаться экономически или организационно даже более выгодным, чем относительно трудоемкая работа с пакетами теплофизического моделирования.

Вариант управления мерзлотной обстановкой на рудниках на основе температурных данных реализован в разработанном ВНИМС ИМЗ программном комплексе «Термик» (рис. 1, б) с привлечением построений трехмерных изометрических поверхностей текущего температурного поля фундамента (рис. 2-5). Для корректного прогноза (с учетом теплофизических свойств реальных грунтов) изменения температурного состояния грунтов фундамента можно использовать программу «ТермоStab

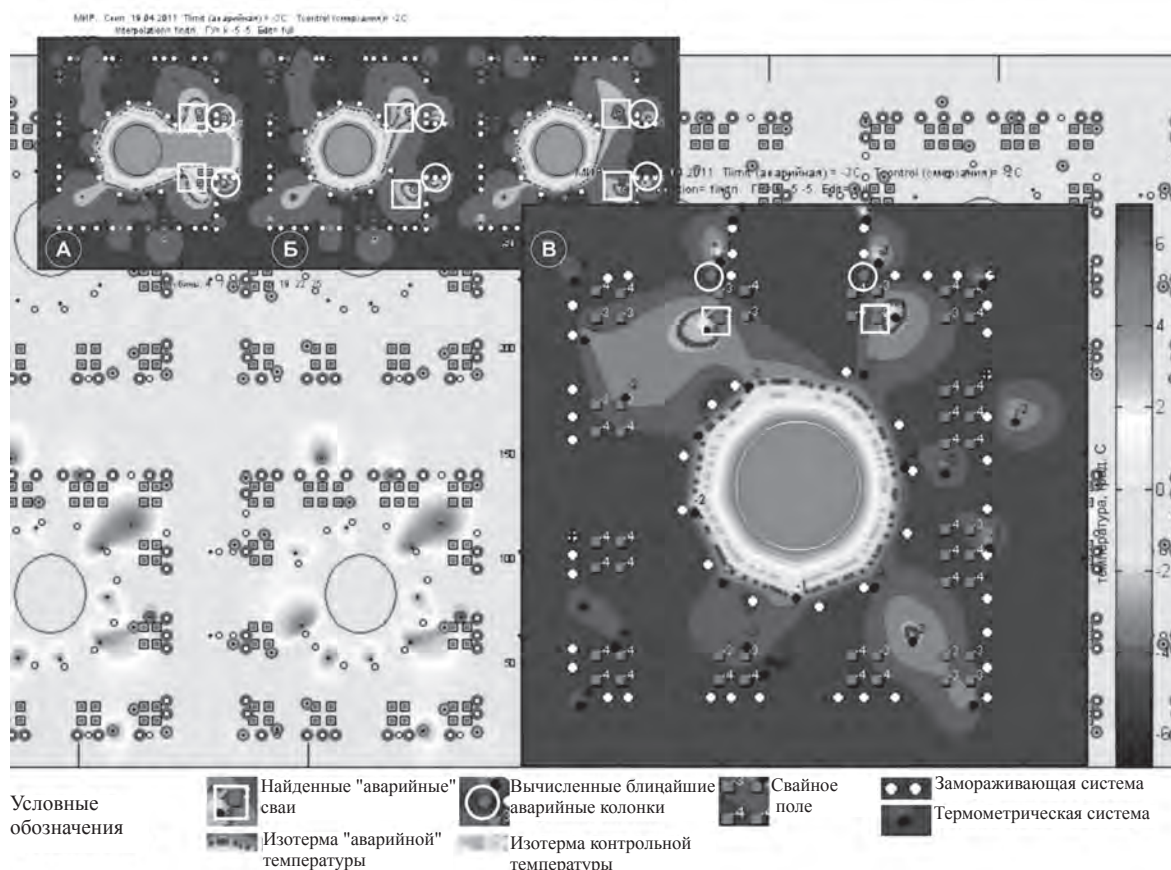


Рис. 1 Результаты определения растепленных свай с указанием ближайших замораживающих колонок скипового ствола рудника «Мир». Объяснения в тексте.

- 1) А, Б - поглубинные температурные срезы, В - эквивалентные температуры. А-глубина венканала, Б,В- под вентканалом (15-30 м);
- 2) На заднем плане – темпы температурного поля поглубинно.

67-87» (рис. 7, подробности там же).

2) Для оперативной текущей оценки объемного температурного состояния грунтов фундамента, требуемого для мониторинга мерзлотного состояния грунтов оснований, использовался программный комплекс «Термик», который умеет работать с цифровой системой термоконтроля температурных данных, строит ряд характеристик температурного поля, необходимых для оценки

мерзлотного состояния грунтов оснований и выдает рекомендации по переключению замораживающих колонок. Само температурное поле может быть легко пересчитано в несущие способности грунтов на основе существующих нормативных документов.

Первая и главная задача комплекса «Термик» - оповещение системы геокриологической безопасности предприятия о наличии или непредвиденном возникновении расте



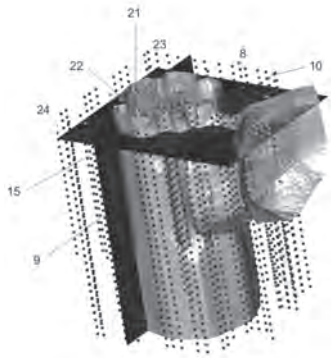


Рис. 2. Термометрическая система и нулевая изотермическая поверхность скипового ствола «Мир». Скиповый ствол и вентканал – внутри нулевой изотермической поверхности и заданы внешней и внутренней температурами.

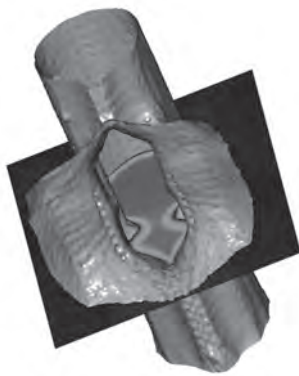


Рис. 3. Нулевая изотермическая поверхность со стороны вентканала и горизонтальное сечение температурного поля без отображения подземных конструкций.

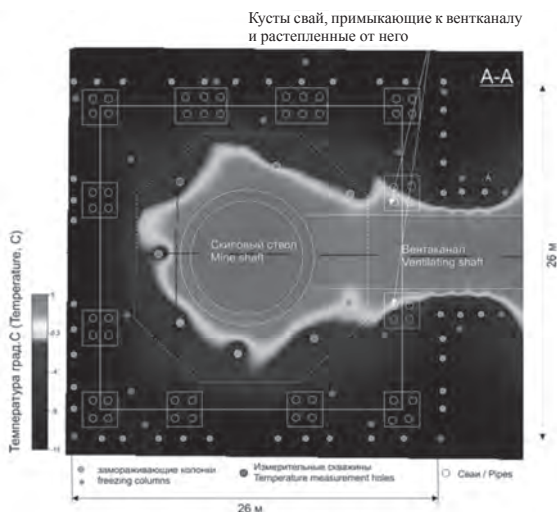


Рис. 4. Горизонтальное сечение температурного поля скипового ствола «Мир» по рис. 2 с элементами чертежа. Показано: свайное поле (белым), термометрическая (розовым) и замораживающая (голубым) системы.

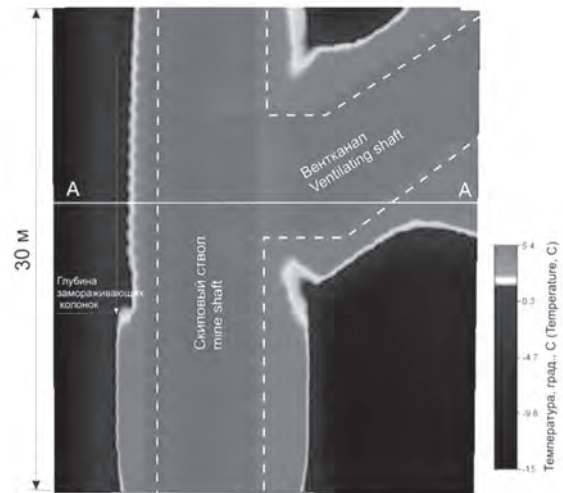
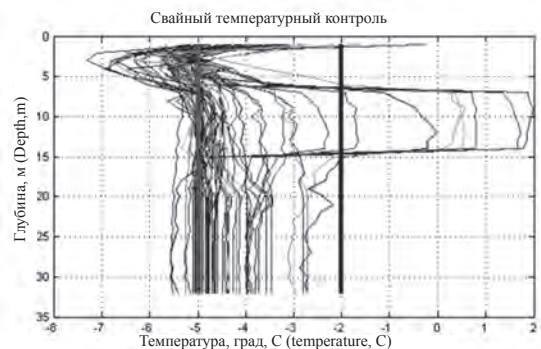
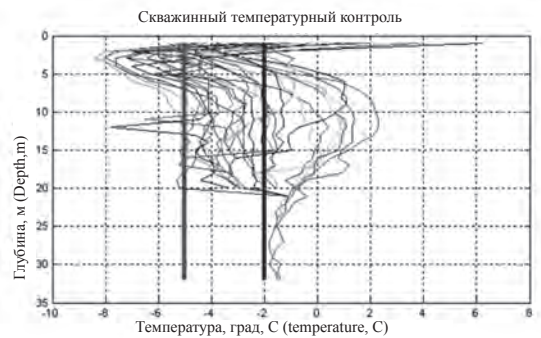


Рис. 5. Вертикальное сечение температурного поля скипового ствола «Мир» с вентиляционным каналом по рис. 2.



Примечание: Синим - температура смерзания свай  
Красным - "аварийная" температура растепления

Рис. 6. Простейшие индикаторы температурного скважинного и свайного контроля (настройка индикаторов отлична от результатов рис. 1).



пленных участков свайного поля. На контрольных индикаторах, приведенных на рис. 6 было использовано два предельных значения: контрольное – температура смерзания свай (синим цветом) и «аварийная» - температура фазовых переходов в грунтах основания в присутствии засоления (красным). Конечно, возможны и другие, более сложные и гибкие индикаторы. Вторая не менее важная задача - координация системы термоконтроля и системы замораживания грунтов фундамента рудника, т.е. фактически управление мерзлотной обстановкой на свайном поле рудника по температурным данным. Эта задача решается по следующей схеме: по данным термометрии строится трехмерное температурное поле и автоматически определяется наличие растепленных участков свайного поля (координаты растепленных свай и глубины растепления), а также автоматически определяются ближайшие к этим растепленным сваям замораживающие колонки для их активации (включения или дальнейшего увеличения мощности – этих колонок). Для этого программа выдает величину превышения температуры растепленного участка над предельной («аварийной») температурой на вход замораживающей системы для его компенсации через соответствующее увеличение мощности замораживающей колонки или увеличение времени замораживания (в случае постоянной мощности колонок) для восстановления несущих способностей растепленной сваи. Перечисленные параметры являются выходными величинами программного комплекса «Термик» и оформляются в виде практических рекомендаций по переключению колонок.

Целесообразно отметить, что комплекс «Термик» работает на истории температурных данных, что позволяет совместно анализировать текущее и предшествующие трехмерные состояния грунтов фундамента, строить характеристики, связанные с годовым теплооборотом в объеме грунтов фундамента, накопление и потери холода грунтами фундамента и т.п.

3) На рис. 1 приведены поглубинные температурные срезы и эквивалентные температуры (для экономии места приведена только часть материала), на которых в автоматическом режиме выделены сваи с наличием участков растепления. Одновременно, также в автоматическом режиме определены ближайшие замораживающие колонки для изменения их режима в сторону восстановления несущих способностей найденных растепленных свай. Как непосредственно видно из рис. 1,4, растепленные сваи примыкают к вентиляционному

каналу, что позволяет локализовать причину их растепления.

Наконец, обратная связь по температурному состоянию грунтов оснований фундамента в системе мониторинга мерзлотной обстановкой реализуется через выдачу комплексом «Термик» оператору замораживающей станции т.н. Рекомендаций по переключению замораживающих колонок. В Рекомендациях указаны номера растепленных свай, ближайшие к ним замораживающие колонки, величины «аварийного» превышения температур растепленных свай, а также материалы с необходимыми характеристиками температурного состояния грунтов фундамента (темпы изменения температур, при наличии лабораторных данных – данные по скорости промерзания грунтов фундамента, пучинности и т.д.). Прямая связь в такой системе управления осуществляется системой термоконтроля приведены поверхности нулевой температуры скипового ствола рудника «Мир». При этом можно легко строить в режиме реального времени изометрические поверхности в диапазоне температур фазовых переходов и т.п. Показаны также некоторые сечения температурного поля фундамента (рис. 4, 5), где отрицательные температуры закрашены градациями синего цвета, положительные – от зеленого, через желтый – до красного. Нулевая «изотермия» отображается серым цветом.

Как и на рис. 1, на рис. 4 в тех же местах отмечается тепловое влияние вентиляционного канала на примыкающие участки свайных кусты (отмечено стрелками).

Кроме того, были построены разностные характеристики температурных объемов аналогично рис. 2-3 (не приводятся), и которые полезны при «объемной» оценке темпов изменения трехмерного температурного поля и локализации в этом объеме областей с аномальными темпами.

### **Изометрические поверхности**

Трехмерный анализ температурного состояния фундаментов с помощью изометрических поверхностей и произвольных срезов можно рассматривать как дополнительную возможность мониторинга мерзлотной обстановки в грунтах оснований. Примеры изометрических поверхностей, или поверхностей равных температур представлены на рис. 2, 3, где приведены поверхности нулевой температуры скипового ствола рудника «Мир». При этом можно легко строить в режиме реального времени изометрические поверхности в диапазоне температур фазовых переходов

и т.п. Показаны также некоторые сечения температурного поля фундамента (рис. 4, 5), где отрицательные температуры закрашены градициями синего цвета, положительные – от зеленого, через желтый – до красного. Нулевая «изотермия» отображается серым цветом.

Как и на рис. 1, на рис. 4 в тех же местах отмечается тепловое влияние вентиляционного канала на примыкающие участки свайных кусты (отмечено стрелками).

Кроме того, были построены разностные характеристики температурных объемов аналогично рис. 2, 3 (не приводятся), и которые полезны при «объемной» оценке темпов изменения трехмерного температурного поля и локализации в этом объеме областей с аномальными темпами.

### Прогноз изменений температурного состояния грунтов оснований

Для прогноза возможных изменений состояния проводилось моделирование при помощи программы «TermoStab 67-87» (ОАО «ВНИПИГаздобыча»), реализующей метод конечных разностей. Программой осуществляет моделирование (прогноз) изменений температурного состояния объекта с учетом реальных петрофизических характеристик грунтов и материалов оснований и фундаментов, характеристик замораживающих колонок, климатических условий и режима вентиляции.

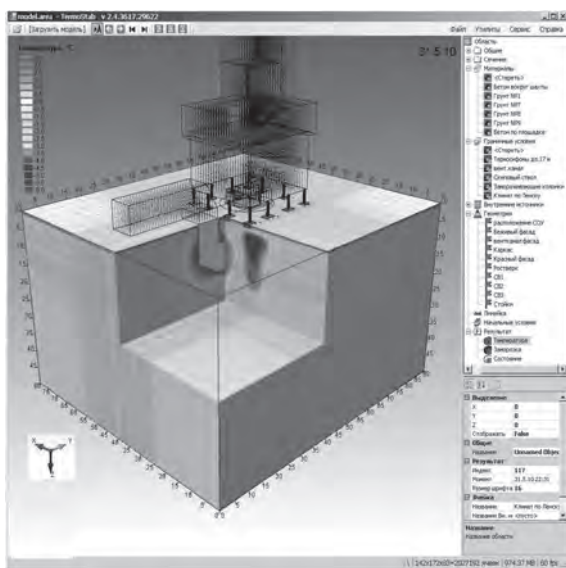


Рис. 7. Прогнозное температурное состояние скипового ствола рудника «Мир» по данным ОАО «ВНИПИГаздобыча». Кроме температурного состояния, отображаются фазовые состояния участков грунтов фундамента.

Программа реализует конечно-разностную аппроксимацию нестационарного дифференциального уравнения теплопроводности с источниками для неоднородной среды с заданием граничных и начальных условий различных типов. При этом имеется встроенный СНИП-калькулятор для работы с реальными теплофизическими константами реальных грунтов, утвержденных нормативными документами, а также реализует известные функции типа расчет количества незамерзшей воды и т.п.

### Заключение

Известно, что на сегодня нет аналогов условиям эксплуатации крупнейших рудников мира в криолитозоне, а значит, нет и стандартных подходов к обеспечению их безопасной эксплуатации. Инженерно-геокриологические условия эксплуатации фундаментов рудников весьма сложны и требуют постоянного контроля. Ввод в эксплуатацию новой цифровой системы термоконтроля ВНИМС ИМЗ СО РАН на руднике «Мир» может служить примером адекватного подхода, поскольку при этом для анализа предоставляются новые режимы термоконтроля. Другим примером может служить использование изложенных подходов к мониторингу мерзлотной обстановки. В рамках уже работающей системы управления мерзлотной обстановкой на основе температурных данных путем ведения в программный комплекс теплофизических расчетов на основе построенных трехмерных температурных характеристик можно получить желательные элементы теплофизического мониторинга.

Инженерно-геокриологические сложности эксплуатации фундаментов рудников в нестандартных условиях криолитозоны также требуют разработки новых инструментов мониторинга мерзлотной обстановки открытой архитектуры, которые позволяют наращивать постоянно обновляемый арсенал инженерных и научно-методических инноваций.

### Список литературы

Гарагуля, Л. С. и др., Вторая конференция геокриологов России // Криосфера Земли. – 2002. – № 1, том VI. – С. 30–34.

### References

1. Garagulya, L.S. et al. 2002. The Second Conference of Russian Geocryologists. *Kriosfera Zemli* 1(VI): 30-34.

## Experience of geotechnical design for coal handling and preparation plant in seismic permafrost zone

V.P. Petrukhin<sup>1</sup>, O.A. Shulyatiev<sup>1</sup>, G.I. Bondarenko<sup>1</sup>, S.G. Bezvolev<sup>1</sup>, O.A. Mozgacheva<sup>1</sup>,  
Y.Y. Samo-letov<sup>2</sup>, E.V. Beletsky<sup>2</sup>, G.B. Romashko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gersevanov Research Institute of Foundations and Underground Structures (NIIOSP)  
Moscow, Russia, e-mail: niiosp@niiosp.ru  
<sup>2</sup>ООО Mechel-Engineering, Moscow, Russia

**Abstract.** The paper describes the geotechnical design process for earthworks, soil bases and foundations under the guidance of newly updated SNIP 2.02.04. «Elga coal handling and preparation plant» is located in the permafrost seismic zone (MSK-64 intensity degree of 8). A brief description of the plant buildings and structures, as well as site geotechnical conditions are provided. Stages of design process are described. Authors provide methodology and results for evaluation of thermal and ground water conditions, permafrost-hydrogeological modeling, analysis of stability of natural slopes and slopes of the artificial terraces, as well as foundations and basements. Several typical constructions of foundation are shown.

**Keywords:** permafrost, seismic zone, permafrost-hydrogeological modeling, foundation design, slope stability, SNIP actualization.

## Опыт проектирования ГОК в условиях сейсмодрилитозоны

В. П. Петрухин<sup>1</sup>, О. А. Шулятьев<sup>1</sup>, Г. И. Бондаренко<sup>1</sup>, С. Г. Безволев<sup>1</sup>, О. А. Мозгачева<sup>1</sup>,  
Ю. Ю. Самолетов<sup>2</sup>, Э. В. Белецкий<sup>2</sup>, Г. Б. Ромашко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Россия, Москва, НИИОСП им. Н. М. Герсевича, e-mail: niiosp@niiosp.ru;  
<sup>2</sup>Россия, Москва, ООО «Мечел-Инжиниринг», yuri.samoletov@mechel.com

**Аннотация.** В докладе представлен опыт проектирования с учетом требований актуализированного СНиП 2.02.04 инженерной подготовки, оснований и фундаментов Эльгинского горно-обогатительного комплекса (ГОК), расположенного в районе распространения вечномерзлых (многолетнемерзлых – ММГ) грунтов с сейсмичностью 8 баллов. Дана краткая характеристика комплекса зданий и сооружений ГОК, а также геотехнических условий площадки строительства. Описаны этапы проектирования. Представлена методика и приведены результаты расчетов по оценке изменения теплового и водного режимов территории, мерзлотно-гидрогеологического моделирования, устойчивости естественных склонов и откосов террас, а также основания и фундаментов. Приведены характерные примеры разработанных конструкций фундаментов.

**Ключевые слова:** вечномерзлый грунт; сейсмическая зона; мерзлотно-гидрогеологическое моделирование; конструкция фундамента; устойчивость откосов; актуализация СНиП.

## Опыт проектирования ГОК в условиях сейсмокриолитозоны

В. П. Петрухин, О. А. Шулятьев, Г. И. Бондаренко, С. Г. Безволев, О. А. Мозгачева,  
Ю. Ю. Самолетов, Э. В. Белецкий, Г. Б. Ромашко

### Введение

Наблюдаемый в последнее десятилетие прогрессирующий рост числа деформируемых зданий на уже освоенных территориях распространения ММГ является следствием техногенного и антропогенного изменения теплового и водного режимов грунта под застройкой. Эти изменения приводят к повышению температуры, обводнению и засолению грунтов основания сооружений. В результате первоначально стабильные, твердомерзлые грунты переходят в категорию пластичномерзлых или структурно-неустойчивых и надежность их, как оснований, снижается.

Для учета этих явлений при проектировании жилых микрорайонов или комплексов сооружений промышленного назначения в СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [1], для которого в настоящее время проводится актуализация, введены указания о необходимости при разработке проекта застройки территории определять изменение теплового режима ММГ, гидрогеологических условий, степень активизации опасных геокриологических процессов (осадка, пучение, термокарст, солифлюкция, эрозия и др.), возможность возникновения других склоновых процессов и заболачивания территории всего района строительства.

В настоящей статье описан опыт проектирования с учетом требований актуализированного СНиП 2.02.04 инженерной подготовки, оснований и фундаментов Эльгинского горнообогатительного комплекса (ГОК), расположенного в районе распространения ММГ с сейсмичностью 8 баллов. Эльгинское угольное месторождение – крупнейшее в России месторождение жирных коксующихся углей с общими запасами около 2,2 млрд. т, расположено на юго-востоке Республики Саха (Якутия), в 415 км восточнее г.Нерюнгри и в 300 км от трассы БАМ. Эльгинский ГОК должен войти в пятерку крупнейших компаний мира по производству концентрата коксующегося угля и занять ведущие позиции на рынке сырья для металлургии Азиатско-Тихоокеанского региона. Главные преимущества проекта – огромные запасы и открытый способ разработки.

ГОК (рис. 1) представляет собой комплекс взаимосвязанных в технологическом цикле более 160 зданий и сооружений раз-

личного назначения, среди которых можно выделить сушильно-топочное отделение, блоки приемных ям и углеподготовки, бункеры золы и шлака, конвейерных галерей, склады рядовых углей и готовой продукции, заводы, очистные сооружения и резервуары, хранилища ГСМ и сооружения электроснабжения.

### Геотехнические условия площадки строительства

Площадка Эльгинского угольного комплекса расположена на юго-восточной окраине Алданского нагорья, в пределах Токинской впадины, являющейся составной частью Южно-якутского каменноугольного бассейна. Токинская впадина ограничена с юга – Становым, а с севера Учуро-Идюмским хребтами. Непосредственными границами Эльгинского месторождения являются: восточной – р. Уки-киткан, южной – крупно амплитудное нарушение северо-западного простирания, западной – р. Ундыткан, северной – условная линия, соединяющая р. Ундыткан с р. Эльга в среднем их течении. В географическом отношении район работ характеризуется среднегорным сильно расчлененным рельефом. Водоразделы основных рек площади вытянуты в субширотном направлении. Склоны долин крутые.

Климат района суровый, резко континентальный с коротким летом и продолжительной зимой, колебания температур от +30 в июле, до -59°C в январе, при среднегодовой – 11,4.

Количество осадков в отдельные годы может сильно отличаться и составлять от 200 до 560 мм. В связи с тем, что в районе резко выраженный антициклональный режим погоды, зима сухая и малоснежная.

Район Эльгинского месторождения в геокриологическом отношении находится в зоне развития вечномерзлых пород. По характеру распространения многолетняя мерзлота имеет практически сплошное развитие. Сезонное протаивание грунта в зависимости от экспозиции склонов, наличия моховой растительности составляет 0,5-1,0 м на северных склонах и до 2-3,0 м на южных склонах. На участках развития ледниковых отложений местность, как правило, заболочена. Наибольшая глубина оттаивания на площадке по расчетным данным 3,0 м в крупнообломочных грунтах, 2,7 м – в песчаных грунтах.



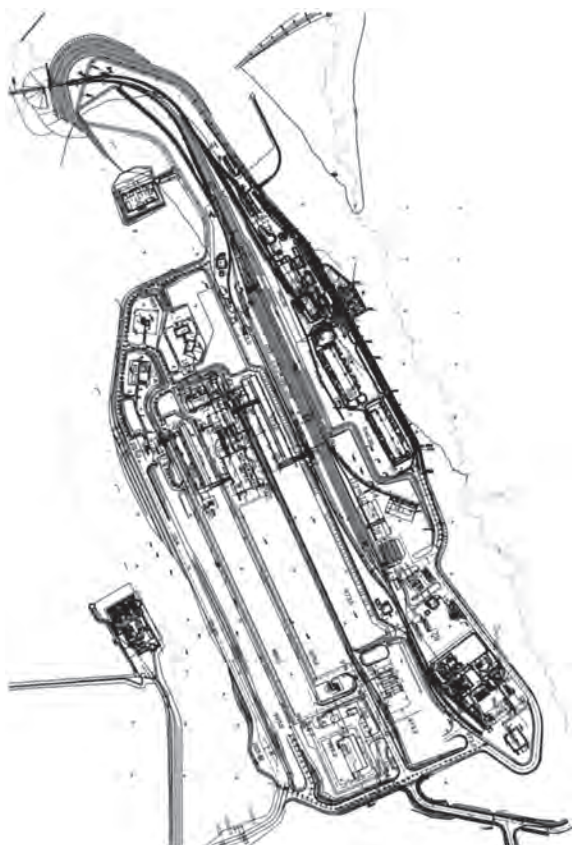


Рис. 1. Схема расположения объектов ГОК.

В зоне распространения многолетнемерзлых грунтов развиты следующие виды подземных вод.

*Надмерзлотные воды.* В теплый период в аллювиально-делювиальных отложениях возможно формирование надмерзлотных вод типа «верховодки». Водоупором служит верхняя граница ММГ. Питание осуществляется за счет атмосферных осадков и таяния мерзлоты. Обладают непостоянным дебитом. Эти воды слабо минерализованы. Зимой они полностью промерзают, образуя на поверхности наледные бугры.

Межмерзлотные и подмерзлотные воды представлены порово-пластовыми, трещинными и трещинно-пластовыми водами.

Среди опасных физико-геологических процессов на данной площадке имеют место процессы и явления связанные, прежде всего, со сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов, это мерзлотно-суффозионный тип рельефа связанный с рыхлением при замерзании грунтов в деятельном слое и вымывании их в весенне-летний период. Поверхность площадки изрезана промоинами и имеет холмисто-западинный рельеф, связанный с неравномерным пучени-

ем грунтов. Из неблагоприятных геокриологических процессов и явлений, отрицательно влияющих на строительство и эксплуатацию зданий и сооружений, необходимо отметить следующие: пучение, термокарст, термоэрозия, солифлюкция, наледообразование и наличие сильнольдистых отложений. Невыдержанность инженерно-геологического разреза, как по мощности, так и по простиранию, высокая сейсмичность 8 баллов все это усложняет проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений.

#### **Методика проектирования объектов нулевого цикла**

Особенности проектирования обусловлены тем, что в сложных мерзлотно-климатических условиях и высокой сейсмике, на крутых естественных склонах размещается уникальный ГОК. При этом необходимо рассмотреть комплекс различных и одновременно взаимосвязанных вопросов: выбор принципа строительства, корректировка генерального плана, уточнение расположения площадок строительства, типы оснований, обеспечение устойчивости склонов и сооружений на них с учетом сейсмических нагрузок, инженерная подготовка территории, прогноз теплового и водного режима на период строительства, эксплуатации и ликвидации объекта.

Работы выполнялись по техзаданию ООО «Мечел-Инжиниринг», разработанного по итогам тендера, предоставившего право проектирования нулевого цикла НИИОСПу.

При решении геотехнических вопросов использовался накопленный НИИОСПом опыт участия в проектировании сооружений и обеспечения их устойчивости в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (Южно-Якутский и Канско-Ачинский угольные комплексы, ГОК «Апатиты», Норильский ГОК, БАМ, Сангарская миниТЭЦ и др.), а также научные исследования и разработки НИИОСП, позволившие актуализировать СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [1].

Учитывая, что территория ГОК расположена в зоне распространения высокотемпературных ММГ и основанием фундаментов основных зданий будут служить скальные породы, в качестве основного был выбран принцип II использования многолетнемерзлых грунтов с допущением оттаивания в процессе строительства и эксплуатации.

Проектирование ГОК проводилось в несколько этапов. На начальном этапе, одновременно с созданием генерального плана и системы коммуникаций, разрабатывались

мероприятия по инженерной подготовке территории, а именно мероприятия по устойчивости откосов террас и по защите территории от подтопления. Далее - разрабатывались проекты основания и фундаментов основных и вспомогательных сооружений ГОК.

Первоначально выполнялись расчеты устойчивости склонов в естественном состоянии для основного и особого (сейсмика) сочетания усилий. Кроме того, на данном этапе вычислений были выполнены отдельные расчеты коэффициентов устойчивости природных склонов с учетом сезонного оттаивания слоя дисперсных мерзлых грунтов [2].

В результате анализа результатов вычислений можно отметить, что большинство склонов, расположенных на территории строительства Эльгинского ГОК, устойчивы в природном состоянии (до проведения строительства) при основном и особом сочетании усилий.

Некоторое исключение составляет наиболее крутой склон, расположенный с юго-западной стороны территории строительства, который в верхней своей части в условиях сезонного оттаивания мерзлых дисперсных грунтов не обладает надлежащим запасом устойчивости. Ввиду того, что на данном участке склона проектом строительства ГОК предусматривается планировка территории и устройство террас путем выемки всего дисперсного мерзлого грунта, данная проблема незначительна и не повлияет на конструктивную надежность проектируемых сооружений Эльгинского ГОК.

В результате проведения расчетов выяснилось, что при схеме устройства насыпей, когда в основании остаются относительно слабые грунты (как правило, дресвяные суглинки), устойчивость насыпей не обеспечивается. Значения коэффициентов устойчивости откосов насыпей составляет  $K_{st}=0.89 \dots 1.00$ .

Таким образом, возможным решением устройства насыпей остается проведение планировки территории таким образом, чтобы в основании насыпей в зоне откосов остались скальные или полускальные грунты (преимущественно песчаники).

В природном состоянии откосы песчаника устойчивы. Однако, если при устройстве выемок на откосах будут выходы слоев более слабых пород (алевролиты, уголь и сажистая пыль), то в процессе строительства и эксплуатации в результате сезонного промерзания и оттаивания возможно осыпание, обвалы и вывалы пород. В качестве удерживающих сооружений рекомендуются облицовочные стены (для предохранения грунтов от вы-

ветривания и осыпания), пломбы (заделка пустот, образовавшихся в результате вывала), поддерживающие стены, контрфорсы, анкерные крепления, а также улавливающие сооружения и устройства (стены, надолбы, траншеи и т.д.), улавливающие сетки.

Опыт строительства и эксплуатации горно-обогатительных комбинатов, использующих в производственном процессе большое количество технической воды, даже в условиях распространения ММГ, показывает, что, как правило, их территория бывает обводнена. Для исключения обводнения территории был разработан проект защиты территории от подтопления, заключающийся в устройстве постоянно действующей дренажной системы.

Для обоснованного назначения дренажной системы, рассчитанной на весь период эксплуатации ГОК, были выполнены расчеты по оценке изменения теплового и водного режимов территории.

Сложность расчета теплового режима под проектируемыми зданиями ГОК заключалась в том, что на площадке строительства были запланированы работы по ее вертикальной планировке. При этом на большей части территории четвертичные породы, представленные различными типами рыхлых образований, должны быть удалены и частично перемещены при формировании плоских террас на склоне. Соответственно после удаления этих пород обнажатся мезозойские породы Нюрингриканской свиты, представленные песчаниками и алевролитами, находящиеся в мерзлом состоянии. При этом перемещенные четвертичные породы будут представлять смесь гравийных, галечниковых и дресвяных (щебенистых) грунтов с супесчаным заполнителем.

Для обоснования дренажа были выполнены расчеты предельной глубины оттаивания и оттаивания за 50-летний период эксплуатации ГОК (рис. 2), мерзлотно-гидрогеологическое моделирование теплового поля под проектируемыми сооружениями, в том числе в зоне дренажа, вне сооружений (промерзание - оттаивание в контактной зоне и вне зоны влияния проектируемых сооружений), прогноз гидро-геологических условий территории ГОК, математическое моделирование пристенного дренажа (решение локальных задач), а также общая оценка изменения водного режима территории.

Как видно из графика рис. 2, в целом величина глубины оттаивания за 50 лет эксплуатации близка к значению ширины сооружения, а зависимость предельной глубины оттаивания от ширины проектируемого

сооружения носит линейный характер. Кроме этого в результате расчетов было установлено, что падение температуры в пределах сооружений на  $5^{\circ}\text{C}$  (при прочих равных условиях) довольно значительно (на 20-25%) снижает глубину предельного оттаивания, а наличие насыпных грунтов в качестве основания сооружений практически не влияет на глубину предельного оттаивания.

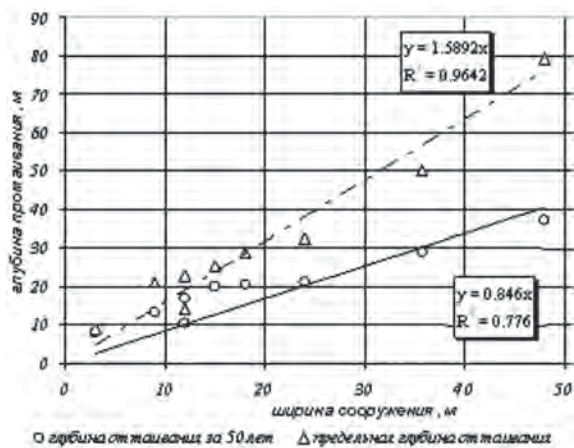


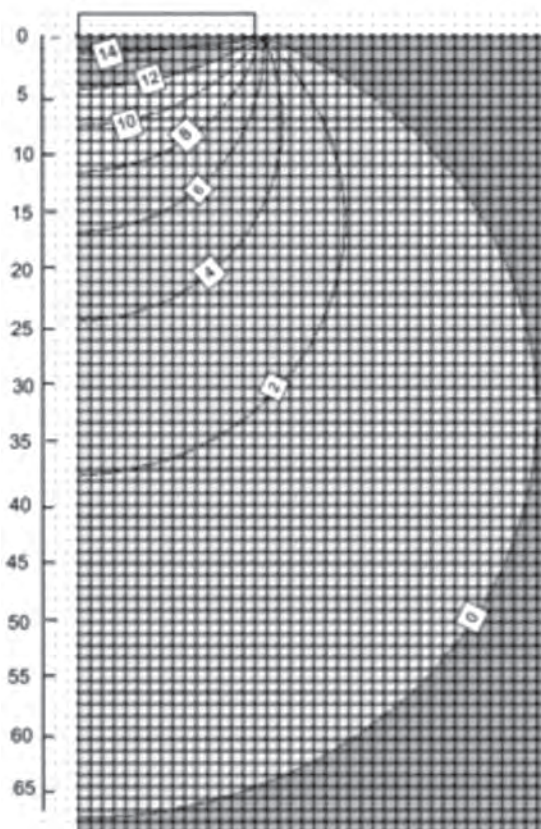
Рис. 2. Расчетные глубины оттаивания.

Мерзлотно-гидрогеологическое моделирование состояло в разработке ряда моделей теплопереноса и решении с их помощью задач промерзания - оттаивания под проектируемыми объектами строительства, в зоне предполагаемого дренажа и на различных морфологических элементах площади застройки. На рис. 3 представлен пример модельной картограммы распределения расчетных температур под сооружением.

При этом некоторые мерзлотно-гидрогеологические модели были использованы для решения гидрогеологических задач для оценки степени эффективности проектного дренажа.

Моделирование показало, что уже на третий год температурный режим становится квазистационарным, и явный тренд в изменении температуры отсутствует. Следует отметить, что наличие или отсутствие снега весьма существенно влияет на значения температуры в пределах зоны сезонных колебаний температур.

В результате моделирования водного режима территории было получено распределение напоров по профилю и положение депрессионной поверхности при условии работы дренажа. Уровень поверхности воды по результатам моделирования будет находиться на глубине 2 м от пола сооружения. В зоне уступов надмерзлотный водоносный комплекс будет практически сдренирован.



ширина сооружения - 30 м

Рис. 3. Расчетная картограмма распределения температуры под сооружением шириной 30 м.

Расчетные схемы дренажа определялись характером строения дренируемой толщи. Все расчеты дренажа проводились для схемы безнапорного потока, водоупором для которого служит верхняя граница мерзлых пород, а на участках с искусственным грунтом, которым будут отсыпаться террасы, - кровля коренных пород.

Для предотвращения подтопления территории были разработаны три типа дренажа.

1 – пристенный, устраиваемый по контуру зданий и сооружений для предотвращения подтопления фундаментов зданий; 2 – пластовый, устраиваемый внутри сооружений большой протяженности; 3 – линейный, устраиваемый вдоль основания склонов.

Глубина заложения пристенного дренажа определялась глубиной заложения фундамента и положением здания на рельефе, для учета возможности его сопряжения с общей системой отвода дренажных вод. Все дренажи проектировались самотечными.

### Типы и конструкции фундаментов

По указанным выше причинам для проектирования основания и фундаментов зданий и сооружений ГОК в качестве основного



был выбран II принцип использования этих грунтов. В связи с высокой сейсмической активностью района строительства типы и конструкции фундаментов разрабатывались в зависимости от глубины залегания кровли коренных юрских отложений, представленных трещиноватыми песчаниками от малопрочных, до прочных. Расчетные прочностные характеристики песчаников в природном залегании принимались в запас надежности как для расчетов сдвига вдоль трещин путем корректировки данных изыскателей о величинах нормативного расчетного сопротивления лабораторных образцов (целостных отдельных пород) на одноосное сжатие  $R_{сн}$  по специальной таблице СНиП [3]. Такой подход был апробирован НИИОСПом при проектировании фундаментов тяжело-нагруженных сооружений на трещиноватых известняках [4, 5].

Благодаря рациональному террасированию площадки ГОК более чем на 50 % ее площади песчаники оказались на планировочной поверхности, и еще на 20 % не более чем на 2 м глубже. При таком высоком залегании песчаников использовались располагаемые под колоннами мелкозаглубленные столбчатые фундаменты, опирающиеся на скальный грунт.

При более низком залегании песчаников мелкозаглубленные фундаменты в основном устраивались на уплотненных подсыпках из грунта II категории по сейсмическим свойствам (щебень, гравий, ПГС). При этом применялись столбчатые фундаменты, соединенные между собой надфундаментными балками (рис. 4), монолитные перекрестные ленты или сплошная фундаментная плита.

В исключительных случаях, при наличии ниже планировочной отметки значительной (свыше 6-8 м) толщи неоднородных сильносжимаемых четвертичных грунтов, рекомендовалось устройство свайных фундаментов, из опирающихся на подстилающий скальный массив свай-стоек.

В геотехнических условиях Эльгинского ГОК главным фактором, влияющим на проектирование конструкции мелкозаглубленного фундамента, явилось обеспечение его сейсмостойкости, исключающей сдвиг фундамента по подошве, и его опрокидывание. С этой целью выполнялся расчет прочности скального основания, либо устойчивости расположенной между подошвой фундамента и скальным массивом грунтовой толщи с учетом влияния сейсмических колебаний на напряженное состояние грунта.

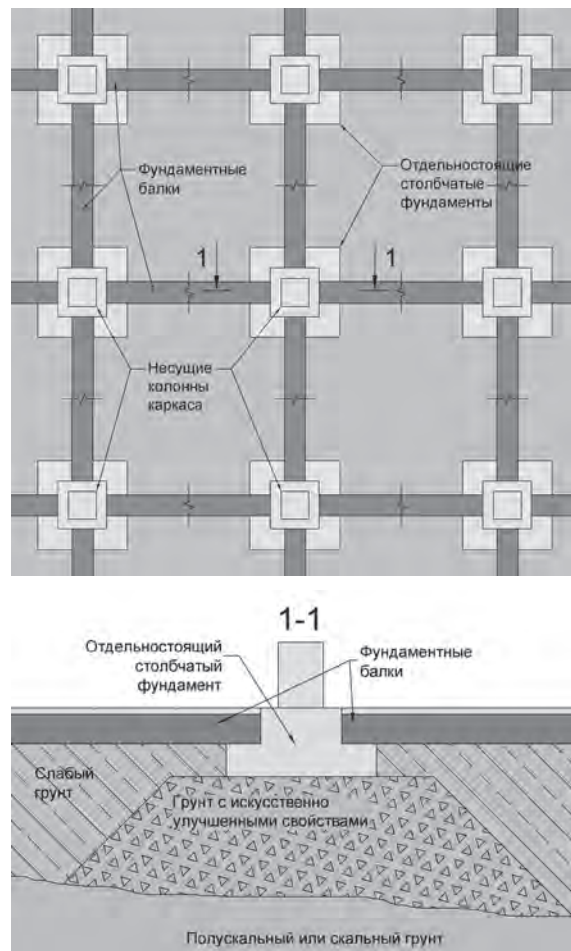


Рис. 4. Схема устройства мелкозаглубленных фундаментов на искусственных подсыпках.

Наибольшие трудности при проектировании встретились при разработке конструкций основания и фундаментов зданий складов рядовых углей и товарной продукции. Вследствие распорной конструкции несущего каркаса этих зданий на фундаменты передавались большие постоянные и длительнодействующие горизонтальные нагрузки, в том числе снеговые. Из-за значительных жесткости каркаса, инерционной массы и высокой сейсмичности (8 баллов) к указанным горизонтальным нагрузкам добавлялись существенные квазистатические сейсмические нагрузки.

По этой причине и с учетом высокого залегания песчаников в основании склада готовых углей под крайние опоры (наклонная стойка и вертикальный подкос!) несущей поперечной арочной рамы устраивались общие мелкозаглубленные фундаменты замоноличиваемые в скальный грунт (рис. 5).

Это решение позволяло полностью воспринять значительные горизонтальные и моментные нагрузки, в том числе за счет



уменьшения эксцентриситета равнодействующей вертикальной нагрузки и взаимогашения противоположно направленных горизонтальных сил. На ряде участков (у температурных швов верхнего строения, в местах примыкания к пристройкам и пр.) применялся фундамент в виде небольшой массивной плиты под опоры соседних рам.

Скальное основание склада товарной продукции располагалось на глубине от 3 до 6 м. Поэтому требовалась подсыпка, что не позволяло использовать эффект замоналичивания в скальный грунт. По этим причинам была разработана обладающая повышенной жесткостью и несущей способностью моно-

литная фундаментная плита, усиленная по контуру продольными ребрами (банкетками) под передающие распорные усилия краевые колонны, а также местные утолщения под группы колонн в наиболее нагруженных внутренних частях здания.

### Список литературы

1. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
2. Бондаренко, Г. И. Теоретические основы обеспечения устойчивости сооружений на склонах в районах вечной мерзлоты // Труды НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. – М., 2001. – С. 131-140.
3. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений.
4. Безволев, С. Г. Особенности расчетов оснований и фундаментов зданий и сооружений ММДЦ «Москва-Сити» / С. Г. Безволев, О. А. Шулятьев, И. А. Боков, С. О. Шулятьев // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2008. – № 12. – С. 223–249.
5. Петрухин, В. П. С опорой на толщу надежных известняков / В. П. Петрухин, О. А. Шулятьев, С. Г. Безволев, И. А. Боков // Высотные здания. – 2011. – № 1/11 (февраль/март 2011). – С. 104–113.

### References

1. SNiP 2.02.04-88. Soil mechanics and foundations in permafrost.
2. Bondarenko G.I. 2001. Theory of structures stability on slopes in permafrost regions. Proceedings of the NIIOSP: 131-140. (in Russian)
3. SNiP 2.02.02-85. Soil mechanics of hydraulic structure.
4. Bezvolev S.G., Shulyatev O.A., Bokov I.A., Shulyatev S.O. 2008. Design peculiarity of bases and foundations of buildings and structures in MIBC “Moscow-City”. Development of urban areas and geotechnical engineering 12: 223-249. (in Russian)
5. Petrukhin V.P., Shulyatev O.A. Bezvolev S.G., Bokov I.A. 2011. Basing upon the reliable limestone massif. Tall buildings 1/11 (February/March 2011): 104-113, 137-140.

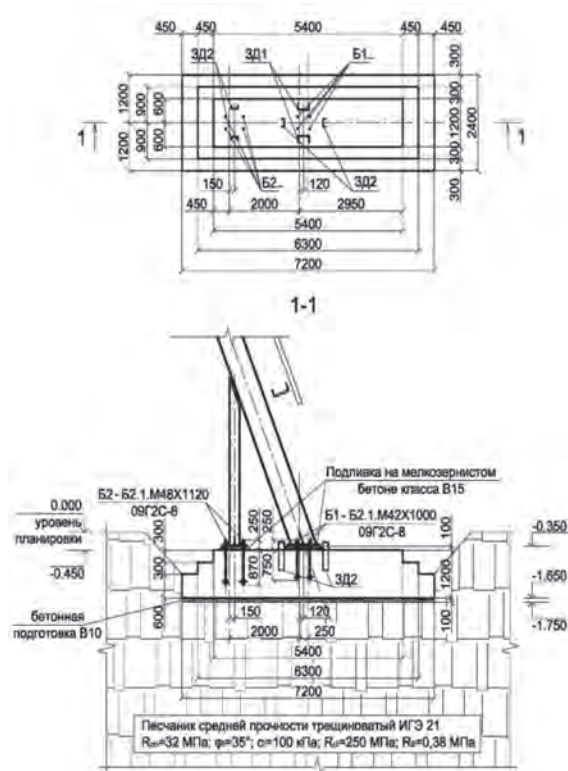


Рис. 5. Пример устройства мелкозаглубленного фундамента на скальном грунте.

# The thermal state of soils beneath the Tommot-Kerdem railway embankment in an ice-rich permafrost area

S.P. Varlamov, P.N. Skryabin, N.I. Shender

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

**Abstract.** The Tommot-Kerdem railway under construction in Yakutia, northeastern Russia, traverses ice-rich permafrost terrain between KM posts 692 and 734. This section contains abundant ice wedges and presents major difficulties for the construction and maintenance of embankments designed to maintain the foundation materials in a frozen state. A permafrost monitoring program was established to monitor ground temperatures, thaw depths and settlements after right-of-way clearing and embankment placement. Observations indicate that in the right-of-way along the embankment the depths of seasonal thaw are continuing to increase and the upper permafrost temperatures are still warming. In embankments placed in winter, the permafrost table is rapidly rising, with rates being higher in the higher embankment sections. Where the embankment is placed in the warm season with removal of the active layer, thaw bulbs are developing in the subsoil. Seepage of suprapermafrost water through the sand fill was noted at some locations which can have detrimental effects. For the embankments to be stable, temperatures of the fill and foundation materials should be cooled sufficiently to rise the permafrost table. Recommended means include snow removal from the embankment surface or its compaction and winter fill placement. Permafrost monitoring should be continued beyond the construction period in order to successfully detect permafrost-related changes in the thermal state of the embankment and the adjoining area.

**Keywords:** railway embankment; ice-rich permafrost; permafrost monitoring; seasonal thawing; ground temperature regime; cryogenic processes.

## О тепловом состоянии оснований насыпей железной дороги Томмот – Кердем на участке распространения пород ледового комплекса

С. П. Варламов, П. Н. Скрябин, Н. И. Шендер

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Строящаяся железнодорожная линия Томмот – Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок, который запроектирован по I принципу. Здесь организована наблюдательная сеть инженерно-геокриологического мониторинга, включающего наблюдения за динамикой просадки, температуры и глубины протаивания грунтов, начиная со времени вырубki просеки трассы и отсыпки насыпи. Наблюдения показывают, что на просеке трассы глубина сезонного протаивания продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов мерзлых пород повышаться. На насыпи, отсыпанной в холодный период, наблюдается поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основания формируется чаша протаивания. Геокриологические обследования выявили участки фильтрации надмерзлотных вод сезонноталого слоя через песчаную насыпь и угрожающие устойчивости земляного полотна. Для обеспечения устойчивости насыпи необходимо накопление запасов холода в её теле и грунтах основания, поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород. Для этого рекомендуется удаление снежного покрова с поверхности насыпи или его уплотнение, а отсыпку насыпи необходимо проводить только в зимний период. Оценка изменений геокриологических условий теплового состояния насыпей и прилегающей к ней территории успешно может быть решена на основе продолжения исследований.

**Ключевые слова:** железнодорожное полотно; ледовый комплекс; геокриологический мониторинг; сезонное протаивание; температурный режим грунтов; криогенные процессы.

## О тепловом состоянии оснований насыпей железной дороги Томмот – Кердем на участке распространения пород ледового комплекса

С. П. Варламов, П. Н. Скрыбин, Н. И. Шендер

### Введение

Железнодорожная линия Томмот-Кердем на 692-734 км пересекает участок распространения пород ледового комплекса, где льдистость достигает 0,7-0,8 дол. ед. Это наиболее сложный для строительства и эксплуатации железной дороги участок. По П.А. Соловьеву [1] ледовый комплекс представляет особый горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности.

Проблемы «ледового комплекса» рассматривались на научно-техническом совете и семинаре-совещании, проведенных в г. Якутске [2 и 3]. По итогам обсуждений ОАО «Проект-трансстрой» принял решение организовать систему инженерно-геокриологического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации железной дороги на этом участке. После начальных 2-3 лет эксплуатации железной дороги предусматривается проектирование дополнительных мероприятий, обеспечивающих устойчивость земляного полотна.

Институт мерзлотоведения СО РАН с 2005 года проводит на этом участке экспериментальные исследования за тепловым состоянием грунтов основания земляного полотна и прилегающей к трассе территории.

### Результаты исследований на экспериментальном полигоне

В 2005 г. были организованы исследования на экспериментальном полигоне на участке развития ледового комплекса, где льдистые грунты и повторно-жильные льды залегают на глубинах всего 0,6-1,2 и 1,8-2,3 м соответственно от поверхности. По льдистости и просадочности они относятся к IV и V категориям типа грунтов. В центральной части полигона были удалены лесорастительный и напочвенный покровы. Периферийный участок полигона с удаленным древостоем представлял аналог просеки (рис. 1).

Просадка грунтов на поверхности с удалением напочвенного (мощность 0,1-0,2 м) и лесорастительного покровов в 2010 году составила в среднем 29 см. На поверхности с удалением древостоя, начиная с 2008 г. просадка стабилизировалась на уровне 15 см.

Величина чаши оттаивания в грунтах на участке с удаленными напочвенным и

лесорастительным покровами в четвертом году достигла своего максимума (рис. 2а). По сравнению с мощностью сезонноталого слоя в лесу она увеличилась в среднем в 2,8 раза. Процесс стабилизации многолетнего протаивания пород ледового комплекса обусловлен интенсивным произрастанием травяного покрова (см. рис. 1). На участке с удалением древостоя глубина оттаивания грунтов незначительная и на 3-ий год составила 1,60 м. Далее отмечается тенденция к уменьшению мощности сезонноталого слоя. В 2009 г. температура грунтов на участке с удаленным напочвенным и лесорастительным покровами в конце теплого периода на глубинах 4, 6 и 10 м по сравнению с 2005 г. соответственно повысилась на 1,2, 1,3 и 0,7 °С. Заметное повышение температуры грунтов происходило в сезоннопротаивающем слое (рис. 2 б). В теплые и многоснежные зимние периоды двух последних лет промерзающий слой не смыкался с многолетнемерзлыми грунтами.



Сентябрь 2005 г.

Август 2009 г.

Рис. 1. Общий вид экспериментального полигона.

### Организация наблюдательной сети инженерно-геокриологического мониторинга и особенности строительства земляного полотна

Для проведения инженерно-геокриологического мониторинга в системе железнодорожного полотна – окружающая среда в 2007-2010 гг. были оборудованы 9 поперечных профилей в районе пикетов: 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7179. Бурение скважин и их оборудование для режимных температурных наблюдений под основания земляного полотна были проведены после вырубki просек трассы и до начала их отсыпки, в районе ПК 7179 - после возведения нулевой насыпи, а

на окружающей территории (просека, лес) во время возведения насыпи. Всего пробурена и оборудована 41 скважина. После укладки

шпалорельсов на земляное полотно были установлены стационарные марки для наблюдения за деформацией поверхности его.

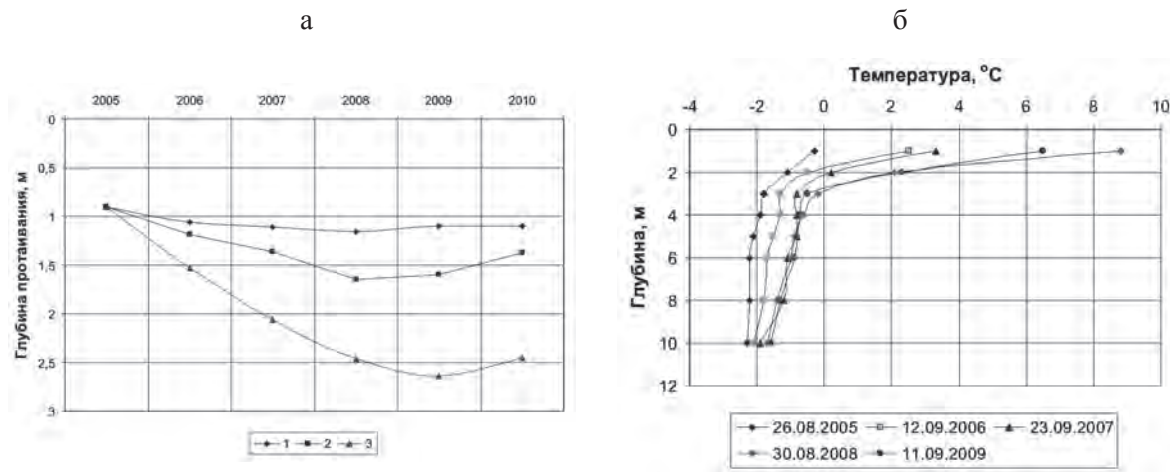


Рис. 2. Изменения мощности сезонного протаивания (а) и температуры (б) грунтов на экспериментальном полигоне.

1 – поверхность с естественной растительностью; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова (вырубка); 3 – поверхность с удаленным напочвенным и лесорастительным покровами.

В январе-феврале 2009 г. на поперечнике ПК 6932 была начата отсыпка насыпи с укладкой на глубине 1,0-1,5 м теплоизоляционного материала из пенополистирола толщиной 5 см. Высота насыпи достигала 1,0-1,5 м. На поперечнике ПК 6934 отсыпка насыпи высотой 1-4 м произведена в марте-апреле, а на поперечнике ПК 6926 в конце холодного периода. В конце летнего периода 2009 г. на поперечнике ПК 7088 была частично отсыпана насыпь высотой до 1 м, а на поперечнике ПК 7087 была начата выемка грунта сезонно-талого слоя с последующей заменой его скальными грунтами. На участке поперечника ПК 7179 отсыпка насыпи в 2009 г. была произведена в летний период с заменой грунта сезонноталого слоя скальными грунтами.

В итоге в августе-сентябре 2010 г. на поперечниках ПК 6926 и 6934 строителями сооружены из скального грунта насыпи высотой 7 м, в первом на бермах с установкой сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) до глубины 4 м. На поперечнике ПК 6932 отсыпана насыпь высотой до 2,5 м. Здесь на бермах установлены СОУ и в телах бермы и насыпи уложены теплоизоляционные материалы из пенополистирола. На поперечнике ПК 7087 отсыпана насыпь высотой 2,5 м с субвертикальными охлаждающими откосами из скального грунта и с бермами в её основании. На поперечнике ПК 7088 на откосах с консольным навесом высота насыпи составляла 2,5-3,0 м. На поперечнике ПК 7089

отсыпана насыпь высотой до 2,5 м с укладкой пенополистирола в его основании и установкой СОУ на бермах. На поперечнике ПК 7179 сооружена нулевая насыпь из скального грунта мощностью 2,2 м с заменой грунта сезоннопротаивающего слоя.

### Тепловое состояние грунтов оснований сооружаемых насыпей

Результаты экспериментальных наблюдений показали, что на просеке железной дороги глубина сезонного протаивания грунтов на третий год (2009 г.) после вырубки леса увеличилась по сравнению с естественным фоном (лес) в 1,5-1,7 раза, что намного больше, чем на экспериментальном полигоне на этот срок. Это объясняется тем, что просека трассы железной дороги отличается по сравнению с экспериментальным полигоном большей открытостью и соответственно наибольшим приходом солнечной радиации. В 2010 г. на просеке отмечается дальнейшее увеличение глубины сезонного протаивания грунтов, а также и в лесу (перемычка между просекой железной дороги и притрассовой автодороги). Последнее связано с изменением условий теплообмена поверхности с атмосферой, т.е. уменьшением затененности, т.к. перемычка имеет небольшую ширину. На маревых участках увеличение глубины сезонного протаивания грунтов в естественных условиях в 2010 г., по сравнению с 2007 г. составило 16-22%.



На мари (ПК 6926) в зиму 2007/2008 гг. до отсыпки насыпи грунты на глубинах 0,2 и 1,5 м охладились соответственно на 6,6-6,9 и 2,1-3,1° С. Здесь охлаждающее влияние низкой насыпи, высотой 1,5-2,0 м зимой 2008/2009 гг. заметно понижает температуру грунтов основания насыпи. Так на отметках 0,2 и 1,5 м под насыпью температура грунтов понижается соответственно до -17,2 и -7,9° С (рис. 3). К осени 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород оказалась приподнятой под осью трассы на 1,0-1,2 м, а под

откосами бермы на 0,5 м. В сентябре 2010 г. температура грунтов под основания насыпи на этих отметках составила соответственно 0,2 и -1,7° С. К концу теплого периода 2010 г. после возведения 7 метровой насыпи под ним ещё остается маломощный (0,3-0,5 м) талый слой. Этот интенсивный охлаждающий эффект на первый год, по-видимому, объясняется отсыпкой насыпи в зимнее время на мерзлый грунт, а потеря этого эффекта на второй год – отепляющим влиянием тела высокой насыпи на подстилающие грунты в летний период.

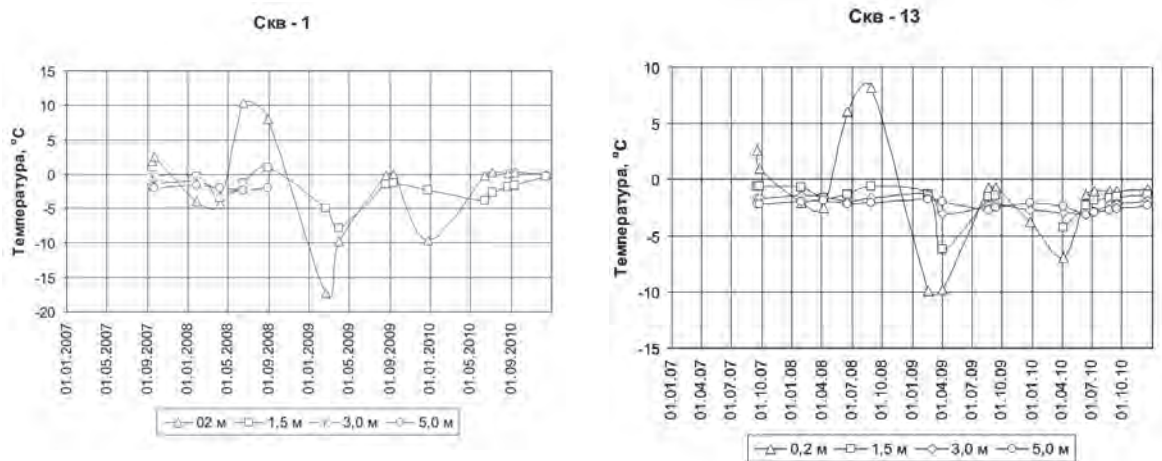


Рис. 3. Динамика температуры грунтов основания насыпи по оси трассы в районе пикетов: 6926 (Скв-1) и 6932 (Скв-7).

На просеке трассы ПК 6932 и 6934 в зиму 2007/2008 гг. понижение температуры грунтов на глубинах 0,2 и 1,5 м достигла соответственно величины 3,3-4,9; 0,6-2,6 и 3,1-3,8; 0,7-1,3° С (см. рис. 3 и рис. 4). Здесь слабая интенсивность накопления холода грунтами, по сравнению с маревым участком (ПК 6926), объясняется более поздними сроками

смыкания фазовых границ из-за увеличения мощности сезонноталого слоя после вырубки леса. В зиму 2008/2009 гг. после отсыпки насыпи грунты заметно начали аккумулировать холод до глубины 4-5 м. Температура грунтов основания насыпи на отметках 0,2; 1,5 и 3,0 м на этих пикетах понизились соответственно на 14,5-21,6; 4,3-9,7 и 1,4-6,1° С.

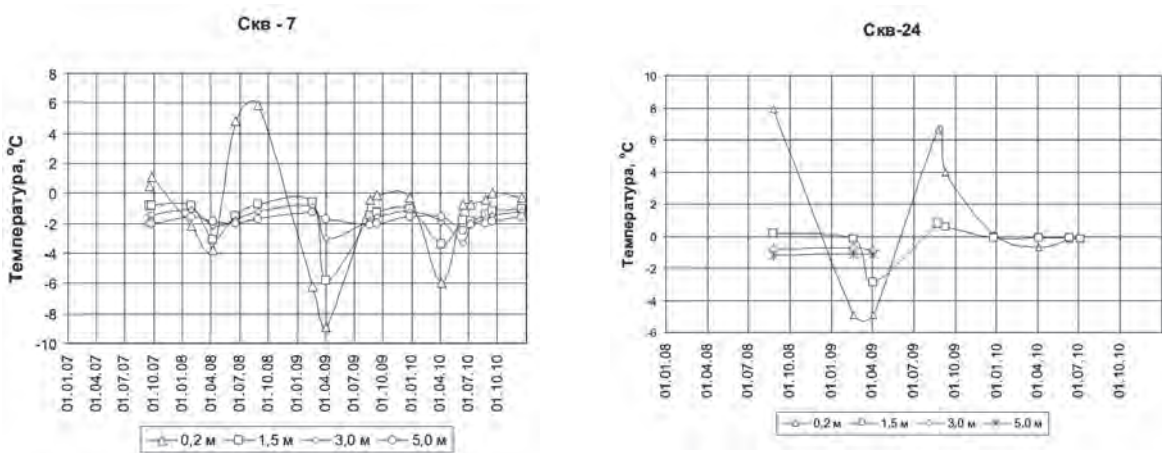


Рис. 4. Динамика температуры грунтов основания насыпи по оси трассы в районе пикетов: 6934 (Скв-13) и 7088 (Скв-24).

В районе ПК 6932 после отсыпки насыпи грунты её основания заметно охладилась и к концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята на 1 м, а под откосами бермы заметно меньше (0,5 м). В зиму 2009/2010 гг. грунты под основаниями насыпи охладилась по-разному. Так, на отметке 0,2 м температура грунтов достигала по оси трассы  $-6^{\circ}\text{C}$ , под откосами правой бермы  $-8,5^{\circ}\text{C}$  и левой бермы  $-4,5^{\circ}\text{C}$ . Это, по-видимому, объясняется накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у левой бермы и, соответственно, большей потерей тепла при фазовых переходах. На следующий летний сезон под осью трассы и под откосами берм верхняя граница многолетнемерзлых пород сохранилась на уровне предыдущего сезона. Здесь следует отметить, что под влиянием вышеперечисленного фактора под откосами левой бермы температура грунтов на отметке 0,2 м имеет тенденцию к повышению, т.е. от  $0,7^{\circ}\text{C}$  (2009 г.) до  $1,5^{\circ}\text{C}$  (2010 г.).

В районе ПК 6934 процесс формирования термического режима грунтов основания насыпи происходит иначе, чем на ПК 6932. Здесь грунты сезонноталого слоя находятся в более переувлажненных условиях, т.к. находятся на более низких гипсометрических отметках с относительно большими уклонами, в отличие последних. Под влиянием этих факторов амплитуды колебаний температуры грунтов в холодный и теплый периоды были наибольшими. На оси трассы после отсыпки насыпи высотой 3-4 м грунты её основания в зимний период заметно охладилась и к концу летнего периода 2009 г. верхняя граница многолетнемерзлых пород на оси трассы была приподнята более 1 м, под правыми нижними откосами насыпи примерно на 1 м, а под откосами левой бермы меньше 0,5 м. На оси трассы грунты основания насыпи на отметке 0,2 м в первый зимний сезон охладилась до  $-10$ , а во второй сезон всего до  $-7^{\circ}\text{C}$ . Это связано с тем, что грунты тела насыпи уже начали промораживаться снизу, а отсыпка насыпи достигла проектного уровня (7 м), поэтому амплитуда колебания температур уменьшилась. Температура грунтов основания

насыпи на этой отметке на правой нижней части откосов насыпи в первый зимний сезон охладилась до  $-9^{\circ}\text{C}$ , а во второй сезон до  $-15^{\circ}\text{C}$ . Здесь наблюдается более интенсивное охлаждение грунтов основания насыпи, чем на оси трассы. Грунты основания насыпи в левой нижней части её откоса, наоборот, в первый зимний сезон сильно охладилась до  $-13^{\circ}\text{C}$ , а во второй заметно меньше ( $-4,5^{\circ}\text{C}$ ). Это связано с накоплением надмерзлотных вод сезонноталого слоя у основания насыпи и потерей запаса холода на фазовые переходы при промерзании грунтов этого слоя, как и в районе ПК 6932.

В районе ПК 7088 отсыпка насыпи высотой 2,5 м произведена в конце августа 2009 г., поэтому температуры грунтов основания ее по оси трассы на глубине 0,2 м к концу августа и началу сентября были высокими и соответственно равны  $6,5$  и  $4,3^{\circ}\text{C}$ . Зимой 2009/2010 гг. грунты основания насыпи на глубине 1,5 м почти не охладилась ( $-0,1^{\circ}\text{C}$ ), а на глубине 0,2 м понижение температуры составило всего до  $-0,7^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, при промерзании не происходило смыкания с многолетнемерзлыми грунтами. В летний сезон 2010 г. температура грунтов основания насыпи по оси трассы в 1,5-метровом слое не отпускалась ниже  $-0,2^{\circ}\text{C}$ .

В районе пикета 7179 бурение и оборудование термических скважин произведено в конце августа 2009 г. после возведения земляного полотна с выемкой грунтов сезонноталого слоя. В момент бурения глубина протаивания от поверхности насыпи составляла 2,5-3,0 м при мощности скального грунта 2,2 м. Итак, здесь искусственно создана чаша протаивания грунтов в основании насыпи. Это подтверждают и температурные данные. Так, в зимний сезон в теле насыпи на глубине 1,5 м температура понижается до  $-5,0^{\circ}\text{C}$ , а в летний сезон она повышается до  $4,3-7,1^{\circ}\text{C}$  (рис. 5), и грунты на глубине 5 м остаются стабильно высокотемпературными ( $-1,1...-1,3^{\circ}\text{C}$ ). По расчетам нулевая изотерма находилась глубже 2 м и, по-видимому, здесь промерзающий слой не смыкается с многолетнемерзлыми породами.

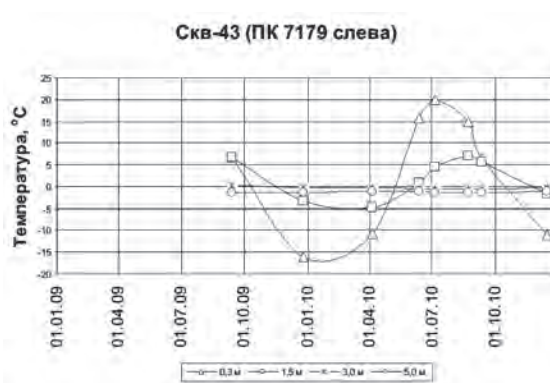
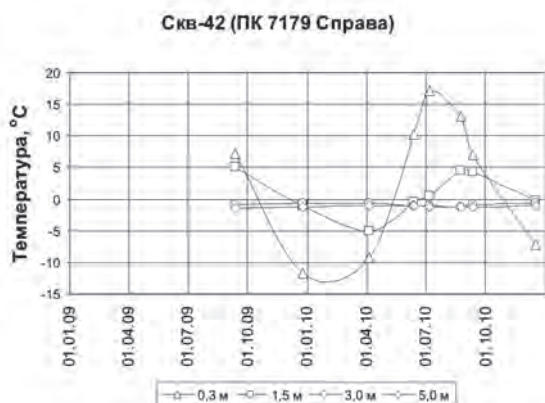


Рис. 5. Динамика температуры тела насыпи и грунтов её основания (Скв-42, Скв-43) в районе пикета 7179.

### Выводы

За период наблюдений глубина сезонного протаивания на просеке трассы продолжает увеличиваться, а температура верхних горизонтов многолетнемерзлых пород повышаться. На насыпи, отсыпанной в холодный период, наблюдается поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород, при этом, чем выше высота насыпи, тем интенсивнее скорость ее поднятия. При отсыпке насыпи в теплый период с удалением сезонноталого слоя в её основании формируется чаша протаивания.

Для обеспечения устойчивости насыпи необходимо накопление запасов холода в её теле и грунтах основания, поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород. Для этого рекомендуется постоянное удаление снежного покрова с поверхности насыпи, или его уплотнение. Отсыпку насыпи необходимо проводить только в зимний период.

### Список литературы

1. Соловьев, П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П. А. Соловьев. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.
2. Проектирование и строительство земляного полотна железной дороги Томмот – Кердем в

сложных инженерно-геокриологических условиях. Итоги инженерных изысканий в 2005 г. : материалы научно-технического совета 7-8 декабря 2005 г. в Якутске. – Якутск, 2005. – 118 с.

3. Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот - Кердем на участке «ледового комплекса» (Материалы семинара-совещания 11-12 сентября 2007 г. в г. Якутске). – Якутск : ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. – 165 с.

### References

1. Solov'ev, P.A. 1959. Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed. Moscow: USSR Acad. Sci. Press, 144 pp. (in Russian)
2. Pozin, V.A., Korolev, A.A., and Naumov, M.S. (ed.). 2005. Design and Construction of the Tommot-Kerdem Railway Roadbed in Complicated Permafrost Engineering Conditions. Results of Geotechnical Investigations in 2005. Proceedings of the Scientific and Technical Council Meeting, 7-8 December 2005, Yakutsk, Russia. Yakutsk, 118 pp. (in Russian)
3. Pozin, V.A., Korolev, A.A., and Naumov, M.S. (ed.). 2007. Proceedings of the Workshop on Structural Reliability of the Tommot-Kerdem Railway in the Ice-Complex Area, 11-12 September 2007, Yakutsk, Russia. Yakutsk: ООО Center Transstroizdat, 165 pp. (in Russian)

## Post-disturbance changes in the ground thermal state along the northern section of the Tommot-Yakutsk railway

P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: skachkov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** This paper summarizes long-term permafrost investigations conducted along the railway route corridor in Yakutia, northeastern Russia. Any disturbance to the environment (forest cutting, fires, surface stripping, etc) inevitably causes changes in permafrost conditions. The integrated studies reported in this paper are carried out to assess the effect of human disturbances on the thermal state of permafrost within the depth of annual temperature variation. They employ the method of natural analogs on the basis of long-term field observations. The ground thermal monitoring network covers about 50 sites affected by various disturbances. Field observations include repeated surveys of disturbed landscapes, as well as measurements of snow depth, snow density, soil properties, thaw depth, and ground temperature. The primary focus of these studies is on active layer thickness and permafrost temperatures above the level of zero amplitude, which are indicators of alterations to the ground thermal state. Observations indicate that forest cutting, surface cover removal, and tree removal on burns have resulted in a significant increase in thaw depths and upper permafrost temperatures in the alas terrain type. Changes in mean annual ground temperature have been quantified for selective, gradual and clear cuts and for old and recent burns in relation to plant succession stages. The results of this study have been used in the design and construction of the northern section of the Tommot-Yakutsk railway.

**Keywords:** permafrost; temperature; thaw depth; monitoring, dynamics.

## Изменения термического состояния грунтов при техногенных воздействиях на северном участке железной дороги Томмот – Якутск

П. Н. Скрябин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: skachkov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** В докладе обобщены материалы многолетних инженерно-геокриологических исследований, организованных в полосе строительства железнодорожной линии. Нарушения природных условий различного типа и масштаба (вырубка леса, лесные пожары, удаление напочвенного покрова и т.д.) неизбежно сопровождаются изменением геокриологических условий. Комплексные исследования проводятся с целью оценки влияния техногенных воздействий на динамику термического состояния грунтов. Работы выполняются с помощью метода физико-географического сравнения (или природных аналогий) на основе организации длительных натурных исследований. Наблюдательная сеть геотемпературного мониторинга охватывает около полусотни техногенных ландшафтов. Объектами исследований являются мерзлые породы слоя годовых теплооборотов. Полевые работы включают повторное обследование нарушенных ландшафтов, проведение наблюдений в холодный и теплый сезоны года за высотой и плотностью снега, свойствами, протаиванием и температурой грунтов. Исследована динамика индикаторов изменений теплового состояния грунтов: мощность активного слоя и температуры в слое годовых теплооборотов. Выявлено значительное повышение среднегодовой температуры верхних горизонтов криолитозоны и увеличение глубины сезонного протаивания при вырубке леса и удалении напочвенного покрова, вырубке леса на горях в межлесном типе местности. Количественно оценена динамика среднегодовой температуры грунтов на разнорежимных вырубках (выборочная, постепенная, сплошная) и на горях (свежие, старые) в зависимости от стадий сукцессионного развития растительности. Результаты исследований использованы при проектировании и строительстве северного участка железной дороги Томмот-Якутск.

**Ключевые слова:** грунты; температура; глубина протаивания; мониторинг; динамика.



# Изменения термического состояния грунтов при техногенных воздействиях на северном участке железной дороги Томмот – Якутск

П. Н. Скрыбин

## Введение

Строительство различных линейных сооружений (трубопроводы, железные и автомобильные дороги, линии электропередач и т.д.) неизбежно сопровождается значительными нарушениями природных условий. Техногенные воздействия различного типа и масштаба (вырубка леса, пожары, удаление напочвенных покровов и т.д.) приводят к изменению геокриологических условий, в том числе температурного режима грунтов, развитию негативных криогенных процессов. Институт мерзлотоведения СО РАН в течение многих лет проводит исследования температурного режима слоя годовых теплооборотов в нарушенных условиях [1-3 и др.].

Геокриологическое обеспечение инженерно-изыскательских, проектных и строительных работ с 1987 г. на северном участке железнодорожной линии Томмот – Якутск предусматривало оценку термического состояния грунтов [4-6 и др.]. Комплексные исследования в нарушенных ландшафтах выполняются в шести типах местности: низкотеррасовом, песчано-грядовом, межгрядово-низинном, аласном, межаласном и плакорном. Объектами исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов до глубины 10-15 м. Основными термическими параметрами являются мощность сезоннопротаивающего слоя ( $\xi$ ) и температура на подошве слоя годовых теплооборотов ( $t_0$ ).

## Методика

Работы проводятся с помощью метода физико-географического сравнения (или природных аналогий) на основе организации длительных натурных исследований. Наблюдательная сеть геотемпературного мониторинга охватывает около 50 техногенных ландшафтов, в том числе с удаленным напочвенным покровом – 5, на вырубках – 16, на гарях – 12, на гарях с вырубкой – 14. Натурные наблюдения проводятся 3-4 раза в холодный и тёплый периоды года. Полевые работы предусматривают повторное обследование нарушенных ландшафтов, проведение наблюдений за факторами, определяющими термический режим грунтов (высота и плотность снега, строение, свойства, протаивание и температура грунтов, теплопроводность напочвенных покровов, криогенные процессы).

## Обсуждение результатов

В районе работ в зависимости от совокупности природных условий  $\xi$  и  $t_0$  изменяются в широких пределах.

Экспериментальные исследования позволили количественно оценить влияние различных видов техногенных воздействий на температурный режим грунтов (таблица).

**1. Удаление напочвенного покрова.** В песчано-грядовом типе местности на мари в июле 1990 г. был вручную удален мохово-торфяной слой мощностью 0,15-0,25 м. По сравнению с естественными условиями среднегодовая температура грунтов при удалении напочвенного покрова на глубине 6 м повысилась на третий год – на 4° С. Интенсивное зарастание нарушенного участка ерниково-березовым молодняком сократило разницу среднегодовой температуры до 1,8° С. Спустя 18 лет мощность сезонноталого слоя на нарушенном участке составила 2,3 м или по сравнению с естественными условиями увеличилась в 2,4 раза.

В межаласном типе местности в 1992 г. был вырублен лиственный лес с последующим нарушением напочвенного покрова бульдозерами и автотранспортом. Через 18 лет на просеке по сравнению с естественными условиями температура грунтов на глубине 10 м повысилась на 2° С, а глубина сезонного протаивания увеличилась на 1,4 м. Такие изменения теплового состояния грунтов обусловили просадку поверхности до 0,6 м и развитие формирования полигональной формы рельефа. На межаласье в лиственном лесу при уничтожении брусничниково-мохового покрова отмечается повышение температуры грунтов в слое годовых теплооборотов от 0,2 до 1,0 °С. Увеличение мощности сезонноталого слоя не превышает 0,5 м, но сопровождается развитием просадок.

На склоне межаласья в 1989 г. был вырублен лиственный лес, удалены бульдозером напочвенный покров и верхний слой грунтов. После выпадения обильных осадков в июне вдоль дороги началось развитие термоэрозии и как следствие формирование оврага. Через 5 лет размеры оврага оказались следующими: длина – 340, ширина – 10-16, глубина до 6 метров. На участке конуса выноса грунтов толщиной 0,5 м за 2 года погиб весь лес, спустя 4 года  $t_0$  повысилась на 1,5° С.

Параметры термического режима грунтов

Тип местности	Состав грунтов	Естественные условия		Гарь		Гарь + вырубка	
		$\xi$ , м	$t_0$ , °C	$\xi$ , м	$t_0$ , °C	$\xi$ , м	$t_0$ , °C
Низкотеррасовый	Песок, супесь	1,1-1,4	-1,3...-2,2	1,1-1,2	-1,7...-1,9	1,2-2,1	-1,1...-1,7
Песчано-грядовый	Песок	1,6-3,1	-0,2...-2,5	1,9-3,5	-0,1...-2,2	2,1-4,2	0,2...-1,6
Межгрядово-низинный	Торф, песок, супесь	0,5-2,1	-0,9...-3,4	1,0-2,2	-0,8...-2,5	1,2-2,4	-0,6...-2,3
Межаласный	Супесь, суглинок	1,2-2,0	-1,8...-3,2	1,3-2,5	-1,7...-3,0	1,8-3,1	-1,3...-2,8

В марте 1989 г. в аласном типе местности был удален снежный и осоково-кочкарниковый покров с ерником. Через год на нарушенном участке по сравнению с естественным мощностью сезонного слоя увеличилась на 0,4 м, а температура грунтов на глубине 10 м повысилась на 0,4° C. Спустя 7 лет здесь по сравнению с ненарушенным участком увеличение глубины сезонного протаивания составило 0,5 м, а повышение  $t_0$  - 0,7° C.

2. Рубка леса. Разнорезимные рубки лесов (выборочная, постепенная, сплошная) приводят к изменению мерзлотных условий. В песчано-грядовом типе местности влияние рубок на температурный режим грунтов изучены на 7 участках. При сплошной вырубке соснового леса по сравнению с естественными условиями отмечается резкое увеличение глубины сезонного протаивания на 0,85 м и повышение температуры грунтов на 0,4° C. Понижение  $t_0$  на 0,9° C, сокращение СТС на 0,3 м отмечается на старой вырубке, где идет восстановление лиственнично-соснового леса. Выборочные рубки на 4 участках в редкостойных сосновых лесах, проведенные в зимнее время без нарушения напочвенных покровов существенно не нарушили тепловое состояние грунтов.

Выборочная рубка лиственничного леса в межаласном типе местности приводит к незначительному повышению температуры грунтов (0,2-0,4° C). Это объясняется проведением рубки в период с устойчивым снежным покровом, т.е. с сохранением теплоизолирующего влияния бруснично-мохового покрова и интенсивным восстановлением растительности.

В межгрядово-низинном типе местности на песчаной гряде выборочная рубка леса и на-

рушение напочвенного покрова привели к повышению температуры грунтов на глубине

10 м за три годичных цикла на 0,3-0,7° C. Еще более заметное повышение  $t_0$  на 1,5-2,0° C отмечается через 5-7 лет после уничтожения пожаром теплоизолирующего мохово-багульникового покрова и частичного вывала горелого древостоя.

В плакорном типе местности исследования изменения термического режима грунтов были организованы на двух старых вырубках. По сравнению с ненарушенными условиями грунты на вырубках с возобновлением напочвенного покрова и лиственнично-березового подростка характеризуются увеличением  $t_0$  на 0,5-0,6 м и повышением  $t_0$  на 0,4-0,7° C.

Мониторинговые исследования позволяют выявить динамику среднегодовой температуры грунтов при разнорезимных рубках лесов. На старой сплошной вырубке редкостойного соснового леса на стадии развития молодняка (10-30 лет) тепловое состояние грунтов было близко к исходному. При выборочной рубке лиственнично-соснового леса на березово-кустарниковой стадии развития растительности (10-20 лет)  $t_0$  понижается на 0,3-0,6° C. Постепенная рубка лиственничного леса на травяной (3-8 лет) и березово-кустарниковой стадиях (10-20 лет) развития приводит к повышению  $t_0$  на 0,5-1,2° C. На старой сплошной вырубке на стадии восстановления березово-лиственничного молодняка (чаща) возрастом 10-30 лет  $t_0$  понижается в среднем на 1° C. На этом участке годичные циклы (2005-2008 гг.) с теплыми зимами и мощными снегоотложениями способствовали повышению  $t_0$  на 2,1° C. Малоснежные зимы 2009-2010 гг. привели к понижению  $t_0$  (рис. 1).

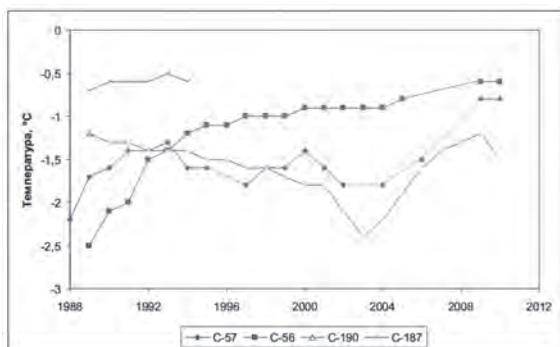


Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры грунтов в лиственничнике (С-57), при выборочной (С-187), постепенной (С-56) и сплошной (С-190) рубках леса в межлассном типе местности.

3. Лесные пожары. Влияние пирогенеза на температурный режим грунтов изучено наиболее обширно в песчано-грядовом типе местности на 10 участках. Пожар в июне 1987 г. уничтожил маломощный травяно-толокнянковый напочвенный покров и в последующем стал причиной вывала молодого соснового древостоя. В течение первых 2 лет после пожара отмечается резкое повышение температуры (примерно на  $1,5^{\circ}\text{C}$ ). Начиная с 4-го года, на гаревом участке при постепенном самовосстановлении березово-кустарниковой растительности наблюдается стабилизация температуры грунтов, и ее значения не выходили за пределы  $-0,3 \dots -0,4^{\circ}\text{C}$ .

Гари и вырубка леса является распространенным видом техногенеза. Для количественной оценки влияния такого нарушения на термический режим грунтов в низкотеррасовом типе местности были организованы наблюдения в лиственничнике и на участке, где после пожара 1986 г. проведена сплошная вырубка горелого лиственничного леса. Пирогенное воздействие и вырубка леса привели через год к повышению  $t^0$  на  $0,5^{\circ}\text{C}$  и увеличению  $\xi$  на  $0,15\text{ м}$ , а через 3 года – соответственно на  $0,8^{\circ}\text{C}$  и  $0,43\text{ м}$ . Через 20 лет после пожара в связи с самовосстановлением березово-лиственничной чащи понижение  $t_0$  составило  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Временная изменчивость термического состояния грунтов под воздействием пожара в 1986 г. и вырубки леса изучается в межлассном типе местности. Выборочная рубка леса с нарушением напочвенного покрова после пожара в первые 5 лет способствовали повышению  $t_0$  на  $0,3-0,5^{\circ}\text{C}$ . В дальнейшем естественное

возобновление травяно-мохового покрова и березово-лиственничной чащи на 2-3 стадиях сукцессионного развития сократило поступление солнечной радиации на поверхность грунта, привело к постепенному понижению температуры грунтов на  $0,5-0,8^{\circ}\text{C}$  (рис. 2).

Влияние лесных пожаров на тепловое состояние грунтов в плакорном типе местности изучены на двух старых гарях. На этих участках при самовосстановлении лиственничного и березового лесов отмечается увеличение  $\xi$  на  $0,3-0,4\text{ м}$ , повышение  $t_0$  в пределах  $0,4-0,7^{\circ}\text{C}$ .

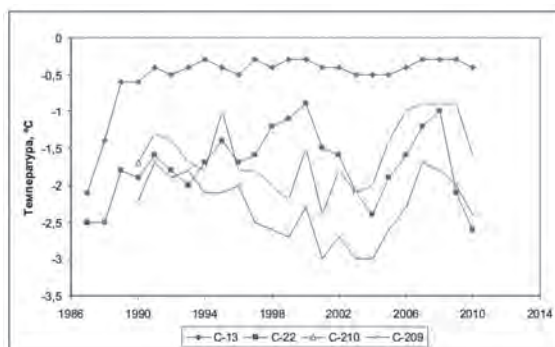


Рис. 2. Динамика среднегодовой температуры грунтов в сосняке (С-22), на гари с вырубкой (С-13), в песчано-грядовом и в лиственничнике (С-210), на гари с вырубкой (С-209) в межлассном типах местности.

### Выводы

1. Удаление напочвенного покрова в песчано-грядовом, аласном, межлассном типах местности приводит к повышению среднегодовой температуры и увеличению глубины сезонного протаивания грунтов и развитию криогенных процессов (термопросадка, термоэрозия, оврагообразование).

2. Наибольшее повышение температуры грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания на вырубках отмечаются в межгрядово-низинном и межлассном типах местности, наименьшее – в песчано-грядовом.

3. Растепление грунтов, увеличение мощности сезонноталого слоя пожарами особенно опасно в межлассном типе местности с близким от поверхности залеганием сильнольдистых отложений, где отмечается развитие негативных криогенных процессов.

### Список литературы

1. Шимановский, С. В. Влияние покрытий на тепловой режим грунтов / С. В. Шимановский // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. – Якутск, 1942. – Вып. 1. – С. 44-55.
2. Мельников, П. И. Вечная мерзлота в районе г. Якутска / П. И. Мельников П.И. // Исследование вечной мерзлоты в ЯАССР. – М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1950.- Вып. 2. – С. 52-70.
3. Павлов, А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах СССР / А. В. Павлов. – Якутск : Якутское кн. изд-во, 1975. – 302 с.
4. Скрябин, П. Н. Оценка изменений температурного режима грунтов при нарушении природных условий / П. Н. Скрябин, С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков // Рациональное природопользование в криолитозоне. - М. : Наука, 1992. - С. 165-173.
5. Варламов, С. П. Льдистость грунтов северного участка проектируемой железной дороги Томмот – Кердем (ст. Олень – ст. Кердем) / С. П. Варламов // Материалы международной конференции «Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения». – Тюмень : Тюм ГНГУ, 2006. – Т. 2. – С. 212-214.
6. Скрябин, П. Н. Влияние автодорожных насыпей на термическое состояние грунтов в Центральной Якутии / П. Н. Скрябин // Материалы VII Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения» г. Чита. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2007. - С. 61-64.

### References

1. Shimanovskii, S.V. 1942. Effect of pavements on the ground thermal regime. In: *Permafrost Investigations in the Yakut Republic*, vol. 1. Yakutsk, 44-55. (in Russian)
2. Melnikov, P.I. 1950. Permafrost in the Yakutsk area. In: *Permafrost Investigations in YaSSR*, vol. 2. Moscow-Leningrad: USSR Acad. Sci. Press, 52-70. (in Russian)
3. Pavlov, A.V. 1975. *Heat Exchange between Soil and Atmosphere in Northern and Temperate Latitudes of the USSR*. Yakutsk: Yakut Publishing House, 302 pp. (in Russian)
4. Skryabin, P.N., Varlamov, S.P., and Skachkov, Yu.B. 1992. Evaluation of changes in the ground thermal regime caused by environmental disturbance. In: *Natural Resource Management in Permafrost Regions*. Moscow: Nauka, 165-173. (in Russian)
5. Varlamov, S.P. 2006. Ground ice contents in the northern section of the Tommot-Kerдем railway project (Olen station to Kerдем station). In: *Earth Cryosphere Assessment: Theory, Applications and Prognosis of Alterations, Proceedings of International Conference, 29-31 May 2006, Tyumen, Russia*, vol. 2: 212-214. (in Russian)
6. Skryabin, P.N. 2007. The effect of road embankments on ground thermal regime in Central Yakutia. *Permafrost Engineering, Proceedings of the Se-venth International Symposium, 21-23 November 2007, Chita, Russia*: 61-64. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press (in Russian)



## Technical melioration of the soil massif in the building base

A.V. Stepanov<sup>1</sup>, I.I. Rozhin<sup>2</sup>, F.E. Popenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, SB RAS  
Oktyabrskaya St. 1, Yakutsk, Russia 677890, e-mail: a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru

<sup>2</sup>Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup>Scientific Promotional Center “Geotechnology”, Yakutsk, Russia

**Abstract.** The problem of controlling the temperature regime of the permafrost soil massif in the building base is investigated by the methods of mathematical simulation. The mathematical model developed on the basis of the general statement of Stefan problems takes into consideration dynamics of the change of air temperature and the coefficient of air heat exchange with the day surface depending on the wind velocity. The influence of heat insulation, which is laid in the building base, soil dewatering and cold air blowing along the day surface on the temperature field formation and cold accumulation in the soil massif is studied. Among the analyzed methods of the temperature regime control the most efficient one is the laying of the seasonally acting heat insulation with the preliminary soil dewatering. The method of blowing with the cold winter air along the day surface without using the heat insulation and dewatering is considered to be of less efficiency.

**Keywords:** building base; thawing–freezing of permafrost soils; computational experiment.

## Техническая мелиорация массива грунтов в основании здания

А. В. Степанов<sup>1</sup>, И. И. Рожин<sup>2</sup>, Ф. Е. Попенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН  
Россия 677890, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, ИФТПС СО РАН,  
e-mail: a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru

<sup>2</sup>Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>3</sup>Научно-внедренческий центр «Геотехнология», г. Якутск, Россия

**Аннотация.** В работе методами математического моделирования исследуется проблема управления температурным режимом массива многолетнемерзлых грунтов в основании здания. В математической модели, разработанной на основе общей постановки задач типа Стефана, учитываются динамики изменения: температуры атмосферного воздуха, а также коэффициента конвективного теплообмена воздуха с дневной поверхностью в зависимости от скорости ветра. Изучено влияние теплоизоляции, заложенной в основание, а также водопонижения грунтов и продувки холодным воздухом вдоль дневной поверхности, на формирование температурного поля и аккумуляции холода в массиве грунтов. Из рассмотренных способов управления температурным режимом более эффективным является укладка сезоннодействующей теплоизоляции с предварительным водопонижением грунтов, а менее эффективным – продувка холодным зимним воздухом вдоль приземного слоя без теплоизоляции и водопонижения.

**Ключевые слова:** основание здания; оттаивание–промерзание многолетнемерзлых грунтов; вычислительный эксперимент.

# Техническая мелиорация массива грунтов в основании здания

А. В. Степанов, И. И. Рожин, Ф. Е. Попенко

## Введение

Регионы распространения многолетнемерзлых грунтов отличаются специфическими климатическими и мерзлотно-грунтовыми условиями. Особенностью инженерно-геокриологических условий г. Якутска Республики Саха (Якутия) является широкое распространение глинистых и пылеватых засоленных мерзлых грунтов с низкими прочностными характеристиками и структурной неустойчивостью при оттаивании, вмещающих постоянно действующие водонасыщенные талики надмерзлотного типа, преимущественно техногенного происхождения. Все это благоприятствует развитию опасных криогенных процессов при техническом нарушении естественных условий.

В условиях многолетней мерзлоты одним из основных принципов строительства является сохранение в мерзлом состоянии основания сооружений в процессе их эксплуатации, которое обеспечивает устойчивость, надежность и увеличивает продолжительность службы объектов. В данной работе рассматриваются следующие способы управления температурным режимом массива грунтов с целью замораживания обводненного талика в основании здания:

- 1) укладка эффективной теплоизоляции на спланированную поверхность под зданием на летний период;
- 2) то же самое, как в п. 1), но с предварительным водопонижением грунтов;
- 3) продувка холодным зимним воздухом приземного слоя без теплоизоляции и водопонижения грунтов.

## Постановка и метод решения задачи

Математическая постановка задачи оттаивания–промерзания массива грунтов в основании здания осуществлена на основе общей постановки задач типа Стефана. В математической модели были приняты следующие допущения:

1. Перенос тепла внутри массива грунтов осуществляется только теплопроводностью, тем самым при расчете температурного поля не учитываются массообменные процессы.
2. Теплофизические характеристики слоев массива грунтов считаются кусочно-постоянными для талого и мерзлого состояний, учитывая их малое изменение в рассматриваемом диапазоне температур.

3. Фазовый переход влаги происходит при постоянной температуре без изменения начальной влажности и объема.

Модель включает квазилинейное уравнение теплопроводности, которое с учетом много-слойной конструкции массива грунтов имеет вид

$$\tilde{C}_k(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$
$$0 < y < L, \quad 0 < z < H, \quad \tau > 0,$$

где коэффициенты  $\lambda_k$  и  $\tilde{C}_k$  аппроксимируются как кусочно-постоянные (сглаженные) функции по температуре в окрестности фазового перехода.

Наиболее подходящим для численного решения прикладных задач Стефана, которые в основном бывают многомерными и характеризуются наличием нескольких немонотонно движущихся фронтов фазового перехода, является метод, основанный на подходе [1]. Для этого метода авторы [2] разработали экономичную разностную схему сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении тепло-проводности по температуре в окрестности фазового перехода. Схемы со сглаживанием коэффициентов предложены также в [3] и характеризуются тем, что граница раздела фаз явно не выделяется, что позволяет использовать однородные разностные схемы. При этом скрытая теплота фазового перехода  $W = (q_{ph} + T_{ph} c_p) \rho \omega$  вводится с применением  $\delta$ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость в коэффициент  $\tilde{C}(T)$ .

Температурное поле в начальный момент времени задается в виде функции, зависящей только от вертикальной координаты  $z$ , и находится путем аппроксимации данных термометрии

$$T = T_0(z), \quad \tau = 0. \quad (2)$$

На дневной поверхности массива принимается граничное условие III рода

$$-\lambda_k(T) \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_r (T_a - T), \quad z = 0, \quad (3)$$

где  $\lambda_k$  соответствует верхнему слою массива ( $k=1$ ). Слои теплоизоляции и бетонной отмостки учитываются как термические сопротивления в приведенном коэффициенте теплообмена:

$$\alpha_1 = 1 \left( \frac{1}{\alpha_a} + \frac{h_{ins}}{\lambda_{ins}} + \frac{h_b}{\lambda_b} \right), \quad 0 \leq y \leq L_1;$$

$$\alpha_1 = 1 \left( \frac{1}{\alpha_a} + \frac{h_b}{\lambda_b} \right), \quad L_1 < y \leq L,$$

где  $\alpha_a$  – коэффициент конвективного теплообмена воздуха с дневной поверхностью.

В разработанной математической модели учитываются динамики изменения: температуры атмосферного воздуха, а также коэффициента конвективного теплообмена воздуха с дневной поверхностью в зависимости от скорости ветра [4]:

$$\alpha_a = 15.12 \cdot \bar{v}_a.$$

На поверхностях, разделяющих слои массива, выполняются условия идеального теплового контакта, т. е. граничные условия IV рода: равенство температур и тепловых потоков непосредственно на границах между слоями. Принимаем также условие симметрии

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = 0; \quad (4)$$

условия равенства нулю тепловых потоков на достаточном удалении

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad y = L; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad z = H. \quad (5)$$

Поставленная задача (1)–(5) решается конечно-разностным методом с использованием продольно-поперечной схемы (суммарной аппроксимации), при этом исходное уравнение (1) расщепляется на уравнения с весами [5]. Таким образом, эффективный расчет двумерной задачи строится на основе метода расщепления по пространственным координатам с использованием схемы переменных направлений [6] и с привлечением для обеспечения устойчивости получающихся одномерных задач неявных методов на основе прогоночных алгоритмов.

### Результаты вычислительного эксперимента

Расчеты выполнены для условий г. Якутска при исходных данных, включающих: сведения о вещественном составе массива грунтов, их теплофизических характеристиках; данные термометрии; размеры исследуемого основания здания. Среднемесячные значения температуры воздуха и скорости ветра были взяты из СНиП [7] и аппроксимированы линейными зависимостями между месяцами. Свойства массива грунтов, приведенные в табл. 1, были определены научно-внедренческим центром «Геотехнология» при инженерно-геологических изысканиях. Для теплоизоляции толщиной  $h_{ins} = 0.05$  м принимается  $\lambda_{ins} = 0.04$  Вт/(м·К); а для бетонной отмостки толщиной  $h_b = 0.3$  м –  $\lambda_b = 2.04$  Вт/(м·К) [8]. Также входными параметрами являются:  $q_{ph} = 334.4$  кДж/кг,  $c_p = 4184$  Дж/(кг·К),  $L = 20$  м,  $L_1 = 15$  м,  $H = \sum h_k = 11$  м. За начало отсчета времени принята середина апреля.

Таблица 1. Характеристики слоев многослойного массива грунтов

k	Вид слоя	$h_k$	$\rho$	$\omega$	$T_{ph}$	$\lambda$		$C \cdot 10^{-6}$	
						$\lambda_{liq}$	$\lambda_s$	$C_{liq}$	$C_s$
1	Насыпной грунт	0.6	1500	0.25	-0.1	2.21	2.44	3.289	2.198
2	Супесь талая с примесью растительных остатков	3.4	1250	0.40	-0.1	1.92	2.15	3.098	2.114
3	Песок пылеватый талый	2.2	1320	0.34	-0.05	1.92	2.15	3.349	2.345
4	Песок мелкий талый, водонасыщенный	2.7	1320	0.34	-0.03	1.92	2.15	3.349	2.345
5	Песок мелкий твердомерзлый	2.1	1380	0.35	-0.03	1.92	2.09	3.349	2.345



Таблица 2. Характеристики слоев массива грунта после водопонижения

$k$	Вид слоя массива грунтов	$\rho$	$\omega$
1	Насыпной грунт	1500	0.25
2	Супесь талая с примесью растительных остатков	1510	0.25
3	Песок пылеватый талый	1620	0.19
4	Песок мелкий талый, водонасыщенный	1650	0.14
5	Песок мелкий твердомерзлый	1650	0.14

В первом и втором способах управления температурным режимом был рассмотрен следующий сценарий работ – чтобы аккумулировать холод, теплоизоляция необходимо укладывать в середине апреля и снимать ее в середине октября (т. е. через 183 сут), а также использовать ее только первые три сезона. Во втором способе управления в отличие от первого изменяются некоторые физические характеристики грунтов: влажность уменьшается, плотность увеличивается, а все остальные остаются неизменными (см. табл. 2).

В третьем случае рассматривается способ охлаждения массива грунтов продувкой приземного слоя воздухом с помощью вентиляторов через каналы прямоугольного сечения размерами  $a \times b$  и длиной  $x$ . Продувка осуществляется только первые три зимних сезона.

Предполагается, что воздух в потоке хорошо перемешивается, так что все его характеристики можно усреднить по сечению канала. Физические свойства воздуха считаются постоянными. Течение воздуха гидродинамически стабилизировано, т. е. профиль скорости не изменяется по длине канала; задается средняя по сечению скорость, коэффициент теплоотдачи не меняется по длине канала.

Учет неравномерности распределения скорости по сечению канала осуществляется путем использования полуэмпирических зависимостей коэффициентов конвективного теплообмена от чисел Рейнольдса  $Re = wd_{eq} \nu_a$  и Прандтля  $Pr = \nu_a C_a \lambda_a$ . Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена вычисляется по формуле:  $\alpha = Nu \lambda_a / d_{eq}$ , где число Нуссельта для турбулентного режима  $Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \varepsilon$  [9]. В этих уравнениях за определяющую температуру принимается средняя температура воздуха, а за определяющий размер эквивалентный диаметр канала  $d_{eq} = 4f u$ , где  $f = ab$  и  $u = 2(a+b)$ . Коэффициент  $\varepsilon$  учитывает изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине канала. Если

$x/d_{eq} \geq 50$ , то поправка  $\varepsilon \cong 1$ ; при  $x/d_{eq} < 50$  значение  $\varepsilon$  определяется из табл., приведенной в [9].

Тогда при  $a \times b \times x = 5 \times 1 \times 30$  м,  $w = 10$  м/с,  $\nu_a = 13.5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_a = 0.0244$  Вт/(м·К),  $C_a = 1310$  Дж/(м<sup>3</sup>·К) получим коэффициент теплоотдачи в зимнее время  $\alpha = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Аналогично находим значение коэффициента теплоотдачи в теплое время года  $\alpha = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). При этом за скорость  $w$  принимается среднее значение скорости ветра с апреля по октябрь, равное 3 м/с.

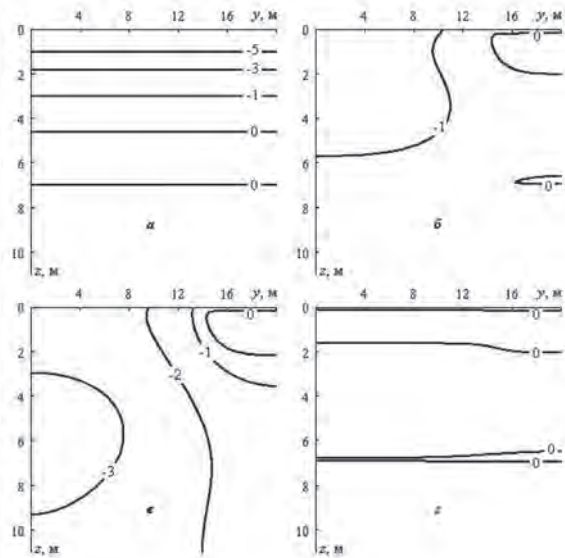


Рис. 1. Конфигурации изотерм в середине апреля ( $a$ ) и в середине октября третьего сезона ( $b$  – первый,  $v$  – второй,  $z$  – третий способы управления температурным режимом).

На рис. 1 представлены температурные поля при различных способах управления температурным режимом массива, где цифры у изотерм соответствуют значениям температур. Рис. 1,  $a$  соответствует начальному распределению температур, рис. 1,  $b$ – $z$  – температурному полю в середине октября третьего сезона управления.

В табл. 3 представлена динамика изменения толщины таликовой зоны, находящейся в средней части массива, по его глубине. Значения вертикальных сечений соответствуют:  $y = 0$  – середине области массива,  $y = L_1$  – крайней границе области массива, где используются способы управления. Видно, что при любом способе управления мощность таликовой зоны уменьшается с каждым сезоном, но с разными темпами.



Таблица 3. Местонахождение таликовой зоны по глубине массива грунтов  $z$

Момент сезона	Сечение $y=0$	Сечение $y=L_1$	Сечение $y=L$
Начало (апрель)	4.40–7.30	4.40–7.30	4.40–7.30
<i>При укладке теплоизоляции в летнее время</i>			
1 сезон (октябрь)	4.58–7.31	4.56–7.31	4.54–7.31
1 сезон (апрель)	5.46–7.32	5.40–7.32	5.17–7.32
2 сезон (октябрь)	5.94–7.32	5.69–7.32	5.54–7.32
2 сезон (апрель)	6.64–7.32	6.20–7.32	5.94–7.32
3 сезон (октябрь)	-	6.74–7.32	6.44–7.30
3 сезон (апрель)	-	-	6.91–7.30
<i>При укладке теплоизоляции в летнее время после водопонижения грунтов</i>			
1 сезон (октябрь)	4.61–7.31	4.59–7.31	4.57–7.31
1 сезон (апрель)	5.94–7.32	5.75–7.32	5.62–7.32
2 сезон (октябрь)	6.76–7.32	6.30–7.32	6.03–7.32
2 сезон (апрель)	-	-	7.01–7.30
<i>При продувке зимним воздухом вдоль приземного слоя (без теплоизоляции и водопонижения)</i>			
1 сезон (октябрь)	4.55–7.31	4.56–7.31	4.57–7.31
1 сезон (апрель)	5.36–7.32	5.30–7.32	5.25–7.32
2 сезон (октябрь)	5.62–7.32	5.55–7.32	5.50–7.32
2 сезон (апрель)	6.04–7.32	5.94–7.32	5.86–7.32
3 сезон (октябрь)	6.57–7.32	6.43–7.32	6.35–7.32
3 сезон (апрель)	7.08–7.31	6.87–7.31	6.74–7.31

Элемент объема массива грунтов  $dV$  за время  $d\tau$  нагревается (или охлаждается) на величину  $dT$ , т.е. воспринимает (или отдает) количество теплоты, равное

$$dQ = C dT dV, \quad (6)$$

Общее количество теплоты, которое идет на нагревание (или охлаждение) за время  $d\tau$ , определяется интегрированием выражения (6) по всему объему массива грунта. Тогда суммированием положительных значений  $dQ$  по всему объему определяется воспринимаемое количество теплоты  $dQ_{in}$ , а суммированием отрицательных значений – отдаваемое количе-

ство теплоты  $dQ_{out}$ . Для определенного промежутка времени получим конечные значения  $Q_{in}$  и  $Q_{out}$ , которые можно назвать соответственно теплосодержанием и холодосодержанием массива грунтов. На рис. 2 представлена динамика изменения разности количеств теплоты  $\Delta Q = Q_{in} - |Q_{out}|$ .

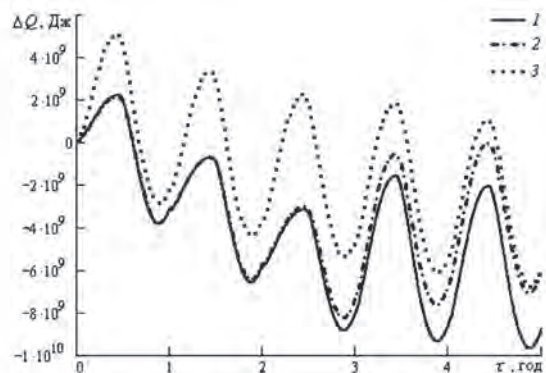


Рис. 2. Разность значений количеств теплоты  $\Delta Q = Q_{in} - |Q_{out}|$ : 1 – первый, 2 – второй, 3 – третий способы управления температурным режимом.

Из-за циклического изменения температуры воздуха во второй половине зимнего периода поступление холода от воздуха уменьшается (см. рис. 2) или тепловой поток от массива грунтов начинает уменьшаться и может быть равен нулю, когда атмосферный воздух еще существенно охлажден. Физически это означает, что тепловая инерционность мерзлого грунта со временем делает его своеобразным тепловым сопротивлением, в результате чего движение фронта фазового перехода замедляется, скорость изменения температуры грунтов уменьшается. Весной замораживание массива останавливается, далее происходит оттаивание мерзлых грунтов, в основном в деятельном верхнем слое, т.к. изменения температуры в нижележащих слоях многолетнемерзлой породы незначительны. Но к началу следующего сезона управления температура грунта будет иметь значение ниже начального (естественного), поскольку в северных регионах длительность летнего периода значительно меньше зимнего.

### Заключение

Анализ результатов показал, что применение слоя теплоизоляции в теплый период года способствует затуханию нестационарных тепловых возмущений. Укладка теплоизоляции под зданием позволяет значительно уменьшить глубину сезонного оттаивания, тем самым увеличить теплоустойчивость массива грунтов и



эффективность хладозарядки. Водопонижение грунтов приводит к быстрому смыканию ледопородных линз, т.е. мощность таликовой зоны уменьшается существенно быстрее. При этом на фазовый переход выделяется или поглощается меньше тепловой энергии. В результате расчетов установлено, что уже после второго сезона теплоизоляцию можно не укладывать. Следовательно, теплоизоляция, заложенная в основание после водопонижения грунтов в теплый период года, способствует большей аккумуляции холода в массиве, что увеличивает несущую способность сооружения и продлевает срок его эксплуатации.

Из рассмотренных способов управления температурным режимом более эффективным является укладка сезоннодействующей теплоизоляции с предварительным водопонижением грунтов, а менее эффективным – продувка холодным зимним воздухом вдоль приземного слоя без теплоизоляции и водопонижения. Но для полного сравнения рассмотренных вариантов необходим технико-экономический анализ, выполненный по данным натурных испытаний.

#### Обозначения

$a$  – ширина канала, м;  $b$  – высота канала, м;  $\tilde{C}$  – эффективная объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $c_p$  – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $d$  – диаметр канала, м;  $f$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;  $H$  – общая высота массива грунта, м;  $h$  – толщина слоя, м;  $L$  – полуширина массива грунта, м;  $Nu$  – число Нуссельта;  $P_r$  – число Прандтля;  $Q$  – количество теплоты, Дж;  $q_f$  – удельная теплота фазового перехода вода – лед, Дж/кг;  $Re$  – число Рейнольдса;  $T$  – температура, °С;  $u$  – полный периметр канала, м;  $V$  – объем массива, м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $W$  – скрытая теплота фазового перехода, Дж;  $w$  – скорость продувки, м/с;  $x$  – длина канала, м;  $y, z$  – координаты, м;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\varepsilon$  – поправка,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\omega$  – влажность, дол. ед. Индексы: 0 – начальное состояние; 1 – область, где применяются способы управления температурным режимом; a – воздух; b – бетонная отмостка; eq – эквивалентный; in – получаемое; ins – теплоизоляция; k – слой грунта; liq – жидкая фаза; out – отдаваемое; ph – фазовый переход; g – приведенный; s – твердая фаза.

#### Список литературы

1. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
2. Самарский, А. А. Экономичная схема сквозного счета для многомерных задач Стефана / А. А. Самарский, Б. Д. Моисеенко // Журнал вычис. математики и матем. физики. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 816–827.
3. Будак, Б. М. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана / Б. М. Будак, Е. Н. Соловьева, А. Б. Успенский // Журнал вычис. математики и матем. физики. – 1965. – Т. 5, № 5. – С. 828–840.
4. Порхаев, Г. В. Прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов на застраиваемых территориях / Г. В. Порхаев, В. К. Щелоков. – Л.: Стройиздат, 1980. – 112 с.
5. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
6. Яненко, Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.
7. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.: ГУП ЦПП, 2000. – 59 с.
8. СНиП II-3-79\*. Строительная теплотехника. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 29 с.
9. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.

#### References

1. Tikhonov, A.N., Samarsky, A.A. 1977. Equations of the mathematical physics. Moscow: Nauka, 736 pp. (in Russian)
2. Samarsky, A.A., Moiseenko, B.D. 1965. The efficient shock-capturing scheme for the Stefan multidimensional problems. J. of Comp. Math. and Math. Phys. 5(5): 816-827 (in Russian)
3. Budak, B.M., Solovieva, E.N., Uspensky, A.B. 1965. The difference method with the smoothing of coefficients for the Stefan problem solution. J. of Comp. Math. and Math. Phys. 5(5): 828-840 (in Russian)
4. Porkhaev, G.V, Schelokov, V.K. 1980. Prediction of the permafrost soil temperature regime on the builtup territories. Leningrad: Stroiizdat, 112 pp. (in Russian)
5. Kalitkin, N.N. 1978. Numerical methods. Moscow: Nauka, 512 pp. (in Russian)
6. Yanenko, N.N. 1967. The subincremental method of solving multidimensional problems of the mathematical physics. Novosibirsk: Nauka, 196 pp. (in Russian)
7. SNiP 23-01-99. 2000. (Building Norms and Rules). Construction climatology. Moscow: GUP TzPP, 59 pp. (in Russian)
8. SNiP II-3-79\*. 2002. (Building Norms and Rules). Construction heat engineering. Moscow: GUP TzPP, 29 pp. (in Russian)
9. Mikheev, M.A, Mikheeva, I.M. 1973. Heat-transfer principles. Moscow: Energy, 320 pp. (in Russian)

# Predicting the influence of an underground polymeric heating pipe on permafrost

M.P. Akimov

Mathematics and Computer Science Institute, Ammosov Northeastern Federal University  
Kulakovsky St. 48, Yakutsk, Russia 677000, e-mail: mirpet@mail.ru

**Abstract.** Semicommercial cross-linked polyethylene pipes insulated with polyurethane foam in a polyethylene casing are in test operation for district hot water and heat distribution in Central Yakutia. This study was undertaken to establish how the buried, insulated polymeric pipeline would affect the surrounding ground temperatures during its operation life in order to develop recommendations for future use of these promising pipelines in cold climates, as well as to offer amendments to the existing departmental and regional building codes and regulations. Based on the Stefan solution, the process of soil thawing-freezing around the buried heat distribution pipe of cross-linked polyethylene insulated with polyethylene-cased polyurethane foam in the suburban area of Yakutsk was examined to predict the long-term dynamics of the thaw boundary. It is predicted that the depth of thaw will stabilize at about 3.5 m in 11 years of pipe operation. The results obtained will be useful in selecting measures for providing the stability of heat and hot water distribution lines.

**Keywords:** heat distribution pipe; soil; Stefan problem; algorithm; computing experiment; depth of thaw.

## Прогнозирование влияния подземного полимерного трубопровода теплоснабжения на вечномёрзлые грунты

М. П. АКИМОВ

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова  
Институт математики и информатики  
Россия 677000, г. Якутск, ул. Кулаковского 48, КФЕН, ИМИ, e-mail: mirpet@mail.ru

**Аннотация.** В настоящее время в Центральной Якутии эксплуатируются опытно-промышленные варианты внутриквартальных подземных трубопроводов горячего водоснабжения и теплоснабжения из сшитого полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Исследование динамики температурного поля подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией в процессе эксплуатации на вечномёрзлый грунт позволит разработать рекомендации по применению перспективных трубопроводов в регионах холодного климата, а также будет способствовать внесению изменений в существующие отраслевые и строительные нормативные документы. На основе решения задачи Стефана исследуется процесс оттаивания-промерзания грунтов вокруг подземного трубопровода теплоснабжения из сшитого полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, эксплуатируемой в пригороде г. Якутске с целью прогнозирования динамики границы протаивания на длительный срок. Приводятся результаты прогнозирования теплового режима грунта. Установлено, что после 11 лет эксплуатации теплопровода глубина протаивания стабилизируется и достигает примерно 3,5 м. На основе полученных данных могут быть выбраны мероприятия по сохранению устойчивости тепловых сетей.

**Ключевые слова:** теплопровод; грунт; задача Стефана; алгоритм; вычислительный эксперимент; глубина протаивания.

# Прогнозирование влияния подземного полимерного трубопровода теплоснабжения на вечномёрзлые грунты

М. П. Акимов

## Введение

В настоящее время в Центральной Якутии эксплуатируются опытно-промышленные бесканальные варианты внутриквартальных подземных трубопроводов горячего водоснабжения и теплоснабжения из сшитого полиэтилена, армированного нитью из арамидного волокна (кевлара), с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Нормативная база по проектированию и монтажу таких трубопроводов отстает от требований практики. Исследование динамики температурного поля подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией в процессе эксплуатации на вечномёрзлый грунт является актуальной задачей, решение которой позволит разработать рекомендации по применению перспективных трубопроводов в регионах холодного климата, а также будет способствовать внесению изменений в существующие отраслевые и строительные нормативные документы. В то же время, численному моделированию теплового взаимодействия трубопровода с грунтом уделяется недостаточное внимание.

При решении задачи методом конечных разностей трудности возникают вследствие сложности рассматриваемой области. В плоском случае границы расчетной области представляют собой отрезки прямых и полуокружностей, что затрудняет выбор системы координат для построения расчетной сетки. Обычно такую задачу решают, используя уравнение теплопроводности в декартовой системе координат [1]. Такой подход для определения температурного поля в многослойной трубе осложняется ввиду наличия условий теплового контакта между слоями. При исследовании влияния теплоносителя в трубе на тепловое состояние грунта, приближенное задание границ в непосредственной близости от теплообменной поверхности может привести к существенным погрешностям при определении границ оттаивания. Для более точного описания температурного поля в окрестности трубы с теплоносителем перспективным представляется решение задачи теплопроводности в полярных координатах.

## Постановка задачи

Примем допущение, что температурный режим теплоносителя в трубопроводе вдоль трубы меняется слабо, а величина заглубления теплопровода практически не меняется по трассе, что позволяет пренебречь тепловыми потоками вдоль теплопровода. Тогда задачу о формировании температурного режима в системе «труба-грунт» можно рассматривать как двухмерную в полярных координатах (рис. 1).

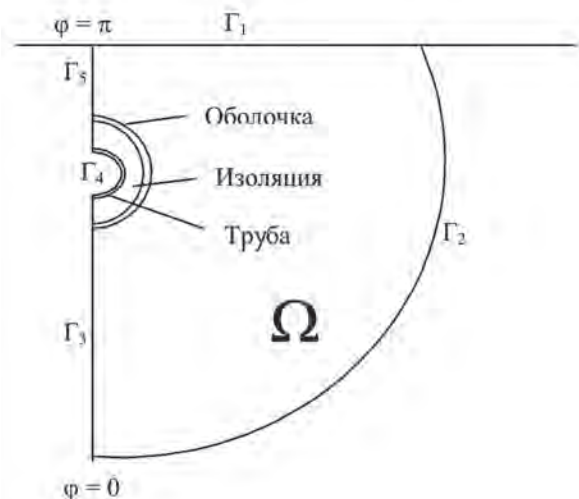


Рис. 1. Расчетная область грунта вокруг теплопровода.

Математическая постановка задачи Стефана со сглаженными коэффициентами формулируется следующим образом: Требуется определить нестационарное температурное поле  $T(r, \varphi, t)$ , удовлетворяющее уравнению теплопроводности в полярных координатах:

$$c\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right),$$
$$(r, \varphi) \in \Omega \quad (1)$$

граничному условию на дневной поверхности грунта:



$$\lambda \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \sin \varphi - \frac{\partial T}{\partial r} \cos \varphi \right) \Big|_{\Gamma_1} = -\alpha (T(r, \varphi, t) - T_{\text{окр}}(t)) \quad (2)$$

граничным условиям на границах  $\Gamma_2, \Gamma_3$  и  $\Gamma_5$ :

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \sin \varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \cos \varphi \right) \Big|_{\Gamma_2} = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{\Gamma_5} = 0; \quad (4)$$

граничному условию на внутренней поверхности теплопровода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha (T(r, \varphi, t) - T_{\text{воды}}(t)) \quad (5)$$

и начальному условию:

$$T(r, \varphi, 0) = T_H(r, \varphi) \quad (6)$$

На границах слоев заданы условия идеального теплового контакта:

$$\begin{cases} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i-0} = \lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i+0} \\ T(r_{i-0}, \varphi, t) = T(r_{i+0}, \varphi, t) \end{cases} \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

Численное решение производится на неравномерной сетке  $\hat{\omega}_{h\tau}$ :

$$\hat{\omega}_{h_1} = \{r_i, i = \overline{0, n_1}, h_i^1 = r_i - r_{i-1}, i = \overline{1, n_1}\}, \quad h^1 = h_r,$$

$$h_{i+1}^1 = r_{i+1} - r_i$$

$$\hat{\omega}_{h_2} = \{\varphi_k, k = \overline{0, n_2}, h_k^2 = \varphi_k - \varphi_{k-1}, k = \overline{1, n_2}\},$$

$$h^2 = h_\varphi, \quad h_{k+1}^2 = \varphi_{k+1} - \varphi_k$$

$$\hat{\omega}_\tau = \{t_j, t_j = t_{j-1} + \tau_j, j = \overline{1, N_\tau}, t_0 = 0, t_{N_\tau} = T_G\},$$

где  $T_G$  - время конца счета

$$\hat{\omega}_{h\tau} = \hat{\omega}_{h_1} \times \hat{\omega}_{h_2} \times \hat{\omega}_\tau, \quad \hat{h} = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}.$$

Двумерное уравнение теплопроводности (1) записывается в форме удобной для ре-

шения методом сквозного счета, решается численно-конечно-разностным методом. Используется схема расщепления в целых шагах с методом суммарной аппроксимации.

На каждом временном интервале  $[t_{j-1}, t_j]$  решаются две одномерные задачи с граничными условиями, полученными естественным методом расщепления [2-3].

Решение одной из задач является начальным условием для другой. Алгоритм решения сформулированной задачи заключается в последовательном решении одномерных задач по первому и второму направлениям. Каждую из одномерных задач решаем методом сквозного счета.

### Результаты исследований

Используя предлагаемый алгоритм определения динамики температурного поля прогнозировалась глубина протаивания грунта под воздействием теплопровода, действующего в пригороде г. Якутска при следующих исходных данных:

	Труба из сшитого полиэтилена	Изоляция из пенополиуретана	Оболочка из полиэтилена
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	0,4	0,036	0,46
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	950	25	950
Удельная теплоемкость, Дж/(кг*К)	2300	1470	2000

Геометрические размеры: глубина центра трубы 1 м, радиус трубы 0,05 м, толщина теплоизоляции 0,03 м.

Температуры окружающего воздуха были получены аппроксимацией многолетних метеоданных.

На рис. 2 представлено изменение температуры по времени на различных глубинах грунта под теплопроводом, начиная от отопительного сезона (октябрь), включая его окончание (май) и начало следующего сезона (сентябрь) до начала мая. На графике видно влияние теплопровода на температурный режим грунта на глубине 3,6 м, в то время как глубина сезонного протаивания вечномерзлого грунта без теплопровода составляет около 2,5 м.

На рис. 3 представлены расчетные глубины протаивания грунта в течение 20 лет в

конце отопительного сезона (на начало мая месяца). Расчеты показывают, что после 11 лет эксплуатации теплопровода глубина протаивания стабилизируется.

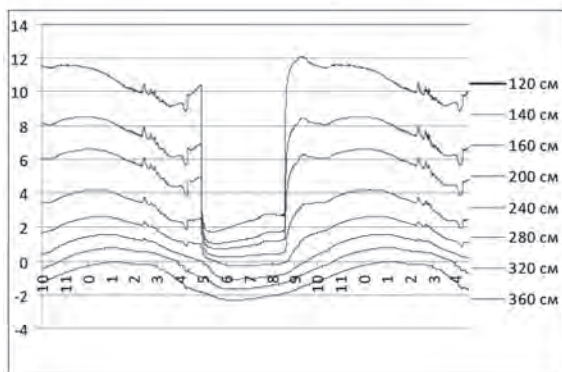


Рис. 2. Изменение температуры по времени на различных глубинах грунта.

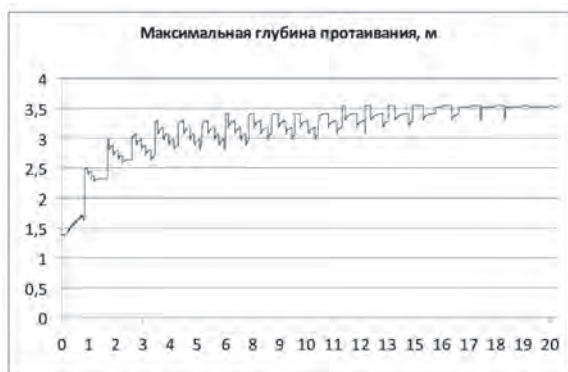


Рис. 3. Изменение максимальной глубины протаивания по времени.

### Заключение

Известно, что в г. Якутске максимальная глубина протаивания вечномёрзлого грунта достигается осенью и составляет около 2,5 м. Расчеты показывают, что под воздействием

теплопровода глубина максимального сезонного протаивания во второй год эксплуатации достигается в январе месяце и составляет примерно 3, 5 м. После 11 лет эксплуатации теплопровода максимальная глубина протаивания устанавливается.

### Список литературы

1. Размазин, Г. А. Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки теплопроводов с вечномёрзлыми грунтами / Г. А. Размазин, Б. В. Моисеев // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов: сборник материалов I Международной научно-практической конференции. – Пенза, ПДЗ, 2000. – С.106–110.

2. Гордезиани, Д. Г. О моделировании третьей краевой задачи для многомерных параболических уравнений в произвольной области одномерными уравнениями / Д. Г. Гордезиани, Г. В. Меладзе // ЖФМ и МФ. – 1974. – Т. 14, №1. – С. 246–250.

3. Охлопков, Н. М. О некоторых разностных методах решения задач для дифференциальных уравнений / Н. М. Охлопков. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. – 209 с.

### References

1. Razmazin, G.A., Moiseev, B.V. 2000. Thermal interaction of trenchless heat distribution pipes with permafrost. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, Problems of Building, Engineering Support and Ecology of Cities*. Penza: PDZ, pp. 106-110. (in Russian)

2. Gordeziani, D.G., Meladze, G.V. 1974. On modeling the third boundary problem for multi-dimensional parabolic equations in random field by one dimensional equations. *Russian Journal of Calculus Mathematics and Mathematical Physics* 14 (1): 246-250. (in Russian)

3. Okhlopov, N.M. 1986. *Some Differential Methods of Solving Problems for Differential Equations*. Irkutsk: Irkutsk University Press, 209 pp. (in Russian)

## Innovation engineering solutions for thermal stabilization of soils at construction in permafrost zone

R.M. Bayasan<sup>1</sup>, T.V. Bayasan<sup>1</sup>, G.P. Pustovoi<sup>2</sup>, S.I. Golubin<sup>3</sup>, A.N. Tseeva<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Inter Heat Pipe Corporation

Paustovskogo St. 4, of.86, Moscow, Russia 117463, e-mail: asanov.imr@yandex.ru

<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

<sup>3</sup>VNIIGAS Institute, Moscow, Russia

<sup>4</sup>YakutPNIIS Institute, Yakutsk, Russia

**Abstract.** Long-length composite thermal stabilizers DOU (Russian abbreviation for "long-length cooling unit") designed by "Inter Heat Pipe" Corp. have vertical or horizontal composite evaporators with the total length up to 40 m, where each section is two-phase heat pipe also called thermal stabilizer. They permit thermal stabilization of permafrost under buildings and structures up to 80 m in width as well as deep freezing and cooling of soils. The paper presents efficiency evaluation for these new thermal stabilizers as well as thermotechnical calculations results obtained during foundation design at Yakutsk and on Yamal peninsula.

**Keywords:** permafrost; thermal stabilization; bases of structures.

## Инновационные технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых пород при строительстве в криолитозоне

Р. М. Баясан<sup>1</sup>, Т. В. Баясан<sup>1</sup>, Г. П. Пустовойт<sup>2</sup>, С. И. Голубин<sup>3</sup>, А. Н. Цева<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АОЗТ "Интер Хит Пайп"

Россия 117463, Москва, ул. Паустовского, д. 4, оф. 86, e-mail: asanov.imr@yandex.ru

<sup>2</sup>Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Россия

<sup>4</sup>ОАО «ЯкутПНИИС», Якутск, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена разработке, созданию и внедрению многосекционных длинномерных охлаждающих устройств (ДОУ), состоящих из отдельных двухфазных термосифонов. ДОУ предназначены для инженерной защиты и термостабилизации мерзлых грунтов в основаниях площадных сооружений больших размеров, устьях скважин, а также для создания мерзлотных завес, мерзлого ядра земляных плотин, дамб и т.п. в криолитозоне. Представлены принципиальные конструктивные решения по ДОУ, приведены их технические и теплофизические характеристики и результаты теплотехнических расчетов, выполненных при проектировании фундаментов объектов в г. Якутск и на п-ове Ямал.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; термостабилизация; основания сооружений.

## Инновационные технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых пород при строительстве в криолитозоне

Р. М. Баясан, Т. В. Баясан, Г. П. Пустовойт, С. И. Голубин, А. Н. Цеева

### Введение

В последние 20 лет в России при строительстве, эксплуатации и ремонте объектов промышленного и гражданского назначения в криолитозоне нашла широкое применение технология термостабилизации мерзлых грунтов оснований и фундаментов, как наиболее эффективный активный метод инженерной защиты многолетнемерзлых пород (ММП) от деградации. Такие двухфазные термосифоны, как термостабилизаторы типа ТМД-4, ТМД-5, ТМД-5М, ТСГ-6 и др., разработанные и изготавливаемые в АОЗТ «Интер Хит Пайп», многие годы успешно эксплуатируются на объектах ОАО «Газпром», РАО ЕЭС, РАО РЖД, и т.д. в Западной и Восточной Сибири, республике Саха, на Чукотке [1, 4, 5]. Такие одиночные термостабилизаторы имеют максимальную общую длину не более 12,0 м., что обусловлено условиями транспортировки и монтажа на месте внедрения. Это сокращает сферы возможного применения технологии и технических средств термостабилизации ММП.

Для решения задач инженерной защиты грунтов оснований площадных сооружений больших размеров, устьев скважин, а также создания мерзлотных завес, мерзлого ядра земляных плотин, дамб и т.п. глубинами в десятки метров в «Интер Хит Пайп» были проведены исследования с целью разработки и создания длинномерного охлаждающего устройства. При этом длинномерный двухфазный термосифон должен был обладать термодинамическими и теплофизическими характеристиками, близкими к одиночным термосифонам, по возможности полной заводской готовностью, а также удобством транспортировки и монтажа на месте внедрения с учетом крайне сложных природно-климатических условий районов распространения вечной мерзлоты. В процессе исследования стало очевидно, что такие термосифоны должны быть составными и состоять из нескольких секций – отдельных двухфазных термосифонов (ДТ).

### Исследования и конструкции

Знания теплофизических процессов в отдельном ДТ недостаточно для разработки и конструирования составного термосифона. Это связано, в основном, с решением двух задач. Первая – необходимость обеспечения

эффективной теплопередачи на участках контакта между смежными ДТ, т.е. в зонах перекрытия одним термосифоном другого. Вторая – в составном ДТ, состоящем из нескольких секций, в этих последних необходимо с большой точностью знать дозу заправки теплоносителем каждого термосифона. Это обусловлено тем, что в зонах испарения ДТ на участках контактов длина «лужи» должна быть минимальной ввиду того, что она блокирует часть зоны конденсации смежной секции. Для решения этих задач были проведены исследования течения жидкой пленки теплоносителя в секциях вертикального и наклонного ДТ. Полученные результаты позволили определять дозу теплоносителя для каждой секции с учетом изменения граничных условий в течение рабочего сезона.

Были установлены расчетные соотношения для определения длин участков контакта соседних секций ДТ с учетом материала корпуса, количества и последовательности соединяемых секций. Разработаны технические и конструктивные решения по вариантам соединения отдельных секций, имеющих как цилиндрические (трубчатые) корпуса, так и корпуса других профилей.

Исследования показали, что наиболее эффективным техническим решением является применение в составном ДТ в качестве отдельных секций уже апробированных многие годы и широко применяемых в строительной практике термостабилизаторов типа ТМД-5(5М). Эти ДТ обладают высокой хладопроизводительностью, практическим отсутствием температурного градиента по длине и другими высокими теплофизическими характеристиками. Изготавливаются они из специальных алюминиевых сплавов и имеют корпус  $\Omega$ -образного профиля, что очень важно для эффективного сопряжения поверхности контактов двух смежных термосифонов. В процессе исследований для корпусов с таким профилем была разработана и испытана конструкция соединительных узлов, обеспечивающих перепад температуры на контакте секций не более  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

В результате комплексных исследований и испытаний была разработана и создана конструкция составного ДТ марки ДОУ-1. ДОУ-1 состоит из нескольких испарительных и одной испарительно-конденсаторной секции. ДОУ-1



могут быть как прямолинейного типа (для вертикального применения на нефтяных и газовых скважинах), так и слабонаклонного типа с «Г»-образной испарительно-конденсаторной секцией (для горизонтального применения на большеразмерных площадных сооружениях). Это инновационное решение (конструкция ДОУ-1) запатентовано.

### Расчеты и результаты

В настоящей работе представлены инновационные технические решения по термостабилизации ММП, разработанные для применения при проектировании и возведении фундаментов зданий с полами по грунту, сооружаемых в г. Якутск и на засоленных грунтах Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) полуострова Ямал. В обоих случаях при предпроектной проработке выполнялись серии прогнозных теплофизических расчетов методом математического моделирования с использованием программы ТЕПЛО, разработанной на кафедре геоэкологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Реконструируемое здание торгового центра в г. Якутске длиной 60 м и шириной 36 м разделено условно по длине на две части. Правая половина здания имеет вентилируемое подполье, обеспечивающее сохранение грунтов основания в твёрдомёрзлом состоянии. В левой половине здания длиной 30 м проектом предусмотрены полы по грунту при температуре воздуха в помещении  $+18^{\circ}\text{C}$ . Для предотвращения многолетнего оттаивания грунтов основания было предложено устройство под левой половиной здания комбинированного варианта из теплоизоляции и охлаждающей системы горизонтальных (слабонаклонных) термосифонов (термостабилизаторов). В качестве теплоизоляционного материала был принят пеноплекс, а в качестве охлаждающей системы – составные ДТ типа ДОУ-1. Их предполагалось устанавливать с определенным шагом вдоль оси здания попарно навстречу друг другу (18 м + 18 м).

Целью работы при проведении теплофизических расчётов было обоснование выбора параметров охлаждающей системы (количества ДОУ-1, шага их расстановки) и мощности теплоизоляционного экрана, нейтрализующих тепловое воздействие здания на грунты основания и обеспечивающих их сохранение в мёрзлом состоянии на весь период эксплуатации объекта. Главная задача – выбор оптимального расстояния между соседними ДОУ-1, т.е. шага их расстановки. Это расстояние должно обеспечивать надёжное смыкание

льдогрунтовых цилиндров между собой и с подстилающими вечномёрзлыми грунтами уже к концу первого холодного сезона.

Задачи решались в двухмерной постановке. Рассматривался вертикальный разрез по продольной оси здания, что соответствует наихудшему случаю, то есть наибольшему тепловому воздействию здания на подстилающие грунты. Глубина заложения составных ДТ (ДОУ-1) была принята равной 1,1–1,2 м. За начальный момент моделирования температурных полей принималось начало холодного сезона – 1 октября. Считалось, что в этот момент мощность талого слоя грунта под зданием, образовавшегося при выполнении работ по устройству охлаждающей системы, составляет 2,0 м. Такой выбор сделан по принципу "наихудшего случая" – в действительности количество оттаявшего грунта будет, несомненно, меньше.

Основные результаты моделирования представлены на рисунках 1–3. Расчеты выполнялись для шага расстановки ДОУ-1, равного 3,0 м и 3,2 м. Анализ результатов показал, что даже при шаге 3,2 м льдогрунтовые цилиндры смыкаются полностью. Однако, учитывая, что шаг фундаментов колонн на объекте составляет 6,0 м, на практике более удобным будет выбор шага расстановки ДОУ-1, равного 3,0 м. При шаге 3,0 м потребуется 11 линий установки ДОУ-1.

Толщина теплоизоляции была выбрана из условия недопущения оттаивания в тёплый сезон ниже уровня заложения ДОУ-1 (1,1–1,2 м). По результатам теплотехнических расчетов были определены параметры теплоизоляции: толщина 100 мм при коэффициенте теплопроводности  $0,032 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Таким образом, нами были рекомендованы в качестве охлаждающей системы составные ДТ типа ДОУ-1 модификации 03. Они состоят из трех секций: двух прямолинейных испарительных секций и одной испарительно-конденсаторной Г-образной секции. Горизонтальная (слабонаклонная) испарительная часть ДОУ-1 должна составлять 18,1 м, а вертикальная конденсаторная часть – 2,4 м. При этом конденсатор должен отстоять от внешней стены здания примерно на 0,1 м. Варианты крепежа надземной части конденсатора (высотой примерно 1,3 м) предложены в специальной «Инструкции по монтажу и установке ДОУ-1». Таким образом, общая длина ДОУ-1 модификации 03 в этом проекте будет равна 20,5 м, а их общее количество составит 22 шт. (по 11 шт. с каждой стороны здания).

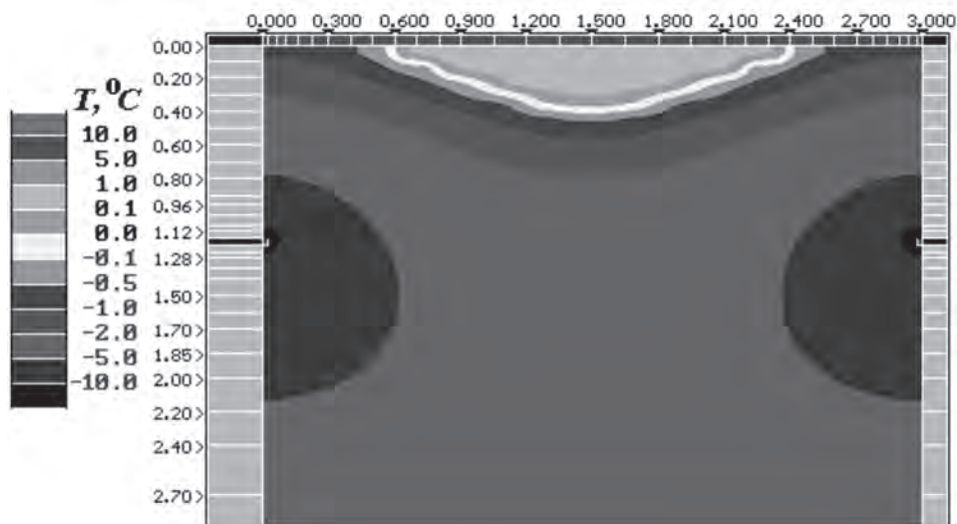


Рис. 1. Фрагмент температурного поля между ДТ при шаге расстановки 3,0 м к концу первого зимнего сезона (1 апреля) – полное смыкание льдогрунтовых цилиндров.

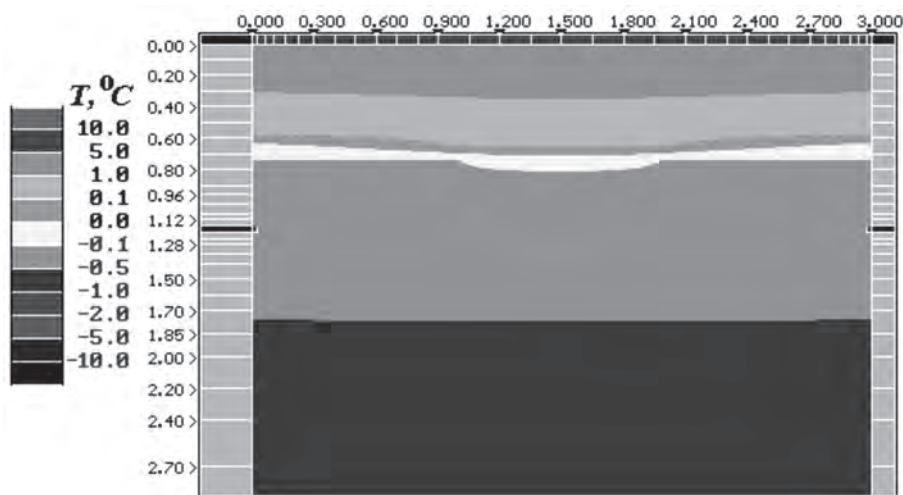


Рис. 3. Фрагмент температурного поля между ДТ при шаге расстановки 3,0 м к концу лета второго года (1 октября) – равномерное оттаивание на 34 см.

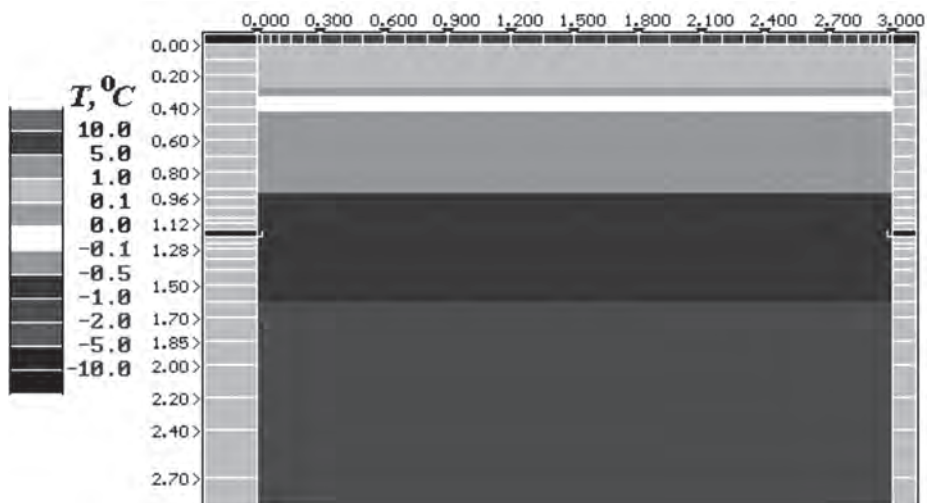


Рис. 2. Фрагмент температурного поля между ДТ при шаге расстановки 3,0 м к концу лета первого года (1 октября) – максимальное оттаивание (в замковой плоскости) – 72 см, минимальное (над ДТ) – 65 см.

При проектировании «теплых стоянок» транспортной техники на Бованенковском НГКМ основной задачей было обеспечение удобного подъезда к зданиям. Необходимо было минимизировать воздействие нагрузок от транспорта, а также обеспечить въезд в здания транспортных средств без устройства пандусов. Одним из предлагаемых проектно-технических решений являлось возведение зданий со свайными фундаментами и полами по грунту. При непосредственном контакте сооружения с ММП грунты основания воспринимают существенную тепловую нагрузку от здания, что приводит к их растеплению, неравномерным осадкам и деформациям фундамента. К деформациям также может привести воздействие нормальных сил пучения. Все эти причины определили необходимость при проектировании предусматривать применение технологий и технических средств инженерной защиты объектов, сооружаемых в криолитозоне, отображенных в инновационных проектно-технических решениях, учитывающих всю специфику взаимодействия в геотехнической системе «сооружение – ММП».

Поставленная задача решалась с помощью применения составных многосек-

ционных ДТ слабонаклонного типа ДОУ-1 производства «Интер Хит Пайп» в комплексе с теплоизоляцией. Исходная расчетная модель теплового влияния здания на грунты основания, конструктивная схема термостабилизации грунтов основания проектируемого здания и графики распределения температур в грунтах под зданием по результатам моделирования приведены в работе [2].

Анализ результатов моделирования показал, что уже в первый год работы ДОУ-1 к концу летнего периода температура грунта основания была ниже минус 4 °С, что обеспечивает необходимую несущую способность свай. В последующие годы аккумуляция холода будет возрастать, а температура грунтов основания – снижаться.

Разработанные специальные инновационные проектно-технические решения позволяют возводить здания с полами по грунту по принципу I, а также обеспечивают несущую способность свай, не допуская развития деформаций сооружений. Предложенные проектные решения успешно прошли экспертизу и были реализованы при строительстве объектов обустройства Бованенковского НГКМ (рис.4).



Рис. 4. Засыпка грунтом смонтированных ДОУ-1 модификации 03 при строительстве здания с полами по грунту на Бованенковском НГКМ.

### **Заключение**

Многосекционные ДОУ-1, базирующиеся на использовании термостабилизаторов ТМД-5, обладают теми же теплотехническими характеристиками: высокой удельной эффек-

тивностью охлаждения, малым временем самозапуска (выхода на рабочий режим), быстрым темпом вмораживания, удлиненным периодом активной работы [3]. Конструктивная специфика составного ДТ типа ДОУ-1 имеет

целый ряд существенных преимуществ и расширяет возможности применения технологий и средств термостабилизации в любых самых сложных природно-климатических условиях. К ним относится, во-первых, полная заводская готовность, что гарантирует высокое качество, в отличие от применяемого иногда охлаждающего оборудования, изготовляемого и заправляемого на месте монтажа и установки. Это делается в любое время суток (днем или ночью), при снегопаде и сильных морозах, что не может не отразиться на качестве и надежности такого охлаждающего оборудования. Следующее преимущество: многосекционность ДООУ-1, как вертикальных, так и горизонтальных. Вес каждой секции длиной до 10 м с учетом материала корпуса (алюминиевых сплавов) не превышает 11 кг (1 погонный метр ДООУ-1 весит 1,1 кг). При этом нет проблем с монтажом ДООУ, ибо секции собираются на месте быстро и последовательно; и второе – расширяются возможности применения и снимаются проблемы при транспортировке и монтаже ввиду малого веса и габаритов отдельных секций ДООУ-1, отпадает необходимость в использовании специальной подъемной техники. Тем самым многосекционность расширяет возможности применения средств термостабилизации грунтов оснований объектов практически любой площади до 80 м шириной (на сегодняшний день).

Особо отметим возможность установки ДООУ-1 посекционно в термокарманы, т.е. в заранее уложенные с определенным шагом простые трубы в процессе строительства. В этом случае монтаж ДООУ-1 можно осуществлять уже после возведения здания, не привязываясь к периодам возможного выполнения строительно-монтажных работ (и без того коротким в суровых условиях Крайнего Севера).

#### Список литературы

1. Баясан, Р. М. Вероятность, детерминизм и новая техника в проблеме устойчивости вечномерзлых оснований / Р. М. Баясан, А. Г. Коротченко, Г. П. Пустовойт // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2002. – № 5. – С. 26–31.

2. Баясан, Р. М. Возведение фундаментов типа "полы по грунту" на засоленных грунтах Бованен-ковского НГКМ / Р. М. Баясан, А. А. Иванов, С. И. Голубин // Инженерная геология. – 2010. – № 1. – С. 40–44.

3. Bayasan, R. M. Technique for thermal stabilization of soils at bases of structures in permafrost regions / R. M. Bayasan, A. G. Korotchenko, A. D. Lobanov, G. P. Pustovoyt // Journal of Glaciology and Geocryology. – 2004. – Vol. 26 (suppl.). – P. 201–206.

4. Bayasan, R. M. Use of two-phase heat pipes with the enlarged heat-exchange surface for thermal stabilization of permafrost soils at the bases of structures / R. M. Bayasan, A. G. Korotchenko, G. P. Pustovoyt, N. G. Volkov // Applied Thermal Engineering (ISSN 1359-4311). – 2008. – Vol. 28, № 4. – P. 274–277.

5. Tseeva, A. N. Increasing of pile foundations bearing capacity by using of thermostabilizers with small diameter in cryolithozone of Russia / A. N. Tseeva, R. M. Bayasan, G. P. Pustovoyt // Ninth Int. Conference on Permafrost, 29 June – 3 July 2008, Fairbanks, Alaska. – 2008. – Vol. 2. – P. 1787–1792.

#### References

1. Bayasan, R.M., Korotchenko, A.G., Pustovoyt, G.P. 2002. Foundation stability on permafrost: probability, determinism and new technique. *Soil mechanics and foundation engineering* 5: 26-31

2. Bayasan, R.M., Ivanov, A.A., Golubin, S.I. 2010. Foundation construction with "floor at the ground" on saline permafrost in Bovanenkovo gas field. *Engineering Geology* 1: 40-44 (in Russian)

3. Bayasan, R.M., Korotchenko, A.G., Lobanov, A.D., Pustovoyt, G.P. 2004. Technique for thermal stabilization of soils at bases of structures in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 26(suppl): 201-206

4. Bayasan, R.M., Korotchenko, A.G., Pustovoyt, G.P., Volkov, N.G. 2008. Use of two-phase heat pipes with the enlarged heat-exchange surface for thermal stabilization of permafrost soils at the bases of structures. *Applied Thermal Engineering* 28(4): 274-277

5. Tseeva, A.N., Bayasan, R.M., Pustovoyt, G.P., Okoemova, A.P. 2008. Increasing of pile foundations bearing capacity by using of thermostabilizers with small diameter in cryolithozone of Russia. *Ninth Int. Conference on Permafrost*, 29 June – 3 July 2008, Fairbanks, Alaska 2: 1787–1792



## Monitoring of foundation soils below the Ice Sports Complex at Magadan

S.A. Gulyi, I.K. Rozhelevskiy

North-Eastern Permafrost Research Station, Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Gagarin St. 12, Magadan, Russia 685024, e-mail: svnims@mail.ru

**Abstract.** Monitoring of the foundation soils below the Ice Sports Complex at Magadan was initiated in 2006. The foundation was designed for thawed conditions. Observations in 2010 showed that the soils had frozen. The reason was that the Ice Sports Complex had been used in unheated mode during the last two years. Within the building parameter, the soils had frozen to 0.5-1.5 m below the base of the foundation. Deformations of the structural elements indicate the development of frost heave. Based on the physical and mechanical parameters of the soils obtained in 2006 and 2010, verifying calculations of bearing-value and deformations ability of soils were performed and several scenarios of foundation performance under various anticipated permafrost and hydrological conditions were analyzed. Modeling results indicate that after 4 years of unheated operation the foundation soils will have frozen 2.17-3.59 m below the foundations base, and differential deformations will exceed the admissible values. Monitoring of the ground temperature regime beneath the Ice Sports Complex is continuing.

**Keywords:** survey, soil freezing, thaw settlement, frost heave, foundations.

## Мониторинг грунтов оснований фундаментов Ледового дворца в г. Магадане

С. А. Гулый, И. К. Рожелевский

Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция  
института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия 685024, г. Магадан, ул. Гагарина, д. 12, СВНИМС, e-mail: svnims@mail.ru

**Аннотация.** Наблюдения за состоянием грунтов оснований фундаментов Ледового дворца в г. Магадане были начаты в 2006 г. В 2010 г. на этом здании в результате повторного обследования было обнаружено, что грунты в основании фундаментов перешли из талого состояния в мерзлое. Это отличается от условий, заданных проектом. Причина - эксплуатация катка в неотапливаемом режиме в течение последних двух лет. Зафиксировано, что промерзание грунтов внутри помещения произошло на глубину 0,5-1,5 м ниже подошвы фундаментов. Деформации конструкций указывают на проявление сил пучения. На основании данных исследований физико-механических свойств грунтов, полученных во время изысканий 2006 и 2010 гг., были выполнены поверочные расчеты грунтов оснований фундаментов по второй и первой группам предельных состояний, проанализированы возможные сценарии, связанные с работой фундаментов в различных мерзлотных и гидрологических условиях, которые могут иметь место при дальнейшей эксплуатации сооружения. В результате моделирования получено, что через четыре года эксплуатации здания в неотапливаемом режиме грунты основания фундаментов промерзнут на 2,17-3,59 м ниже подошвы фундамента, при этом неравномерные деформации конструкций превысят допустимые значения. В настоящее время мониторинг температурного состояния грунтов Ледового спортивного комплекса продолжается.

**Ключевые слова:** обследование; промерзание грунтов; осадка; пучение; фундаменты.

# Мониторинг грунтов оснований фундаментов Ледового дворца в г. Магадане

С. А. Гулый, И. К. Рожелевский

## 1. Введение

Город Магадан характеризуется островным распространением вечномёрзлых грунтов. В связи с этим при строительстве зданий и сооружений предпочтение отдавалось тем участкам города, где фундаменты можно было опереть на талые грунты. Казалось, что такое решение навсегда снимет проблему обеспечения их устойчивости. Как показало время – это происходит не всегда. В настоящее время проблемы возникли со зданиями, фундамент и коробка которых были возведены много лет назад на надёжном талом основании, но само сооружение по различным причинам, так и не было сдано в эксплуатацию. Отсутствие отопления в таких сооружениях всего за несколько лет приводит к промерзанию грунтов ниже подошвы фундаментов [1]. Это вполне закономерно, так как среднегодовая температура воздуха в г. Магадане составляет  $-3,5^{\circ}\text{C}$  [2].

К сожалению, в процессе обследований зданий, проводимых перед вводом их в эксплуатацию после длительной консервации, не всегда обращается внимание на изменение мерзлотных условий. К каким последствиям это может привести удалось выяснить во время мониторинга и исследования грунтов оснований фундаментов Ледового дворца в г. Магадане.

## 2. Краткая характеристика обследованного сооружения

Ледовый дворец – это первое в г. Магадане воздухоопорное сооружение с полимерной оболочкой в виде купола. Он состоит из спортивного зала, примыкающих к нему административно-бытовых помещений и двух пристроек. В одной из них размещены морозильные агрегаты, в другой – система отопления и оборудование для поддержания требуемого давления в воздухоопорной оболочке.

Спортивный зал, как и все пристройки к нему, выполнены в каркасно-монолитном варианте, что отвечает требованиям сейсмостойкого строительства для районов, где возможны землетрясения силой в 6 и более баллов. Основу несущего каркаса сооружения составляют железобетонные колонны высотой 4,8 м, установленные на столбчатые фундаменты из монолитного железобетона с шагом

6 м по всему периметру спортивного зала. Колонны каркаса по верху обвязаны неразрезной железобетонной балкой. Наружные стены спортивного зала изготовлены из монолитных железобетонных панелей толщиной 200 мм и утеплены трехслойными сэндвич-панелями. Многослойная воздухоопорная оболочка купольного типа опирается по всему периметру сооружения на неразрезную балку.

## 3. Проектное решение фундаментов

Согласно проекту в качестве основания фундаментов под спортивную арену приняты талые гравийно-галечниковые грунты с песком, супеси гравелистые, а также пылеватые пески. В мерзлом состоянии гравийно-галечниковые грунты характеризуются как непучинистые, супеси и пылеватые пески – как слабопучинистые. Криогенная текстура грунтов в основном массивная, реже – слоистая.

При проектировании было принято, что нормативная глубина сезонного промерзания на участке строительства составляет 2,52 м, подземные воды отсутствуют.

Фундаменты рассматриваемого сооружения представляют собой отдельно стоящие монолитные железобетонные столбчатые опоры площадью  $6,3\text{ м}^2$ , заглубление подошвы которых от отметки 0,000 принято равным  $-2,100\text{ м}$ . Монолитные железобетонные столбчатые фундаменты выполнены по бетонной подготовке толщиной 100 мм.

## 4. Результаты обследования

Недостатки, типичные для воздухоопорных сооружений, уже через два года с начала работы спортивного комплекса вынудили эксплуатирующую организацию поставить вопрос о замене надувного купола на металлические, деревянные или железобетонные конструкции перекрытия. В 2010 г. структурному подразделению Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, базирующемуся в г. Магадане, было поручено провести обследование конструкций фундаментов и грунтов их основания, сделать оценку технического состояния подземных железобетонных конструкций, определить возможность их использования в качестве фундаментов при увеличении на них полезной нагрузки в случае замены надувного купола на металлический.

Фактическая ситуация в 2008-2010 гг. на этом сооружении складывалась следующим образом. В соответствии с проектом глубина заложения фундаментов была принята равной 2,2 м. Несмотря на то, что подошва фундаментов заведомо располагалась в слое сезонного промерзания-оттаивания, предполагалось, что под действием тепла отопительной системы внутри помещения грунты под фундаментами будут находиться в талом состоянии в процессе всей эксплуатации здания. Однако, после ввода сооружения в действие события стали развиваться по другому сценарию. Проработав всего несколько месяцев, отопительная система спортивного зала вышла из строя. С этого момента для поддержания купола в рабочем состоянии в помещение катка стали закачивать воздух с температурой, равной температуре наружного воздуха. Это создало предпосылки для промерзания грунтов основания фундаментов внутри помещения.

После проведения полевых и лабораторных работ в 2010 г. было установлено.

- С момента последних изысканий 2006 г. на площадке Ледового дворца произошли изменения температурного и гидрологического состояния грунтов. На момент изысканий 2010 г. грунты снаружи здания находились как в талом, так и в мерзлом состояниях. Внутри сооружения грунты в основании фундаментов находились в мерзлом состоянии на 0,5-1,55 м ниже подошвы фундаментов. Средняя температура грунта на подошве фундаментов на глубине 2,2 м по состоянию на 10 июля 2010 г. составляла  $-0,2$  °С. Поверхностные воды в виде верховодки встречены на глубинах 0,55 – 0,8 м в сезонно-талом слое грунта. Их дебит с апреля по июнь был практически постоянен и составлял  $0,16$  м<sup>3</sup>/час.

- Прочность бетонных конструкций фундаментов соответствует проекту. Под всеми обследованными фундаментами имеется бетонная подготовка. Поверхности бетонных конструкций, соприкасающиеся с грунтами обратной засыпки, обработаны гидроизоляцией.

- Выявлены незначительные деформации конструкций, которые вероятно вызваны промерзанием грунтов под подошвой фундаментов. Разница отметок верха соседних колонн, расположенных над фундаментами, опирающихся на грунты с различными пучинистыми свойствами, составила 3 см.

- Натурные замеры в шурфах показали, что глубина заложения и размеры фундамента соответствуют проектным параметрам.

#### **4.1. Анализ изменения свойств грунтов, происшедших за время эксплуатации здания**

Для того чтобы оценить степень изменения свойств грунтов за последние три года было сделано сравнение плотности, влажности, пористости грунтов. Анализ показал, что ухудшения характеристик грунтов не произошло. Исследование физико-механических характеристик грунтов, взятых в шурфах непосредственно из под подошвы фундаментов показало, что большая часть фундаментов опирается: на плотные песчаные гравийно-галечниковые грунты (ИГЭ-2), имеющие на глубине 2,2 – 3,6 м коэффициент пористости меньше 0,55 при плотности грунтов от 1,9 до 2,24 г/см<sup>3</sup>; на твердые суглинки (ИГЭ-4) с плотностью 1,94-2,04 г/см<sup>3</sup>; на супеси гравелистые (ИГЭ-1) с плотностью 1,66-1,69 г/см<sup>3</sup>. Влажность грунтов: для суглинка твердого и супеси гравелистой - от 0,25 до 0,32 долей ед., для дисперсных грунтов, представленных песками пылеватыми, песком гравелистым, галечниковым грунтом с песком и супесью – от 0,05 до 0,17 долей ед. Залегающие ниже в пределах сжимаемой толщи грунты в основном обладают такими же характеристиками. Относительно слабыми грунтами являются пылеватые пески (ИГЭ-3), подсеченные на глубинах от 2,2 до 8,8 м, и являющиеся основанием двух из 36 фундаментов здания.

Полученные в результате инструментальных и полевых исследований данные были использованы при проведении поверочных расчетов. В связи с тем, что в процессе строительства и эксплуатации катка произошли изменения мерзлотных и гидрологических условий, расчеты были выполнены с учетом как новых (2010 г.), так и старых (2006 г.) характеристик свойств грунтов. В качестве дополнительной нагрузки от веса металлического покрытия на каждый фундамент была принята нагрузка, равная 750 кН, нагрузка от веса колонны, стен и перекрытия равна 250 кН.

#### **4.2. Сценарии развития событий при различных условиях эксплуатации здания**

Рассмотрены возможные сценарии, связанные с работой фундаментов в различных мерзлотных и гидрологических условиях, которые могут произойти в период эксплуатации сооружения с новым покрытием.

**Сценарий 1.** Отопительная система спортивного зала будет введена в действие зимой 2010 г. В ходе дальнейшей эксплуатации сооружения грунты будут находиться в талом состоянии.

При расчете по первой и второй группам предельных состояний принят наиболее худший вариант, при котором рассматриваемые грунты под действием верховодки будут находиться в водонасыщенном состоянии. Во всех рас-четах учитывалась сейсмика.

Вероятность развития такого сценария событий очень мала, так как, во-первых, верхние слои от 1,1 до 2,9 м в основном представлены глинистыми грунтами, сами по себе являющиеся водоупором, во-вторых, присутствие поверхностных вод (верховодки) заканчивается до того, как грунты сезонно-мерзлого слоя (тоже, как и глинистые грунты являющиеся хорошим водоупором) оттают ниже подошвы фундамента. Период, когда может произойти подтопление грунтов – август, сентябрь.

Расчеты показали, что максимально допустимая нагрузка, которую могут воспринять грунты основания в талом водонасыщенном состоянии (расчетное сопротивление грунтов) составляет 24 т/м<sup>2</sup>.

Во всех расчетных случаях для данных изысканий 2006 и 2010 гг. при расчете талых грунтов по деформациям получено, что осадка талого грунта под новой нагрузкой (1000 кН) не превысит 1,74 см. Максимальная мощность сжимаемой толщи составляет 6,05 м.

**Сценарий 2.** Реконструкция здания откладывается. Отопление на катке продолжает отсутствовать еще несколько лет. Грунты под фундаментами продолжают промерзать.

Моделирование глубины промерзания грунта через 2, 3, 4 года после ввода здания в эксплуатацию выполнено по методике [3].

В качестве расчетных слоев взяты инженерно-геологические слои ИГЭ-1, ИГЭ-2, ИГЭ-3. Продолжительность расчетного периода промерзания принята равной 5060 часов, оттаивания – 3700 часов, среднее значение температуры за расчетный период промерзания – минус 11,1 °С, протаивания – плюс 7,7 °С. Теплофизические характеристики изоляции, использованные в расчетах, приведены в таблице 1, грунтов – в таблице 2.

Таблица 1. Теплофизические характеристики пола

	Пол		
	Бетон	Плиты	Бетонная подготовка
$\delta, м$	0,07	0,05	0,1
$\lambda, ккал/(м \cdot час \cdot ^\circ C)$	1,33	0,06	1,2
$R, (м^2 \cdot час \cdot ^\circ C)/ккал$	0,05	0,8	0,08

Таблица 2. Теплофизические характеристики грунтов

Номер ИГЭ	$\gamma, т/м^3$	$W_{ms}$ дол. ед.	$\lambda_m, ккал/м \cdot ч \cdot ^\circ C$	$\lambda_T, ккал/м^3 \cdot ^\circ C$	$C_m, ккал/м^3 \cdot ^\circ C$	$C_T, ккал/м^3$	$Q_{\phi}, ккал/м^3$	$R_m, м^2 \cdot ч \cdot ^\circ C/ккал$	$R_T, м^2 \cdot ч \cdot ^\circ C/ккал$
2	1,9	0,2	2,55	2,35	580	770	30400	0,454902	0,493617
3	1,67	0,27	2,45	2,25	585	760	36072	0,428571	0,466667

Таблица 3. Результаты расчетов глубины промерзания грунтов внутри Ледового спортивного комплекса при отсутствии отопления

№№ п/п	Этапы расчетов	ИГЭ №1	ИГЭ №2	ИГЭ №3
1	Глубина промерзания за первый год (зима 2008-09 гг.), м	2,12	1,35	1,18
2	Глубина протаивания (лето, начиная с 2009 г.), м	1,36	1,15	1,05
3	Время смыкания протаявшего слоя с мерзлым, час	808,92	792,15	789,80
4	Глубина промерзания на второй год (зима 2009-10 гг.), м	3,77	3,00	2,70
5	Глубина промерзания на третий год (зима 2010-11 гг.), м	4,88	4,03	3,64
6	Глубина промерзания на четвертый год (зима 2011-12 гг.), м	5,79	4,84	4,37

Полученные расчетным путем результаты (таблица 3) соответствуют данным, полученным в процессе откопок шурфов внутри здания летом 2010 г. Также расчеты показывают, что в случае отсутствия отопления к концу

2012 г. грунты промерзнут на 2,17-3,59 м ниже подошвы фундаментов.

К каким последствиям это может привести?



В соответствии с данными изысканий часть фундаментов рассматриваемого здания опирается на супесь гравелистую техногенную и пылеватые пески, относящиеся к слабопучинистым грунтам. Зная величину относительной деформации пучения для этих грунтов и мощность промерзающей толщи под фундаментом можно определить возможную деформацию, вызываемую нормальными силами пучения. Относительная деформация пучения этих грунтов находится в пределах от 1,0 до 3,5 см на метр промерзающего слоя [4]. Так как промерзание грунтов под фундаментами в настоящее время составляет 0,5-1,55 м (таблица 3), то, соответственно, абсолютная деформация грунта может достигать 1,8-5,4 см. Именно процессами пучением можно объяснить полученную при нивелировании разницу отметок в 3 см рядом стоящих колонн, фундаменты которых опираются на гравийно-галечниковые грунты, характеризующиеся как непучинистые и пылеватые пески, классифицированные как слабопучинистые. В настоящее время из-за малой величины перемещения следов деформаций на конструкциях не обнаружено. Однако, если в помещении катка будет продолжаться поддерживаться тот же температурный режим с отрицательной среднегодовой температурой, то из-за пучения над этими фундаментами в конструкциях стен могут появиться деформации в виде трещин.

Таблица 4. Результаты расчета осадки оттаивающего грунта под фундаментами спортивной арены Ледового спортивного комплекса

Слой	Вид грунта	$H$ промерзания под подошвой, м	$W$ , дол. ед.	$K_o$	$\alpha_o$	$S_o$ , дол. ед.	$\alpha_o P$ , дол. ед.	$S$ , дол. ед.	$S_{осц.}$ , м
1	Гравийно-галечниковый	1,83	0,12	0,1	-	0,010	-	0,010	0,018
2	Пески пылеватые	1,44	0,18	0,05	0,015	0,006	0,024	0,030	0,044
3	Супесь гравелистая	1,18	0,23	0,08	0,018	0,012	0,029	0,041	0,077
	Пески пылеватые	0,95	0,18	0,05	0,015	0,006	0,024	0,030	
4	Супесь гравелистая	1,3	0,23	0,08	0,018	0,012	0,029	0,041	0,064
	Гравийно-галечниковый	1,1	0,12	0,1	-	0,010	-	0,010	

В результате расчетов осадки получено: при оттаивании грунты, являющиеся основанием фундаментов, под нагрузкой 1,6 кг/см<sup>2</sup> дадут разную осадку, величина которой варьирует от 1,8 до 7,7 см (таблица 4). Осадку будет равномерной в однородных грунтах и неравномерной на соседних фундаментах, опирающихся на гравийно-

Сценарий 3. После реконструкции в помещении здания дают тепло и грунты начинают оттаивать.

По Вотякову [5] при оттаивании грунта под нагрузкой  $P$  общая осадка  $S_p$  будет складываться из осадки оттаивания  $S_o$  и осадки уплотнения

$$S_p = S_o + \alpha_o P = \frac{K_o W}{2,7W + 0,9} + \alpha_o P, \quad (1)$$

где  $\alpha_o$  – относительная осадка за счет уплотнения грунта при увеличении нагрузки на 1 кг/см<sup>2</sup>;  $P$  – нагрузка, кг/см<sup>2</sup> ( $P = 1,6$  кг/см<sup>2</sup>, что соответствует нагрузке на фундамент 1000 кН);  $K_o$  – эмпирический коэффициент для случая свободного оттаивания, зависящий от типа грунта и его влажности;  $W$  – влажность грунта, дол. ед.

В гравийно-галечниковых грунтах коэффициент уплотнения под нагрузкой ничтожно мал по сравнению с коэффициентом оттаивания, поэтому в расчетах он не учитывался.

Нами смоделирован вариант, при котором отопление не будет подаваться в помещение катка еще один год, при этом замена покрытия будет выполняться летом 2011 г. Расчет был выполнен для конкретных слоев грунта, являющихся основанием фундаментов, результаты приведены в таблице 4.

галечниковые грунты и пески пылеватые. Здесь неравномерная осадка может быть в пределах от 2,6 до 5,9 см. Если отопление внутри катка не будет подаваться и далее, то грунты ниже подошвы фундаментов будут продолжать промерзать, что в дальнейшем, при их оттаивании, вызовет еще большую осадку, в том числе и неравномерную.

#### 4.3. Результаты мониторинга грунтов после проведения обследования

Рассмотрев наши предложения о состоянии грунтов Ледового дворца, эксплуатирующая организация приняла срочные меры по устранению причин промерзания грунтов. В конце ноября 2010 г. была запущена отопи-

тельная система - теперь даже в самые сильные морозы температура внутри помещения не понижалась ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Среднезимняя температура в 2010-2011 гг. внутри зала стала равной  $-0,8^{\circ}\text{C}$  (рис. 1), что на  $10,3^{\circ}\text{C}$  теплее, чем зимой 2008-2010 гг.

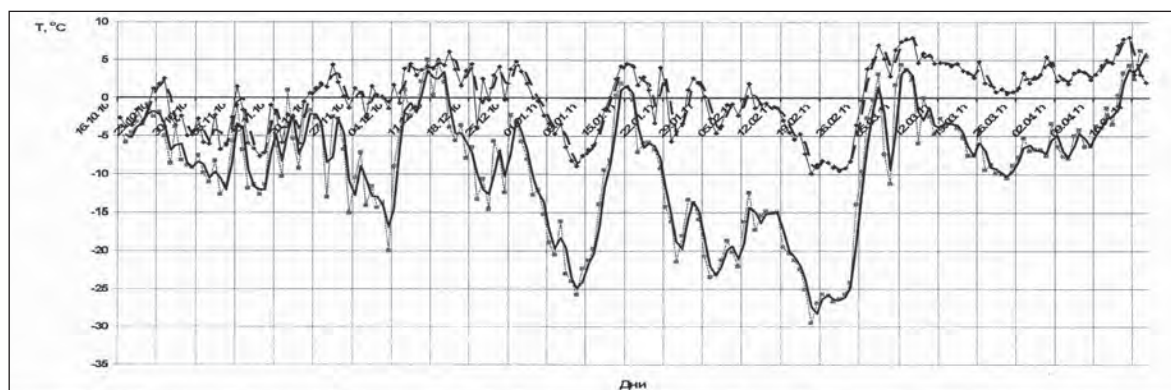


Рис. 1. Изменение температуры воздуха (в 12 часов дня) с октября 2010 г. по апрель 2011 г. внутри (пунктирная линия) и снаружи (сплошная линия) здания Ледового дворца.

#### 5. Выводы

Мониторинг температурного режима грунтов оснований фундаментов Ледового дворца выявил процесс промерзания грунтов ниже подошвы фундаментов внутри помещения спортивной арены. Причина - отсутствие отопления в зимнее время в течение 2008-2010 гг.

Введенная в действие в ноябре 2010 г. отопительная система изменила среднезимнюю температуру внутри ледового дворца с  $-11,1^{\circ}\text{C}$  до  $-0,8^{\circ}\text{C}$ . Однако этого пока недостаточно чтобы грунты ниже подошвы фундаментов перешли из мерзлого состояния в талое.

Полученные результаты требуют большего внимания к фундаментам зданий, вводимым в эксплуатацию после длительной консервации в районах, где среднегодовая температура имеет отрицательное значение.

В строительных нормах следует предусмотреть специальный пункт, что в случае, если подошва фундаментов расположена близко от отметки нормативной глубины промерзания, то при консервации здания на срок более двух лет необходимо выполнять мероприятия, обеспечивающие сохранность грунтов от промерзания.

#### Список литературы

1. Каргаполов, В. Д. Анализ устойчивости кафедрального собора в г. Магадане / В. Д. Каргаполов. – Вестник СМУ. Вып. 2, Магадан, 2004. – С. 93–98. – Библиогр.: с. 98.

2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 33. – Л. : Гидрометиздат, 1990. – 566 с.

3. Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов / ПНИИИС. – М. : Стройиздат, 1989. – 72 с.

4. Орлов, В. О. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений / В. О. Орлов, Ю. Д. Дубнов, Н. Д. Меренков. Л. : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1977. – 184 с.

5. Вотяков, И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов в Якутии // И. Н. Вотяков. – Новосибирск : Наука, 1975. – 176 с.

#### References

1. Kargapolov, V.D. 2004. The analysis of stability of a cathedral in Magadan. *Magadan, Northern International University Bulletin*, issue 2: 93-98 (in Russian)

2. USSR Committee on Hydrometeorology. 1990. *USSR Climate Reference Book, Series 3, Long-Term Data, Parts 1-6, Vol. 33*. Leningrad: Hydrometizdat, 566 pp. (in Russian)

3. PNIIS. 1989. *Recommendations on Predicting the Thermal condition of Frozen Soils*. Moscow: Stroyizdat, 72 pp. (in Russian)

4. Orlov, V.O., Dubnov, U.D., Merenkov, N.D. 1977. *Soil Frost Heaving and Its Influence on the Foundations of Sonstructions*. Leningrad: Stroyizdat, 184 pp. (in Russian)

5. Votyakov, I.N. 1975. *Physical and Mechanical Properties of Frozen and Thawing Soils in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 176 pp. (in Russian)

# Performance of an embankment dam after transition from a frozen to thawed type: the Arkagalinskaya hydroelectric dam on Myaundzha River

S.A. Guliy

North-Eastern Permafrost Research Station, Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Gagarin St. 12, Magadan, Russia 685024, e-mail: svnims@mail.ru

**Abstract.** The Arkagalinskaya hydroelectric dam on the Myaundzha River is one of the oldest hydraulic engineering structures in northeastern Russia. The dam was designed as a frozen embankment. Refrigeration pipes were shut down twenty years ago, and since then the dam has been operated as a thawed embankment. In 1998, geothermal observations were begun by the Permafrost Institute's station in Magadan to monitor the thermal regime in the embankment and foundation. Observations showed that the layers of frozen soil remaining in the embankment had completely degraded by 2001. A zero isotherm in the dam foundation has since been in a stable quasi-steady state, retaining its form to the present. Analysis of the changes that occurred in seepage performance and structural stability since construction indicates that after the transition from a frozen to a thawed type the dam is still capable of failure-free service even if the station is operated at full capacity.

**Keywords:** frozen-type dam; geothermal monitoring.

## Анализ работы плотины, перешедшей с мерзлого на талый тип эксплуатации (на примере плотины АрГРЭС на р. Мьяунджа)

С. А. Гулый

Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция  
Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия, 685024, г. Магадан, ул. Гагарина, д. 12, СВНИМС, e-mail: svnims@mail.ru

**Аннотация.** Плотина Аркагалинской ГРЭС на р. Мьяунджа является одним из старейших гидротехнических сооружений на Северо-Востоке России. По проекту она относится к плотине мерзлого типа. После отключения морозильных колонок последние 20 лет она эксплуатируется как плотина талого типа. СВНИМС начала геотермические наблюдения за термическим режимом тела и основания грунтовой плотины с 1998 г. Установлено, что полная деградация последних остатков мерзлых грунтов в теле плотины произошла в 2001 г. С этого момента нулевая изотерма в основании плотины пришла в устойчивое квазистационарное состояние. Свою форму она сохраняет до настоящего времени. Анализ прошедших изменений статической и фильтрационной устойчивости плотины со времени строительства показал, что после перехода плотины с мерзлого на талый режим работы она по-прежнему способна обеспечить безаварийную работу даже при запуске станции на максимальную мощность.

**Ключевые слова:** плотина мерзлого типа; геотермические наблюдения.

# Анализ работы плотины, перешедшей с мерзлого на талый тип эксплуатации (на примере плотины АрГРЭС на р. Мяунджа)

С. А. Гулый

## Введение

Плотина Аркагаалинской ГРЭС на р. Мяунджа является одним из старейших гидротехнических сооружений на Северо-Востоке России, однако ее главной отличительной особенностью от остальных плотин, эксплуатирующихся на территории криолитозоны, является не возраст. По ряду причин, эта плотина, изначально запроектированная как плотина мерзлого типа, на протяжении последних 20 лет эксплуатируется как плотина талого типа. Фактически на ее примере был проведен эксперимент, моделирующий работу сооружения при потеплении климата, когда искусственное замораживание грунтов перестанет применяться.

В связи с этим важно проанализировать, как проходил переход плотины с мерзлого на талый тип эксплуатации, как он повлиял на ее надежность, что теперь может произойти с плотинной в случае запуска станции на максимальную мощность?

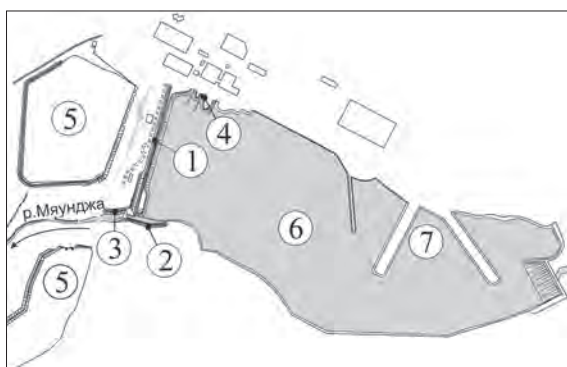


Рис. 1. Схема гидротехнических сооружений Аркагаалинской ГРЭС.

1 – земляная плотина; 2 - бетонная водосливная плотина; 3 – струнаправляющая дамба; 4 – водоприемники; 5 – золошлакоотвалы; 6 – водохранилище, 7 – брызгальные установки.

## Результаты и обсуждение

Строительство плотины р. Мяундже было начато в 1952 г. закончено в 1959 г. Вододерживающая плотина с расчетным напором воды 8 – 9 м длиной 860 м была выстроена по принципу постоянного промораживания суглинистого ядра плотины [1, 2]. В период строительства и первых лет эксплуатации для проморозки использовался холодный зимний воздух. Он прогонялся вентиляторами

через морозильные колонки, заглубленные на 16-25 м относительно поверхности гребня. К моменту начала отсыпки тела плотины эффективность заморозки была очень высокой: на глубину 10-15 м были проморожены даже те участки основания плотины, где первоначально грунты находились в талом состоянии. Таким образом, в 1954-1955 гг. грунты тела и основания земляной плотины находились в мерзлом состоянии. В первом полугодии 1956 г. температура грунтов на глубине 15 м у левобережного примыкания плотины равнялась  $-4^{\circ}\text{C}$ . В конце июня 1956 г. в этом месте впервые была зафиксирована плюсовая температура. Растепление грунтов пошло очень быстро. К августу 1956 г. грунты перешли в талое состояние на глубину 24 м, т.е. ниже основания льдогрунтовой завесы. Их температура составляла плюс  $3-10^{\circ}\text{C}$ . В августе 1957 г. была смонтирована и пущена в эксплуатацию холодильная станция на рассольном хладоносителе. К ней были подключены ранее использовавшиеся морозильные колонки (рис. 2).



Рис. 2. Первая очередь рассолопроводов и морозильных колонок, действовавших на плотине.

Несмотря на это в 1958 г. размеры талой зоны под левобережным примыканием плотины превысили 50 м, как по длине, так и по глубине. В результате оттаивания грунта на верховом откосе образовались продольные трещины и провалы грунта до 3 м, у основания низового откоса наблюдался выход профильтрованной воды. Для снижения фильтрационных потерь был осуществлен комплекс первоочередных мер на участке, где произошло



растепление грунтов. Во-первых, параллельно имеющейся воздушной охлаждающей системе была введена в действие новая морозильная система, работающая на рассольном хладагенте; во-вторых, из суглинка отсыпан экран, переходящий в понур; в-третьих, произведена цементация грунтов основания левобережного участка земляной плотины и бетонного водослива на глубину 40 м. Эти меры позволили к 1961 г. снизить фильтрационные потери до 25 м<sup>3</sup>/ч. В дальнейшем был разработан еще один комплекс мер, направленный на обеспечение стабилизации теплового режима мерзлого грунта и прекращения деградации мерзлых грунтов в основании плотины [3, 4]. К концу 1970-х годов не только левобережный участок, но и все тело плотины было расширено на 40 м со стороны верхового откоса; введена в действие еще одна морозильная система круглогодичного действия; запроектированы и приняты к внедрению брызгальные установки, предназначенные для понижения температуры сбрасываемой воды за счет интенсификации ее испарения перед спуском в водохранилище; увеличен объем водохранилища за счет расширения и углубления ложа в верховой части; сделана замена оборудования насосно-компрессорной станции на более мощное.

Несмотря на это удержать мерзлое ядро и основание плотины от дальнейшего протаивания и полной деградации мерзлых грунтов так и не удалось. СВНИМС начала геотермические наблюдения за термическим режимом тела и основания грунтовой плотины в 1998 г. К этому времени замораживания грунта тела плотины уже не проводилось. Наблюдениями за температурой тела и основания грунтовой плотины установлено, что полная деградация последних остатков мерзлых грунтов в теле плотины произошла в 2001 г. (рис. 3). С этого года нулевая изотерма в основании плотины пришла в устойчивое квазистационарное состояние, сохраняя свою форму до настоящего времени, а сама плотина полностью перешла на талый режим эксплуатации. Следует особо отметить, что этот факт был не только признан, но и узаконен, так как с 2008 г. температура тела и основания плотины уже не была включена в перечень критериальных диагностических показателей, по которым оценивается безопасность гидротехнических сооружений Аркагалинской ГРЭС. Теперь температура тела и основания стала второстепенным, косвенным фактором, по которому судят только о фильтрационных свойствах плотины.

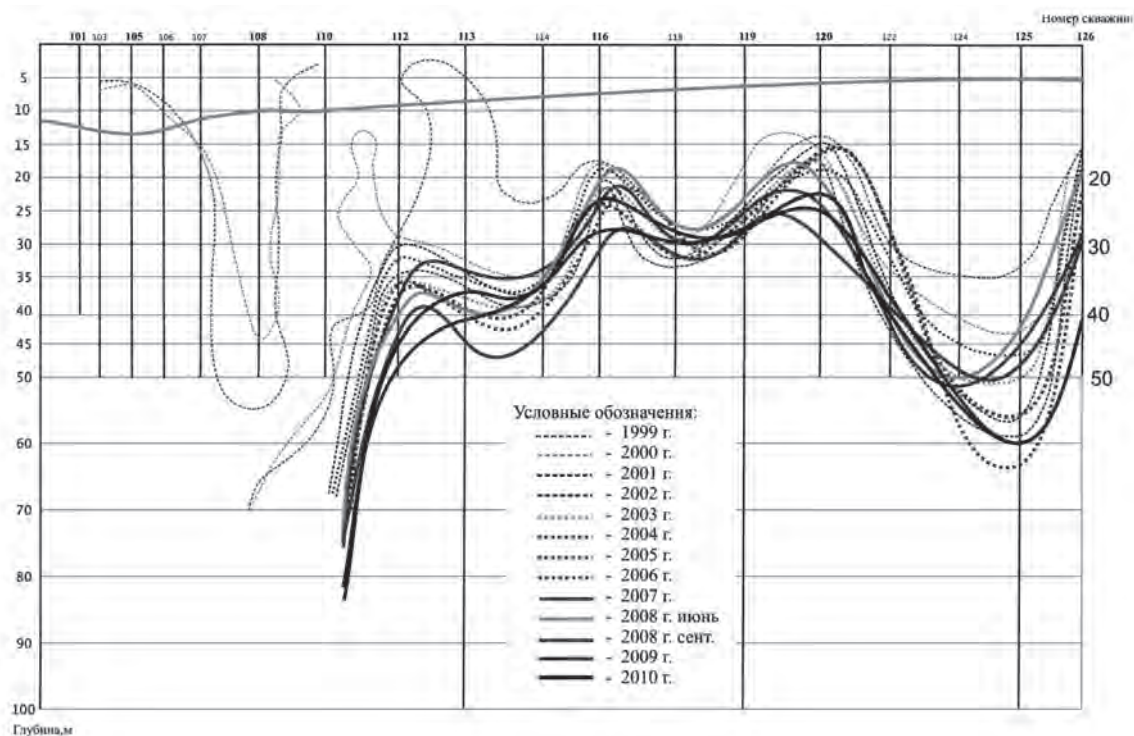


Рис. 3. Схема расположения нулевых изотерм в продольном сечении плотины с 1999 по 2010 гг.

Основная цель плотины - удерживать заданный проектом объем воды в водохранилище независимо от того, в каком она

находится состоянии - талом или мерзлом. Справляется в настоящее время плотина с поставленной задачей? Если говорить только о

плотине, то да. За последние 15 лет во время ежегодных осмотров грунтовой плотины на ее поверхности нами ни разу не были отмечены какие-либо просадки грунта, деформации, повреждения, источники фильтрации. Анализ физико-механических свойств грунтов тела и основания плотины, выполненный на основании проведенных в 2006 г. инженерно-геологических изысканий не выявили ухудшения ее прочностных и деформативных характеристик [5] по сравнению с 1954 г. [2].

Факт фильтрации воды из водохранилища отрицать нельзя из-за наличия дренажного ручья и небольших грифонов в нижнем бьефе, но как видно из положения пьезометрических уровней на плотине фильтрация идет не

через тело плотины, а через ее основание. Значения пьезометрических уровней на разных створах с 2006 по 2010 гг. не превышают критериальных значений  $KI$ , установленных Декларацией безопасности 2008 г. Сама пьезометрическая поверхность только в одном из трех наблюдаемых створах находится в пределах основания плотины (рис. 4), на остальных она располагается на 3-8 м ниже ее основания. Из этого можно сделать вывод, что грунтовая плотина АрГРЭС, находясь в талом состоянии, обладает высокими водонепроницаемыми свойствами и повышение мощности станции никак не отразится на фильтрационных свойствах плотины и ее статической устойчивости.

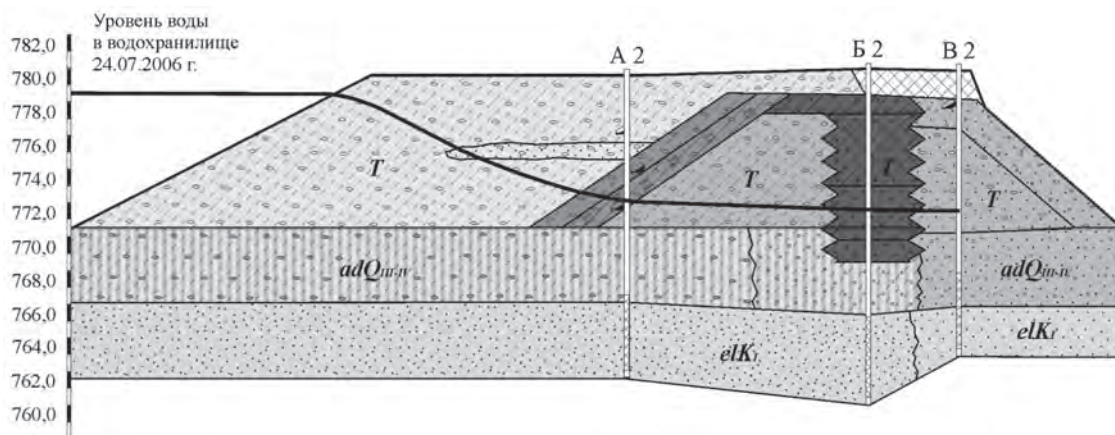


Рис. 4. Схематический инженерно-геологический разрез плотины по пикету 3+50.

*T* – техногенные грунты ядра, тела и уширения плотины; *adQ*<sub>III-IV</sub> – верхнечетвертичные аллювиально-делювиальные отложения; *elK*<sub>1</sub> – элювиальные грунты.

Отсутствие существенных температурных колебаний в основании плотины при замерах, осуществляемых ежегодно СВНИМС в одни и те же сроки, свидетельствуют не только о том, что температурные поля пришли в равновесие, но и о стабильности процессов фильтрации через ее основание. Несмотря на это с 2007 г. мы начали отслеживать динамику изменения фильтрационных процессов через ее основание. Следует подчеркнуть, что речь ведется только о динамике, так как получить абсолютную величину фильтрации через ее основание невозможно из-за того, что в наблюдаемый нами дренажный ручей также производится неконтролируемый сброс технической воды со станции. На основании анализа расхода воды в дренажном ручье, выполненном в 2007-2009 гг., получено, что в 2007 и 2008 гг. он практически не менялся, находясь в пределах 786-767 м<sup>3</sup>/ч, в 2009 г. полученное значение равнялось 986 м<sup>3</sup>/ч (рис. 5). Если сравнить эти значения с количественными диагностическими показателями фильтрации

онного расхода в подошве низового откоса  $KI$ , которое по Декларации безопасности АрГРЭС 2008 г. равняется 846 м<sup>3</sup>/ч, и  $K2 = 918$  м<sup>3</sup>/ч, то видно, что для 2009 г. они, хоть и ненамного, но находятся в зоне запредельных значений. Критична ли такая ситуация? Скорее всего нет, так как для поддержания заданного уровня воды в водохранилище в бессточный период на ГТС уже давно установлены два насоса производительность 340 и 630 м<sup>3</sup>/ч, которые при одновременной работе могут компенсировать потери в 970 м<sup>3</sup>/ч. Так как устранить утечки воды через основание плотины невозможно, то решение проблемы сохранения заданного уровня воды в водохранилище полностью зависит от надежности работы насосов, а при выходе их из строя - от скорости их ремонта или замены. Что касается времени периода стока р.Мяунджа с мая по октябрь, то проблема фильтрационных потерь через основание плотины в это время вообще может не рассматриваться, так как они составляют всего 1,6-5,4% от стока реки.

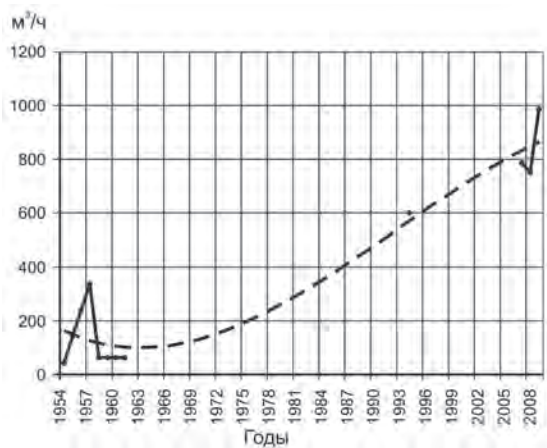


Рис. 5. Динамика изменения фильтрации через тело и основание земляной плотины (пунктирная линия). Сплошной линией показаны результаты фактических замеров.

Остается выяснить последнее. Первое. Будет ли нарушаться существующий температурный баланс между температурой грунтов основания и температурой воды в водохранилище-охладителе при сбросе дополнительной горячей воды со станции при выводе ее на полную мощность? Второе. Увеличатся ли потери воды из водохранилища, если граница талых и мерзлых грунтов начнет опускаться вниз? Многочисленными исследованиями и расчетами, выполненными как на стадии проектирования и эксплуатации, так и в настоящее время установлено, что теоретически повышение температуры воды в водохранилище должно привести к оттаиванию ложа водохранилища. Если допустить, что температура воды при существующих темпах фильтрации каким-то образом повысится с 10 до 15 °С, то в течении месяца грунт под ложем водохранилища протаит на 5 м, а если до 20 °С, то на 10 м. Однако возможно ли такое повышение температуры воды в водохранилище? Да, но только не в придонных слоях. Натурные замеры температуры воды в водохранилище 29-30 августа 1985 г. были проведены при циркуляционном расходе воды 10-30 тыс. м<sup>3</sup>/ч и температуре воды сброса с ГРЭС 26-28 °С. Получено, что стратификация температур в районе плотины практически отсутствует, находясь в пределах от 10,8 °С у дна и до 15,2 °С на поверхности (рис. 6). Незначительное повышение температуры у правого берега можно связать с малым течением и нагревом воды за счет солнечной радиации. Температура придонного слоя при замерах в продольном направлении водохранилища менялась от 11,0 °С (у плотины) до 6,2 °С (место

впадения р. Мянунджа в водохранилище). Эти данные хорошо согласуются с результатами многолетних наблюдений за термическим режимом воды в водохранилище Вилойской ГЭС [5]. Зона верховий водоема Аркагалинской ГРЭС (его первой трети) характеризуется большими градиентами температуры воды по глубине. Это связано с тем, что кроме вод р. Мянунджа в этой зоне с левого берега водохранилища через дамбу обвалования идет интенсивная фильтрация талых надмерзлотных вод. Расчеты и фактические данные показывают, что включение в работу имеющихся на станции брызгальных установок может обеспечить снижение средней температуры воды в водохранилище еще на 0,3...1,7° С.

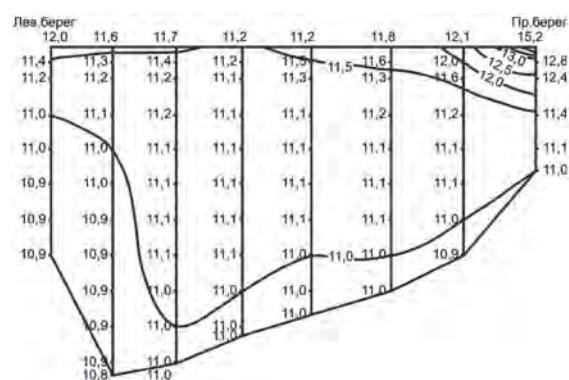


Рис. 6. Распределение температуры воды в водохранилище у плотины в период работы станции 29 августа 1985 г.

Однако и без этого мероприятия, как видно из фактических замеров, температура в придонном слое при запуске станции на полную мощность не превышает 11° С. При этой температуре скорость оттаивания ложа будет равна 0,4...0,5 м в год. Как видно из графика на рис. 5 интенсивность прироста темпов фильтрации со временем снижается. Причина в том, что за 50 лет эксплуатации водохранилища на его дне сформировалось от 0,5 м (у плотины) до 2,5 м (в верхней части) иловых осадков, нанесенных р. Мянунджей. В результате этого произошла естественная коагуляция грунтов в ложе водохранилища, что обеспечивает стабильную фильтрацию через основание уже на протяжении многих лет.

### Выводы

В результате проведенных многолетних исследований установлено.

1. Грунтовая плотина АрГРЭС, перейдя из мерзлого состояния в талое, не утратила свою статическую устойчивость.



2. Фильтрация воды из водохранилища идет через основание плотины. Ее дебит на протяжении последних десяти лет находится в стабильном состоянии. Для периода стока с мая по октябрь утечки воды в объеме 1000 м<sup>3</sup>/ч через основание плотины не влияют на наполняемость водохранилища, составляя всего 1,6-5,4% от расхода р. Мянунджа. В бессточный период проблема поддержки заданного уровня воды в водохранилище зависит только от надежности работы возвратных насосов.

3. Повышение температуры воды в прудостойнике при запуске станции на полную мощность не увеличит фильтрационные потери через основания грунтовой плотины.

4. Перевод плотин, ранее эксплуатировавшихся по мерзлому типу, на талый принцип работы может быть выполнен в безаварийном режиме при проведении постоянного мониторинга за ее работой и быстром реагированием на изменения, которые происходят при деградации мерзлых грунтов в теле и основании плотины.

#### Благодарности

Автор приносит благодарность научным сотрудникам и инженерам института ВНИИ-1 и Института мерзлотоведения СО РАН, занимавшихся наблюдениями, анализом полученных результатов и разработкой рекомендаций по сохранению устойчивости плотины с начала ее строительства и до настоящего времени. Особая благодарность руководству ОАО «Магаданэнерго» «Аркагалинская ГРЭС», способствующих продолжению работ по мониторингу гидротехнических сооружений на станции в настоящее время.

#### Список литературы

1. Ведерников, Л. Е. Обобщение опыта строительства и эксплуатации мерзлотной плотины на р. Мянундже / Л. Е. Ведерников // Труды ВНИИ-1, 1958, сборник рефератов. – Магадан. – ВНИИ-1, 1959. – С. 39-46.

2. Ведерников, Л. Е. Мерзлотные процессы в теле и основании плотины на р. Мянундже / Л. Е. Ведерников // Труды ВНИИ-1. -1963. Т. XXII. - С. 179-237.

4. Ведерников, Л. Е. Опыт строительства и эксплуатации Мянунджинской мерзлотной плотины / Л. Е. Ведерников // Секция гидротехнического строительства. Т. VII. Материалы совещания-семинара по обмену опытом проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах, октябрь, 1964 г., г. Магадан, СССР. – Красноярск, 1966. – С. 38-56. Библиогр.: с. 56.

5. Гулый, С. А. Исследование причин изменения физико-механических свойств грунтов в теле плотины Аркагалинской ГРЭС / С. А. Гулый // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 12. - С. 2-7.

6. Каменский, Р. М. Термический режим плотины и водохранилища Вилюйской ГЭС / Р. М. Каменский. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1977. – 92 с.

#### References

1. Vedernikov, L.E. 1959. Generalization of building and maintenance experience of a frozen dam on the Myaundzha River. *Transactions of the First All-Union Scientific Research Institute, Collected Abstracts 1958*. Magadan: VNII-1, 39-46. (in Russian)

2. Vedernikov, L.E. 1963. Frost-related processes in the embankment and foundation of the dam on the Myaundzha River. *Transactions of the First All-Union Scientific Research Institute*, vol. XXII: 179-237. (in Russian)

3. Vedernikov, L.E. 1966. Experience with construction and operation of the Myaundzha frozen dam. *Proceedings of the Workshop on Exchange of Experience in Design, Construction, and Operation of Buildings and Structures on Permafrost*, vol. VII Hydraulic Engineering, October 1964, Magadan, USSR: 38-56. Krasnoyarsk. (in Russian)

4. Guliy, S.A. 2007. Investigation into causes of changes in the physical and mechanical properties of soils in the Arkagalinskaya hydroelectric dam embankment. *J. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo* 12: 2-7. (in Russian)

5. Kamensky, R.M. 1977. *Thermal Regime of the Dam and Water Reservoir, Vilyuisk Hydro*. Yakutsk: Permafrost Institute SB AS USSR Press: 9 2 pp. (in Russian)



# The problem of estimating the intensity of cryogenic weathering of embankment materials in the Tommot – Kerdem section of the Amur-Yakutsk Railway

A.E. Melnikov<sup>1</sup>, S.S. Pavlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nerungri Department, Northeastern Federal University  
Kravchenko St 16, Nerungri, Russia 678960, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

<sup>2</sup>Nerungri Polytechnic College, Nerungri, Russia

**Abstract.** The need and the problem of studying the processes of cryogenic weathering and their effects on the stability of the railway embankment are proved. An attempt is made to zone the sections of the Amur-Yakutsk railway route (Tommot - Kerdem) according to resistance to weathering.

**Keywords:** railway transport of Yakutia; cryogenic weathering; Tommot - Kerdem; conditions.

## Проблема оценки интенсивности разрушения грунтов, слагающих земляную насыпь, под воздействием выветривания (на примере Амуро-Якутской железнодорожной магистрали, участок Томмот – Кердем)

А. Е. Мельников<sup>1</sup>, С. С. Павлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТИ (ф) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»  
Россия, РС (Я), 678960, г. Нерюнгри, ул. Кравченко, д. 16, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

<sup>2</sup>ГОУ СПО «Нерюнгринский политехнический колледж»  
г. Нерюнгри, Россия

**Аннотация.** Обоснованы необходимость и проблема изучения процессов криогенного выветривания и их влияния на устойчивость железнодорожного полотна. Предпринята попытка районирования участков трассы Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (Томмот – Кердем) по условию устойчивости к выветриванию.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт Якутии; криогенное выветривание; Томмот – Кердем; условия.

## Проблема оценки интенсивности разрушения грунтов, слагающих земляную насыпь, под воздействием выветривания (на примере Амуро-Якутской железнодорожной магистрали, участок Томмот – Кердем)

А. Е. Мельников, С. С. Павлов

Завершение строительства и ввод в строй железнодорожной линии Беркакит – Томмот – Кердем – Якутск, в сочетании с опережающим развитием транспортной инфраструктуры в целом, обеспечит мультипликативный эффект программ освоения и развития Востока страны, позволит ускорить освоение месторождений, поступление средств в бюджеты всех уровней от реализации конечного продукта этих проектов и, самое главное, обеспечит повышение качества жизни населения.

Вместе с тем, в мировой и отечественной практике не существует аналогов строительства в экстремальных условиях столь протяженных магистралей, характеризующихся большим объемом земляных работ и инженерно-технических сооружений различного характера.

Опыт показывает, что недостаточное внимание к строительству и эксплуатации железных дорог на Севере приводит к большим материальным затратам, направленным на ликвидацию особо опасных ситуаций; последние возникают вследствие отсутствия надлежащего контроля за процессами взаимодействия инженерных сооружений и окружающей среды.

Значительная роль в разрушении горных пород в Якутии, как и во всех регионах с суровым климатом, принадлежит криогенному выветриванию. В результате чего снижаются показатели прочностных свойств, возрастает трещиноватость и пористость пород, происходят другие изменения макропоказателей (так, у глинистых грунтов возможно снижение прочности до 7 и более раз и увеличение сжимаемости в 1,35 и 2 раза).

Таким образом, оценка интенсивности дезинтеграции пород под воздействием выветривания, используемых в качестве дорожного строительного материала (это, как правило, местные грунты) на участке Томмот – Кердем, приобретает большое значение.

Вместе с тем, изучение этого процесса связано с трудностями методического характера. Достаточно сложно из множества неблагоприятных инженерно-геологических и геокриологических факторов, влияющих на устойчивость (деформативность) желез-

нодорожного полотна, вычленить участки подверженные криогенному выветриванию, действие которого в некоторых случаях превышает воздействие других разрушающих явлений.

Зависимость условий теплообмена на поверхности земли и в массиве горных пород от тектонического строения и геотермических условий, состава, генезиса, возраста, условий залегания и распространения пород в разных геологических структурах; неодинаковое количество переходов температуры грунтов через 00, приводящих к дроблению пород, с продвижением железной дороги на северо-восток; различная интенсивность процессов выветривания на разных элементах рельефа – все эти обстоятельства определяют сложность установления закономерности изменения свойств грунтов, слагающих железнодорожную насыпь, под воздействием выветривания.

Так как одним из доминирующих факторов при выборе грунтов для отсыпки полотна дороги является дальность возки строительного материала (обычно не превышающая 15 км), очевидно, что качество земляной насыпи будет зависеть от прилегающих к трассе горных пород.

Согласно предварительному анализу грунтов в полосе трассы железной дороги Томмот – Кердем выделяются участки слабо-восприимчивые к процессам выветривания.

К таковым относятся водоразделы (в пределах Приалданского, Северо-Амгинского и Усть-Майского плато), сложенные современными элювиальными суглино-супесчаными отложениями на доломитах и известняках нижнего кембрия; на песках, супесях и песчаниках нижней юры; с небольшой мощностью рыхлых элювиальных отложений (щебень, глыбы).

К «слабым» относятся отрезки пути, проходящие в пределах днищ долин рек и ручьев (на Средне-Амгинском плато, долина р. Лена), представленных аллювиальными песками, супесями, суглинками (местами сильнольдистыми), гравием и галькой, озерными отложениями.

Таким образом, с целью обеспечения

бесперебойного и безопасного функционирования железнодорожного транспорта Якутии, участок Томмот – Кердем, характеризующийся более суровыми условиями эксплуатации и строительства, требует дополнительного детального изучения процессов разрушения грунтов под воздействием выветривания.

#### Список литературы

1. Белозеров, А. И. Проблемы и методы достройки железнодорожного участка Томмот – Нижний Бестях Амура-Якутской магистрали / А. И. Белозеров. – Новосибирск: НИИЖТ, 1998. – 60 с.
2. Выркин, В. Б. Климатические факторы криогенного выветривания горных пород в Сибири и на дальнем Востоке / В. Б. Выркин // Гляциология Восточной Сибири. – Иркутск: Изд Ин-та географии СО РАН, 1983. – С. 103–109.
3. Забелин, А. В. Влияние криогенного выветривания на геотехнические системы Южно-Якутского региона / А. В. Забелин, С. С. Павлов // Горнодобывающая Якутия на рубеже 111-го тысячелетия: сборник научных трудов. – Якутск: Изд-во Якутского ун-та, 2000. – С. 40–44.
4. Кондратьев В.Г. Об эксплуатационной надежности земляного полотна железнодорожной линии Беркакит – Томмот – Якутск на вечномерзлых грунтах / В. Г. Кондратьев, В. А. Позин, В. В. Шоллин // Трансп. стр-во. – 1997. – № 11. – С. 3–6.
5. Тектоника, геодинамика и металлогения

территории Республики Саха (Якутия). – М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с.

6. Геология Якутской АССР / Под ред. Л. И. Красного. – М. : Недра, 1981. – 300 с.

#### References

1. Belosеров, A.I. 1998. *Problems and Methods of Construction of the Tommot - Nizhni Bestyakh Section of the Amur-Yakutsk Railway*. Novosibirsk, 60 pp. (in Russian)
2. Vyrkin, V.B. 1983. Climatic factors of cryogenic weathering of rocks in Siberia and in the Far East. In: *Glaciology of Eastern Siberia*. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS Press: 103-109 (in Russian)
3. Pavlov, S.S. 2000. The effect of cryogenic weathering on geotechnical systems of the South-Yakutia region. In: *Mining Industry in Yakutia at the turn of III millennium*. Yakutsk: Yakutsk State University Press. (in Russian)
4. Kondrat'ev, V.G., Pozin, V.A. 1997. About the operational reliability of the subgrade of the railway track Berkakit – Tommot – Yakutsk on permafrost soils. *J. Transportnoe Stroitelstvo* 11: 3-6 (in Russian)
5. 2000. *Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodica, 571 pp (in Russian)
6. 1981. *The Geology of the Yakut ASSR*. Moscow: Nedra, 300 pp. (in Russian)

# Twenty-year performance of envelope foundations in Igarka

S.V. Poznarkova, F.N. Zepalov

Igarka Geocryology Lab, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS  
1-st Microdistrict, Bldg. 8A, Turukhansk District, Krasnoyarsk Region, Russia 663200  
e-mail: svetik\_ig@mail.ru

**Abstract.** This paper evaluates results of the experiment on introducing a new foundation type, surface ventilated envelope foundation, into northern construction practice. This foundation design uses natural ventilation to cool the underlying soils while minimizing the soil-foundation interaction. A general description of buildings constructed on envelope foundations in the city of Igarka is given, including construction dates, design concepts, and structural deformations. Results of the monitoring studies of soils, foundations and supporting structures are presented, which were undertaken to determine the causes of building deformations. Detailed observations were performed at the Igarka Geocryology Lab building and included ground temperature measurements in boreholes along the building perimeter, vertical movement observations, and snow depth measurements. Observations indicate that the foundation soils are in a thawed state, but subject to deep freezing with formation of permafrost lenses. The Lab building is experiencing settlement throughout the year and cracks appear on the upper floors due to spandrels deformation. Of four buildings erected on envelope foundations, one is damaged severely and requires demolition, while the other three have cracks of various size.

**Keywords:** envelope foundation; experimental buildings; building deformation monitoring; geothermal observations.

## Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка

С. В. Познаркова, Ф. Н. Зепалов

Игарская геокриологическая лаборатория, Учреждение Российской академии наук  
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия 663200, Красноярский край, Туруханский район, г. Игарка, 1 микрорайон, д. 8а, ИГЛ  
e-mail: svetik\_ig@mail.ru

**Аннотация.** Работа оценивает результаты эксперимента по внедрению в северном строительстве нового вида поверхностных фундаментов – пространственных вентилируемых фундаментов-оболочек. Основной задачей данного типа фундамента является обеспечение охлаждения грунтового основания путем естественной вентиляции при минимизации взаимодействий фундамента с грунтом. В работе представлена общая характеристика сооружений, построенных на этом типе фундамента в г. Игарка: дата строительства, принцип использования мерзлых грунтов в качестве основания, современная степень деформации. Рассмотрены результаты мониторинговых наблюдений за грунтами, фундаментами и несущими конструкциями, организованных для выявления причин деформаций зданий и выполненных особенно детально для лабораторного корпуса ИГЛ. В состав мониторинговых наблюдений вошли: бурение скважин внутри здания и по его периметру и геотермические наблюдения, установка и регулярное нивелирование геодезических марок по внешним стенам здания, проведение снегомерных съемок. В настоящее время основанием фундамента здания являются талые грунты, подверженные глубокому сезонному промерзанию с образованием линз мерзлоты. Происходит просадка здания вне зависимости от времени года и равномерная деформация несущих стен здания с образованием трещин на верхних этажах. Сейчас из четырёх зданий, построенных в г. Игарка на этом типе фундамента, одно находится в аварийном состоянии (списано и готово под снос), три здания имеют трещины различного размера.

**Ключевые слова:** фундамент-оболочка; экспериментальные строения; мониторинг деформаций; термометрические наблюдения.



# Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка

С. В. Познаркова, Ф. Н. Зепалов

## Введение

На данный момент разработано множество типов фундаментов, используемых в криолитозоне: ленточные, столбчатые, свайные различных типов, фундаменты на подсыпках. Экспериментальные фундаменты, к которым относятся и поверхностные, активно внедрялись в 1970-80-ых гг. для решения узких инженерных проблем. К настоящему времени срок службы построенных в этот период зданий на экспериментальных фундаментах достаточно велик, имеется возможность оценить рациональность использования этих фундаментов, обследовав построенные с их использованием инженерные объекты.

Город Игарка расположен в довольно суровых климатических условиях криолитозоны: среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Игарка составляет  $-8^{\circ}\text{C}$ , среднее число морозных дней в году более 250. Такие условия создают потенциал для образования многолетнемёрзлых толщ (ММТ) [1].

Для района г. Игарка характерно островное распространение ММТ, что объясняется значительным отепляющим влиянием снега (до  $10^{\circ}\text{C}$  в годовом разрезе) и особенностями гидрогеологических условий. Строительство в городе осуществляется в основном по I принципу: в качестве фундаментов используют железобетонные бурозабивные сваи, под зданием оборудуется проветриваемое подполье.

Несмотря на то, что сваи хорошо себя зарекомендовали, в середине 1980-х годов в го-

роде стал применяться новый тип фундамента – пространственный фундамент-оболочка на подсыпке. Его особенностью является то, что конструкция фундамента-оболочки не соприкасается с агрессивной средой грунта, а форма конструкции позволяет холодному воздуху свободно перемещаться в зимний период внутри оболочки фундамента по вентиляционным каналам.

С использованием этого типа фундаментов были построены экспериментальные строения: 2 жилых двухэтажных дома, гараж-стоянка в старой части города и лабораторный корпус Игарской НИМС (после реорганизации – ИГЛ). При этом жилые дома и корпус ИГЛ были построены на талых грунтах с мощной подсыпкой из гравийно-цементно-песчаной смеси, с бетонированием вентиляционных каналов для исключения проветривания. Здание гаража-стоянки было построено на мерзлых сильнольдистых высокотемпературных глинистых грунтах с использованием деревянных коробов для дополнительной вентиляции фундаментов. К моменту строительства гараж-стоянки на участке существовал псевдоталик мощностью около 3 м, после строительства под зданием таликовая зона стала уменьшаться под влиянием активной вентиляции. В начальные годы эксплуатации производились систематический контроль и поддержание состояния основания: осуществлялись термометрические наблюдения, ремонт вентиляционных коробов, при необходимости убирался снежный покров [2].

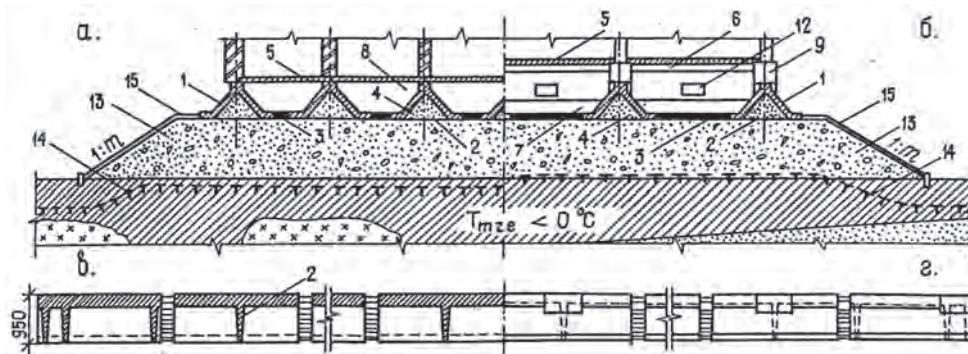


Рис. 1. Схема строения фундамента-оболочки на мерзлых грунтах (рисунок из отчета Бердичевского Ю.В., Гончарова Ю. М.) [1].

а – под несущие стены; б – под колонны каркасных зданий с продуваемым подпольем; в – продольный разрез по складке фундамента под несущие стены; г – то же, под колонны; 1 – фундамент-оболочка; 2 – подкрепляющее ребро жесткости; 3- монолитный участок; 4 – наполнитель из низкопрочного материала; 5- плиты перекрытия; 6- рандбалка; 7 – ребро жесткости; 8 – вентиляционный канал; 9 – оголовок; 12 – продухи; 13 – промежуточный слой (подсыпка); 14 – граница ВМГ; 15 – бетонная отмостка.

В результате эксплуатации здания гаража-стоянки была нарушена система принудительного охлаждения (разрушились деревянные вентиляционные короба), усилилась тепловая нагрузка на грунты. В дальнейшем по экономическим причинам в здании было отключено отопление. Подобный режим эксплуатации привел сначала к увеличению мощности таликовой зоны под стоянкой, а впоследствии к её промерзанию. Поочерёдное протаивание и промерзание грунтового основания привели к неравномерной осадке здания, а в дальнейшем к неравномерному пучению. В результате возникших напряжений произошло перераспределение нагрузки на фундамент, что привело к образованию трещин в фундаменте-оболочке и в несущих стенах. Деформации достигли критического значения, в 2004 году гараж был списан, а в настоящее время готовится к сносу. Для уточнения приведённых утверждений после сноса здания будут произведены буровые и термометрические работы непосредственно в основании гаража-стоянки.

Лабораторный корпус ИГЛ расположен в юго-восточной части существующего 1 микрорайона г. Игарки, на второй надпойменной террасе р. Енисей. Поверхность террасы имеет уклон к юго-западу, абсолютная отметка террасы колеблется от 28 до 45 м.

В отличие от стоянки-гаража, на территории, где находится корпус, распространены талые грунты, по этой причине система вентиляции в пространственном фундаменте не предусматривалась (организованы бетонные заглушки в концевых частях вентиляционных каналов). Наблюдения за осадками корпуса с момента его сдачи в эксплуатацию в 1992 г. не производились, так как во время строительства была нарушена реперная система наблюдений, установленная на горизонтальных балках фундамента-оболочки при кладке стен [2]. Наблюдения за температурным режимом грунтов на протяжении всех лет эксплуатации здания также не производились. Условия эксплуатации здания, в частности, удаление снега с прилегающей к корпусу территории в зимний период, за 20-летний период эксплуатации могли привести к изменению температурного режима основания фундамента, понижению температуры грунтов и развитию под зданием локальных линз и языков многолетнемерзлых грунтов. Это в свою очередь способно негатив-

но отразиться на состоянии фундамента, его несущей способности, так как создаёт предпосылки к развитию пучения [3].

Проводимые в течение последних лет визуальные осмотры лабораторного корпуса показывали наличие трещин различной величины в кирпичных стенах по всей высоте, что заставило возобновить прерванные наблюдения за зданием. Вертикальные трещины внешних стен, обнаруженные при осмотрах корпуса, расположены на лицевой стороне, правом торце и на обратной стороне здания. Наибольшее раскрытие трещин составляет 4-6 мм. При осмотре внутренних поверхностей здания обнаружено, что количество трещин здесь больше, чем снаружи, причём они преобладают с той стороны здания, где снег в течение зимы постоянно убирается. Среднее раскрытие трещин внутри здания составляет от 1 до 4 мм. В основном эти трещины пересекают оконный и дверные проемы.

#### **Методика исследований**

Мониторинговые мероприятия включили несколько этапов работ. На предварительном камеральном этапе были исследованы архивные материалы сотрудников ИГЛ, касающиеся инженерно-геологических изысканий под зданием, схемы фундамента-оболочки и самого здания. На полевом этапе работ для исследования современных инженерно-геокриологических условий функционирования основания фундамента вокруг корпуса, на расстоянии в пределах 2 м от стен, были пробурены 4 термометрические скважины. Одна из скважин (№ 1) находится непосредственно под зданием.

По данным изысканий определена следующая характеристика слагающих участков отложений. В геологическом строении участка участвуют покровные делювиальные суглинки, аллювиальные и ледниковые – гравелистые супеси, гравийно-галечниковые грунты и эффузивная туфобрекчия – скальная порода (вскрывается на глубине от 4,9 до 6 м). По данным физического анализа верхняя часть разреза (до 2,1 м) сложена гравийно-песчано-цементной смесью. Средняя часть разреза с 1,6 м до 5,0 м сложена суглинками, в основном легкими пылеватыми, и супесями с включениями гравийно-песчано-галечникового материала (с глубины 2,6 до 5 м). Ниже, от 4,9 м на всю пройденную мощность залегает скальная порода [4].

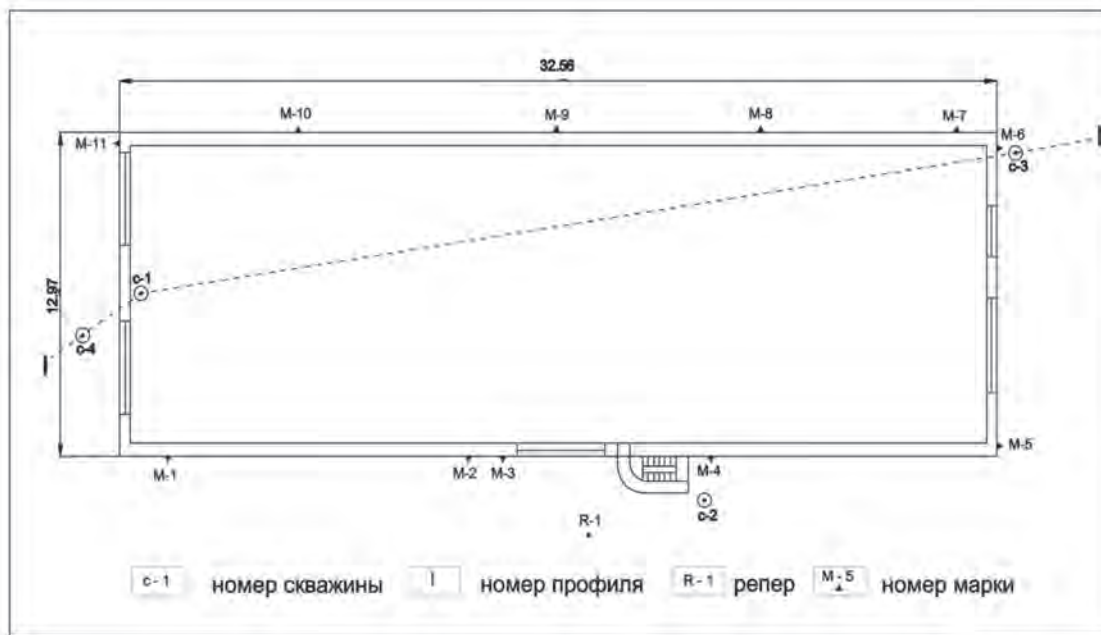


Рис. 2. План геокриологических скважин, настенных марок и инженерно-геологического разреза на территории ИГЛ.

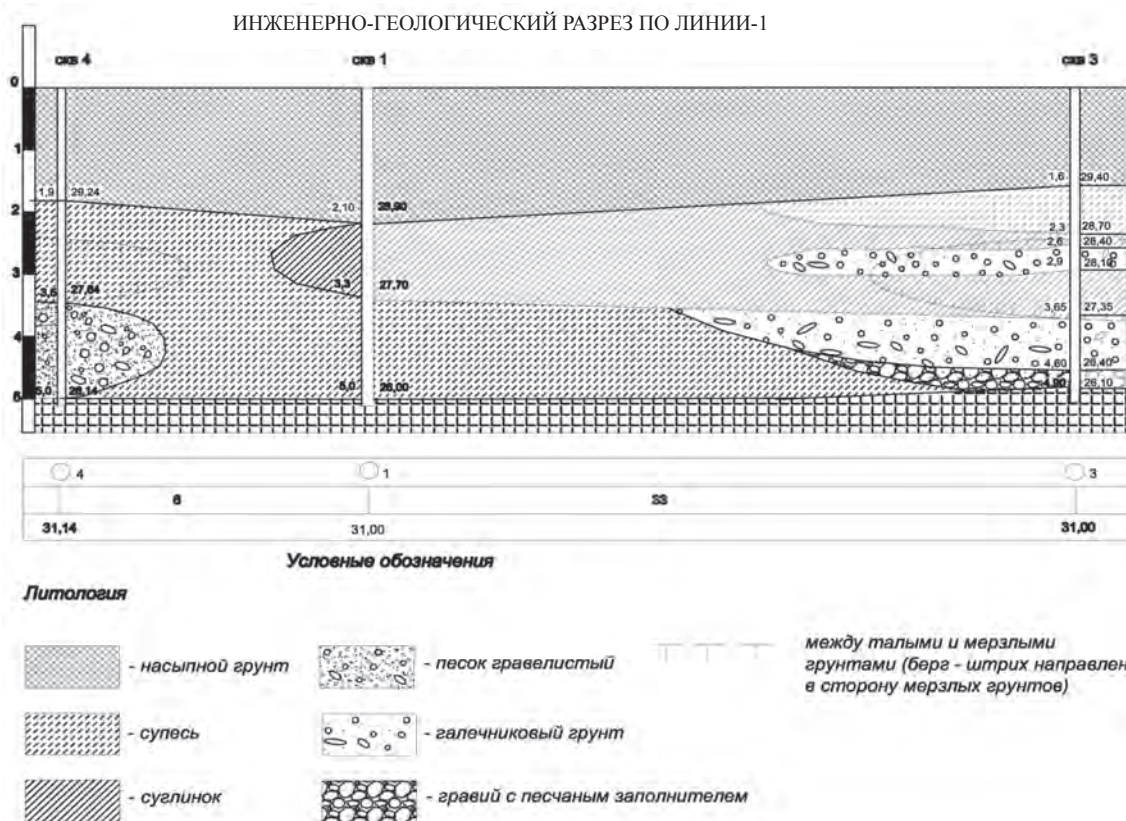


Рис. 3. Инженерно-геологический разрез по линии I-I.

Уже сейчас можно сказать, что в скважинах, расположенных вне контура здания, на глубине 3 м формируются мерзлые новообразования, которые протаивают только к

концу теплого периода. Непосредственно под зданием (по данным термометрии на одной скважине) мерзлые породы не образуются.



Для детального наблюдения за деформациями фундамента в середине 2010 г. в несущие стены установлено 11 анкерных марок. Нивелировка марок проводится не реже раза в месяц относительно установленного вблизи

здания репера. Менее чем за год с начала наблюдений суммарная просадка сооружения составила от 6 до 19 мм на разных участках стен.

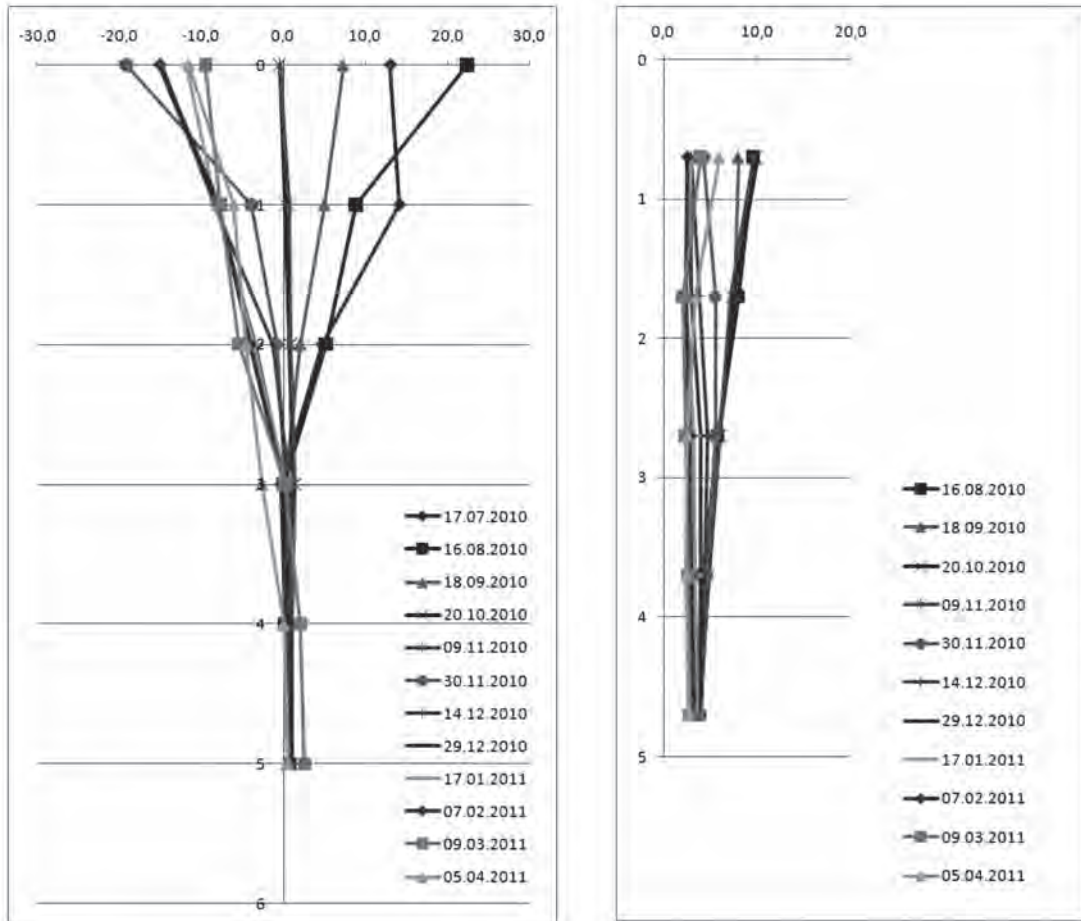


Рис. 4. Графики термометрических замеров в скважине 3 (рядом с зданием) и скважине 1 (внутри здания).

### Заключение

Наблюдения за существующими строениями на пространственных фундаментах-оболочках показали, что этот тип фундамента очень прихотлив при использовании его на многолетнемерзлых грунтах. Для нормальной работы фундаментов необходимо постоянно производить мероприятия по сохранению вентиляционных каналов и коробов, организовывать дополнительную вентиляцию. Перераспределение нагрузок здания может привести к появлению трещин на боковых поверхностях оболочек и несущих стенах.

Вследствие большой площади основания фундаментов возрастает вероятность

неравномерного пучения. Помимо этого, сама форма фундамента вызывает возникновение напряжений растяжения на боковых поверхностях оболочек. В остальном за период эксплуатации зданий на талых грунтах серьезных деформаций не зафиксировано.

На данный момент существует программа мониторинга лабораторного корпуса, которая покажет более точные изменения состояния здания и фундамента-оболочки.

Сама идея осуществления строительства на многолетнемерзлых грунтах на проветриваемых поверхностных фундаментах разумна и в дальнейшем будет реализовываться.



### Список литературы

1. Гаврилова, М. К. Климат и многолетнее промерзание горных пород / М. К. Гаврилова. – Новосибирск : Наука, 1978. — 213 с.
2. Гончаров, Ю. М. Опыт строительства зданий на обводненных таликах / Ю. М. Гончаров // Наука и техника в Якутии. — 2001 — № 1 (10) — С. 12—16.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах — Взамен СНиП III-18-76; введ. 1990—01—01. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 57 с.
4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. – М. : Госстрой РФ. —2003.

### References

1. Gavrilova, M.K. 1978. *Climate and Perennial Ground Freezing*. Novosibirsk: Nauka, 213 pp. (in Russian)
2. Goncharov, Yu.M. 2001. Experience with building construction on watered taliks. *J. Nauka i Tekhnika v Yakutii* 1(10): 12-16. (in Russian)
3. USSR Gosstroy. 1990. *Building Code SNiP 2.02.04-88, Foundations in Permafrost*. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 57 pp. (in Russian)
4. Russian Federation Committee on Construction. 2003. *Building Regulations SP 1-105-97. Geotechnical Site Investigations. Part IV. Guidelines for Permafrost Areas*. Moscow: RF Gosstroy. (in Russian)

## **Basic principles of geocryological monitoring at linear structures (with reference to the Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway)**

D.M. Shesternev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: shesterhev@mpi.ysn.ru

**Abstract:** This paper discusses the history of monitoring investigations. The basic concepts and definitions used in monitoring programs are described. A new principle for identifying the object of engineering-geocryological monitoring at linear structures is proposed. Methodological foundations for monitoring organization, structure and functioning in space and time are given. The proposed monitoring system has been implemented at the Berkakit-Tommot-Yakutsk railway.

**Keywords:** permafrost; temperature and seasonal ground freezing; engineering-geocryological monitoring.

## **Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной дороги Беркакит – Томмот – Якутск)**

Д. М. Шестернев

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 6770120, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, e-mail: shesterhev@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** В докладе рассмотрена история развития мониторинговых исследований. Охарактеризованы основные понятия и определения, используемые при организации мониторинга. Предложен новый принцип выделения объекта инженерно-геокриологического мониторинга линейных сооружений. Даны методические основы организации мониторинга, его структуры и функционирования в пространстве и во времени. Выполненные разработки реализованы при организации и проведении мониторинга на трассе железной дороги Беркакит – Томмот – Якутск.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; температура; сезонное промерзание грунтов; инженерно-геокриологический мониторинг.

# Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной дороги Беркакит – Томмот – Якутск)

Д. М. Шестернев

## 1. Основные понятия и определения

В настоящее время термин «Мониторинг» - контрольное наблюдение, широко используется практически во всех сферах деятельности человека. Значительное количество объектов наблюдений обусловило формирование большого информационного массива понятий, принадлежащих различным областям знаний. В настоящее время мониторинг уже сам по себе представляет одну из этих областей, в составе которой четко просматриваются фундаментальные и прикладные начала.

На Стокгольмской конференции ООН в 1972 г. Р. Мэнном [6] впервые было предложено называть мониторингом, систему повторных наблюдений одного и более элементов окружающей природной среды в пространстве и во времени с определенными целями в соответствии с заранее заданной программой.

В России, теоретические основы мониторинга связаны с работами Ю.А. Израэля [4]. Он первым в понятие «Мониторинг окружающей среды» ввел первопричину ее изменения – человека и предложил под мониторингом понимать систему наблюдений, позволяющих контролировать изменения биосферы под влиянием человеческой деятельности (мониторинг антропогенных изменений окружающей среды). В его классификации более чем тридцати мониторингов, впервые была названа система мониторинга криосферы. В дальнейшем

Ю.А. Израэль расширил понятие мониторинга, включив в его определение и функцию управления состоянием окружающей среды.

Рассматривая историю развития геокриологии, нетрудно заметить, что ныне существующая технология мониторинговых исследований природной среды, уже давно была основным способом получения фактического материала о динамике и закономерностях развития природных и природно-технических массивов криолитозоны. В 30...40-е и последующие годы, организовав сеть мерзлотных станций на территории СССР, геокриологи, по существу, создали организационную и научно-техническую базу исследований криолитозоны в масштабах государства, которую, в настоящее время, вполне можно было назвать государственным «геокриологическим

мониторингом». В настоящее время под этим термином подразумевается система наблюдений, контроля и прогноза развития геокриологической среды, оценки изменений геокриологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий в пределах криолитозоны под влиянием природных факторов и человека [7, 1].

В зависимости от видов инженерного освоения криолитозоны мониторинг может быть территориальным и пообъектным. Например, мониторинг горнопромышленного региона или, мониторинг какого-либо горнодобывающего предприятия, зданий и сооружений. Одним из наиболее распространенных видов мониторинга является технический мониторинг линейных сооружений, в том числе мониторинг железных дорог.

Для обеспечения эффективной эксплуатации железных дорог России геотехнический мониторинг проводится в соответствии с организационной структурой их управления, элементами которой являются: управление железной дороги, отделение, дистанция и околотов.

Технический мониторинг детального уровня выполняется в границах околотов железной дороги, на локальном уровне осуществляется мониторинг дистанции пути, мониторинг регионального уровня осуществляется в пределах железнодорожной трассы отделения, мониторинг геологической среды вдоль железнодорожной трассы всего управления дороги относится уже к национальному уровню и объединяет все региональные системы мониторинга отделений. Аналогичный, или близкий подход к организации и проведению технического мониторинга, характерен и для линейных сооружений другого типа - трубопроводов, автодорог и т.д.

Нам представляется, что такой подход для организации геокриологического мониторинга не совсем эффективен, поскольку выделение всех уровней мониторинга построено на административном делении линейных объектов и не предусматривает учет особенностей конкретных, инженерно-геокриологических условий территории. Кроме того, результаты технического мониторинга только констатируют факт, негативного состояния дороги, но полученных результатов

недостаточно, чтобы выявить причину и, тем более, устранить ее.

Особенностями организации и проведения инженерно-геокриологического мониторинга железных дорог и линейных сооружений других типов являются: большая протяженность; неоднородность природных условий; неритмичность транспортной нагрузки в течение года; разнообразие технического прессинга на окружающую среду в полосе трассы и др.

В.И. Вернадский [1] в составе окружающей среды кроме биосферы, атмосферы, гидросферы и литосферы и в связи с тем, что человека уже в то время можно было сравнить с геологической силой, предложил выделять сферу разума - ноосферу. Позже А.Е. Ферсман [11] геохимическую активность человека назвал техногенезом, область в которой она протекает – техносферой. В свою очередь Ю. Одум [8], практически эту же область, назвал экосферой, предложив считать ее объектом исследований общей и инженерной экологии - науки о закономерностях формирования и функционирования биологических систем и их взаимодействия с окружающей средой, составляющей частью которой, является область хозяйственной деятельности человека.

С конца 70-х годов часть земной коры (литосферы), являющейся основой для развития биосферы начали называть геологической средой. В качестве геологической среды рассматриваются любые горные породы и почвы в верхней части литосферы, изучаемые как многокомпонентные системы в области деятельности человека, влияющего на динамику природных геологических и формирующихся инженерно-геологических процессов, изменяющих инженерно-геологические условия осваиваемой территории. В соответствии с этим определением, мощность геологической среды определяется глубиной освоения человеком литосферы [10].

Мощность геологической среды изменяется в зависимости от воздействия человека на литосферу. В настоящее время нижняя ее граница находится преимущественно на глубине первой сотни метров. В исключительных случаях (глубинное бурение) может достигать 10 и более километров. Если исключить из рассмотрения горнотехнические сооружения, и принимать во внимание только гражданские и наземные линейные сооружения, то мощность геологической среды не превысит первых десятков метров. Но изменение мощности геологической среды обусловлено не только глубиной теплового и механического взаимодействия технических объектов с мас-

сивами грунтов, но и изменением рельефа в процессе воздействия на него природных и техногенных факторов.

Значительная часть литосферы, а, следовательно, и геологической среды в связи с естественным развитием геологической истории планеты находится в многолетне-мерзлом состоянии. Эту ее часть называют криолитозоной или криолитосферой. Вероятно, не будет ошибкой, если мы будем называть криогенной средой ту часть криолитозоны, которая используется человеком для создания безопасной и комфортной его жизнедеятельности.

## **2. Объект мониторинга и его дифференциация**

Криолитозона в России занимает 60-70% ее территории. Мощность криолитозоны изменяется от первых метров на юге до километра и более на севере. В широких диапазонах изменяются и другие ее параметры. Особенностью криолитозоны является не только и не столько ее отрицательная температура, сколько наличие и существование при различных температурах ее породообразующего, термодинамически неустойчивого минерала – льда и воды в незамерзшем состоянии. Изменения концентраций этих двух компонентов в породах криолитозоны, зависящие от их температуры, практически определяют свойства и поведение массивов пород криолитозоны при различных технических воздействиях. Существует мнение, что эти технические воздействия не может оказывать в целом хозяйственная деятельность, какой либо отрасли - строительной, сельскохозяйственной и т.п. [6]. Нам представляется, что этот тезис спорный. Подтверждение его или отрицание, ждет своих исследователей, в поисках соответствующих аргументов, в пользу одного из этих тезисов. Если сузить проблему до масштаба технического объекта, то взаимодействие технического объекта (функционирующего по техническим законам) и объема массива криолитозоны (развивающегося по законам природы) обычно приводит к формированию природно-технических систем ПТС (площадных, линейных и т.п.). В инженерно-геологической литературе часто термин ПТС, и термин ГТС (геотехническая система) используют как синонимы [3], что не совсем верно. Геотехногенная система (ГТС), имеет границы, положение которых строго определяются воздействием технического сооружения на геологическую среду. Аналогичное содержание имеет термин «Литотехническая система ЛТС». В этом случае эти понятия



синонимы. Но природно-техническая система, понятие значительно шире. Оно включает в себя техническое сооружение и все природные сферы, находящиеся под его влиянием и поэтому, ГТС или ЛТС, являются подсистемой (частью) ПТС [9]

При освоении криолитозоны, как и любых других территорий, следует говорить не вообще о мониторинге, а о мониторинге природно-технических систем ПТС (объект мониторинга), тип и закономерности развития которых (при прочих равных условиях) определяются типом инженерного сооружения и техно-логиями его функционирования в природной среде.

Граница ГТС обычно определяется с учетом оптимального изменения массива основания грунтов под воздействием технического сооружения, обеспечивающего его устойчивость. Такую границу, обычно называют «гомеостатической» [6].

В пределах криолитозоны гомеостатическая граница ПТС зависит не только от вида и особенностей функционирования технической системы, но и изменений наиболее динамичных параметров природной среды (температуры воздуха, количества и структуры осадков в течение года: твердых, жидких и т.д.). Таким образом, гомеостатическая граница ПТС в криолитозоне должна определяться с учетом времени эксплуатации технической системы и соответствующего по длительности климатического ритма, предопределяющего размер зоны безопасности эксплуатации технической системы. Исходя из этого, в геотехногенных массивах грунтов, следует выделять не гомеостатические границы, а гомеостатические зоны, существование и динамика развития свойств которых обеспечивает эффективное и безопасное функционирование инженерных сооружений. Размеры гомеостатических зон, можно устанавливать с использованием существующих аналитических моделей теплотехнических вычислений и корректировать в процессе получения соответствующих результатов мониторинга.

В пределах ПТС железной дороги таких зон две:

первая - весь массив криогенной среды, трансформация которого протекает под воздействием экстенсивных факторов - вырубки леса, степени нарушения почвенно-растительного горизонта и т.п.;

вторая - приконтактная зона между геотехногенным массивом, сформировавшимся под воздействием тепловой и механической нагрузки земляного полотна и искусственных сооружений и массивом криогенной среды.

Основными элементами структуры ПТС служат: физико-географическая среда (ФГС-атмосфера, биосфера, гидросфера), криогенная среда (КС – сезонная и многолетняя криолитозона) и техническая среда (ТС – тип сооружения) (рис. 1).

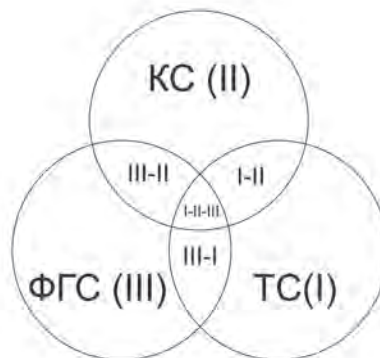


Рис. 1. Структура объекта мониторинга – природно-технической системы железной дороги АЯМ (ПТС «ЖД АЯМ»):

Конечное множество параметров, характеризующих состояние каждой среды, вне зависимости друг от друга: ФГС(III) – физико-географическая среда; КС(II) – криогенная среда, ТС(I) – техническая среда; конечное множество параметров характеризующие подсистемы природно-технической системы: III-I, III-II, I-II; конечное множество параметров, характеризующее функционирование природно-технической системы - I-II-III.

Основным структурообразующим элементом ПТС является техническая среда, в нашем случае - железная дорога АЯМ «Беркаит-Томмот-Якутск». Перечисленные выше структурные элементы (см. рис. 1) можно рассматривать как системы второго порядка или подсистемы по отношению к ПТС. Дифференциация каждой из систем второго порядка осуществляется поэтапно, с учетом стадий проектирования (табл. 1). Следует обратить внимание на то, что при переходе от более ранних к более поздним стадиям изысканий: 1) площадь и глубинность изучения геокриологической среды резко сокращается, а обусловленные целями проектирования и решаемыми задачами – детальность, достоверность и специализация исследований увеличиваются; 2) объем массивов количественных оценок, получаемых с учетом нормативных требований, повышается в разы и используется для дифференциации криогенной среды по свойствам на расчетные элементы, включая и построение корреляционно-регрессионных моделей массивов грунтов криолитозоны, для прогноза их свойств на ранних стадиях проектирования.

Таблица 1. Стадии проектирования и инженерно-геологические изыскания (ИГИ)

ВЛС	Стадии проектирования			Рабочий проект
	ППД	П	РД	
Д	Определения цели инвестирования. Разработка декларации о намерениях. Обоснование инвестиций в строительство. ИГИ на территории предполагаемого строительства объекта	Выбор оптимального варианта трассы. ИГИ на оптимальном варианте трассы	Индивидуальное проектирование. ИГИ на участках индивидуального проектирования	
Т			Проект расстановки опор. ИГИ на участках расстановки опор	
ЛЭП				

**Примечание.** ВЛС - виды линейных сооружений: Д – дороги, Т – трубопроводы, ЛЭП – линии электропередач; стадии проектирования и геологических изысканий: ППД – предпроектной документации, проекта – П, рабочей документации – РД, однопроектная стадия рабочей документации, включающая объем работ стадий П и РД.

Выполненные изыскания на стадиях ППД и П, а также анализ закономерностей формирования геоэкологических условий в зависимости от тектонических, геолого-геоморфологических, геоботанических и климатических условий позволили дифференцировать территорию Алданской антеклизы, в пределах которой проложена трасса железной дороги АЯМ на инженерно-геологические области. В дальнейшем, на территории каждой из них были выделены участки по степени чувствительности к техногенным нагрузкам. Выделение участков базировалось на сочетании следующих природных условий и характеристик свойств грунтов: степени увлажнения (льдистости) поверхностных грунтов, их мощности, криогенному строению, наличию пластовых и повторно-жильных льдов, нали-

чию и характеру почвенно-растительного покрова, криогенным процессам и карстопоявлению. Сопряженный анализ перечисленных факторов являлся основой оценки типов и протяженности участков с различной чувствительностью для каждой из выделенных инженерно-геологических областей. Итогом этой работы явилась типизация основания земляного полотна по устойчивости при строительстве железной дороги АЯМ [5]. Согласно предложенной типизации в пределах трассы железной дороги АЯМ выделено 10 инженерно-геологических областей и определена чувствительность к техническим воздействиям различных типов местности в составе областей. К сожалению, авторы не указали в своей работе, к каким именно техническим воздействиям оценивалась устойчивость зем-

Таблица 2. Типизация основания земляного полотна ж.д. АЯМ [5, с изменениями автора]

Инженерно-геологическая область (интервал пересечения трассой, км)	Типы земляного полотна по устойчивости и их протяженность					
	неустойчивых		потенциально неустойчивых		устойчивых	
	км	%	км	%	км	%
Южно-Чульманское Плато(0-85)	4,25	50	8,50	10	72,25	85
Хатыминское плато(85-115)	4,50	15	7,50	25	18,00	60
Приянгинское плато(115-130)	0,75	5	1,50	10	12,75	85
Алданское (130-246) плоскогорье (284-294)	5,80	5	17,4	15	92,80	80
	0,50	5	0,80	8	18,70	87
Средне-Алданское плоскогорье и плато(246-284)	1,90	5	1,14	3	34,96	92
Приалданское плато (294-386)	2,76	3	7,36	8	81,88	89
Средне-Амгинское плато(386-540)	16,94	11	10,78	7	126,3	82
Северо-Амгинское плато(540-620)	12,00	15	9,60	12	58,40	73
Усть-Майское плато(620-700)	12,80	16	38,40	48	28,80	36
Долина р. Лены(700-818)	2,34	2	111,15	9,5	3,51	3
Алданская антеклиза(0-818)	64,54	7,9	214,13	26,2	538,3	65,9

ляного полотна, поскольку они различны, на различных этапах производства работ - при изысканиях, при подготовке трассы к строительству, и при строительстве.

Таким образом, дифференциация технической системы по степени воздействия на окружающую и криогенную среду, дифференциация криогенной среды по устойчивости к этим воздействиям, является первым и основным этапом технологии создания инженерно-геокриологического мониторинга, заключающегося в приоритетном техническом оборудовании и проведении мониторинга на потенциально опасных участках для эффективной эксплуатации линейного сооружения.

### **3. Структура, оборудование и функционирование мониторинга**

В целом, выбор структуры мониторинга любого типа, определяется его задачами и масштабами границ объекта мониторинга. Согласно этому принципу иерархия структуры изменяется от глобального (межгосударственная система) до локального (предприятия, месторождения, хозяйственные комплексы) уровней [6].

*Структура мониторинга* железной дороги, разработанная нами, согласно дифференциации ПТС является многоуровневой и пространственно-целевой. Каждый уровень имеет относительно самостоятельное значение и взаимосвязан с другими уровнями, в пределах которых решаются методические и практические региональные и локальные задачи.

Первый уровень представляет собой весь комплекс наблюдательной сети в масштабе железной дороги.

Второй уровень состоит из мониторинговой сети, расположенной в границах инженерно-геологических областей и учитывает их особенности.

Третий уровень мониторинговой сети расположен в пределах неустойчивых и потенциально неустойчивых к техническим воздействиям участков, выделенных на территории каждой из инженерно-геокриологических областей.

Каждый из перечисленных уровней мониторинга состоит из подуровней:

I – приурочен к зоне взаимодействия искусственных сооружений с криогенной средой в пределах земляного полотна;

II – расположен на территории геотехнической системы (ГТС) и включает земляное полотно и его основание, распространяясь на периферийную зону территории трассы, не-

посредственно контактирующую с земляным полотном;

III - находится за пределами ГТС, но в пределах территории трассы, включая склоны выемок;

IV - создан на периферии трассы там, где природные условия находятся в ненарушенном состоянии.

Разработанная и реализованная таким образом, организация структуры мониторинга трассы линейного сооружения позволяет:

- отслеживать состояние ПТС в целом и отдельных ее элементов, представляющих опасность для эксплуатации линейного сооружения;

- получать массивы данных, для быстрой оценки состояния эксплуатируемого сооружения в пределах неблагоприятных и потенциально неблагоприятных участков дороги;

- экстренно принимать управляющие и технические решения по ликвидации негативного их воздействия на сооружение.

*Оборудование стационарных площадок мониторинга.* Начальным этапом выбора мест организации и оборудования площадок является рекогносцировочный (инвентаризационный) маршрут обследования всей трассы объекта исследования. Он позволяет проверить состояние трассы линейного сооружения, земляного полотна, изменение интенсивности развития криогенных процессов и явлений на трассе и в ее периферийной области, появление и развитие вновь образовавшихся процессов.

Учитывая итоги этого маршрута и предварительное районирование по степени опасности участков трассы к техническим воздействиям, намечаются территории для организации подуровневых мониторингов, состав оборудования которых зависит от наличия и типов уже развивающихся и прогнозируемых процессов, состояния и свойств криогенной среды. Но, при этом, для базовых исследований, оборудуются термометрические и геодезические профили (створы), в одной полосе (на одной линии), по нормали к расположению технического объекта.

Термометрический профиль состоит из термометрических скважин, позволяющих изучать изменение температурного режима на 2-3 м ниже глубины годовых колебаний температур пород. Минимальное количество таких пунктов определяется степенью опасности для железной дороги оборудуемого участка, типами технического воздействия на криогенную среду, криолитологическим строением и свойствами самой среды. Для контроля изменения морфометрических параметров



трассы и земляного полотна устанавливаются геодезические марки.

Завершается оборудование подуровневых участков мониторинга геодезической привязкой каждой точки наблюдений, профилей, границ развития криогенных процессов, составлением ландшафтного профиля и паспорта участка мониторинга.

Функционирование мониторинга регламентируется целью создания мониторинга и его задачами. Причем, на каждом этапе строительства линейного сооружения задачи мониторинга могут быть различными, но цель не должна изменяться. Это обеспечит минимизацию ресурсов и повысит технологичность и качество мониторинга на весь период его существования.

Цель инженерно-геокриологического мониторинга железной дороги АЯМ Беркажит-Томмот-Якутск состоит в повышении эффективности эксплуатации железной дороги путем:

- создания технологий управления взаимодействием криогенной среды и техническим сооружением;
- прогноза возникновения геотехногенных источников отрицательного влияния на функционирование инженерного сооружения;
- разработки экспресс технологий по предотвращению, экспресс технологий по ликвидации возникших геотехногенных чрезвычайных ситуаций;
- принятия экстренных управляющих воздействий, направленных на ликвидацию последствий геотехногенных чрезвычайных ситуаций.

Технология функционирования любого мониторинга природной среды включает цепи наблюдений, имеющих относительно самостоятельное значение и, в то же время, взаимосвязанных друг с другом целью мониторинга [6]. Мы в своей работе используем вместо термина «Цепи» термин «Подсистема», а элементами подсистемы являются «Ритмы». Это объясняется тем, что минимальный цикл наблюдений должен соответствовать минимальному климатическому ритму – одному году, затем короткопериодным ритмам (5-6, 10-11 лет), среднепериодным и т.д. Кроме того, известная функциональная система мониторинга, предложенная В.А. Королева [6], нами расширена, и дана в модификации, используемой при организации и проведении мониторинга железной дороги АЯМ. В ее структуру введены отдельные подсистемы, обеспечивающие замкнутый цикл решения проблемы – обеспечение надежной, технически и экологически

безопасной эксплуатации железной дороги АЯМ (рис. 2).

Система мониторинга должна функционировать, начиная с периода технического обоснования строительства инженерного объекта, в период его эксплуатации, а после завершения его эксплуатации - до перехода природно-технической в природную систему. Это определяет цикличность системы мониторинга и ее периодичность. Количество периодов функционирования системы зависит от степени ответственности строящегося и эксплуатируемого сооружения. Принципиально таких периодов может быть четыре: изыскания, строительство, эксплуатация, ликвидация. В каждом из периодов объем мониторинговых наблюдений и других видов работ, их детальность и цикличность (ритмичность) должны соответствовать целевому назначению каждого из периодов жизни инженерного объекта.

В процессе функционирования геотехногенной системы, наступает время, когда она переходит в квазиравновесное состояние, при котором нарушение эксплуатации инженерного сооружения, возможно в результате:

- а) непредвиденного возникновения чрезвычайных ситуаций и б) нарушения климатических ритмов или наличия длительных флуктуаций отдельных его параметров.

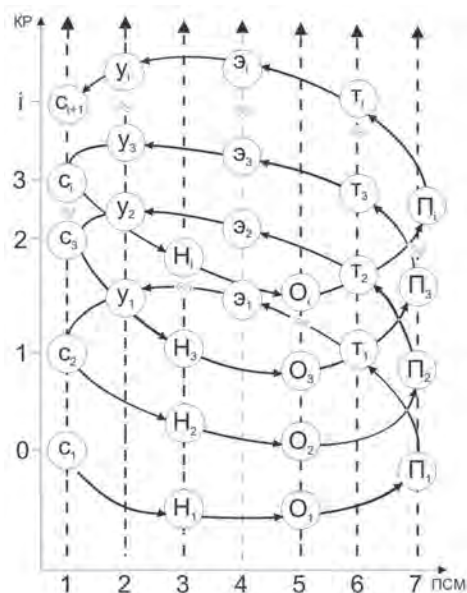


Рис. 2. Система функционирования мониторинга:

Подсистемы мониторинга (ПСМ): 1- совершенствования техники и методики наблюдений (С), 2 – экономических оценок выбора оптимальных технологий управления ПТС в заданном режиме (Э), 3 – наблюдений (Н), 4 – управления режимом теплового и механического взаимодействия криогенной



и технической среды (У), 5 – Оценок изменений параметров среды (О), 6 – прогноза изменений параметров свойств пород геотехногенной и природно-техногенной систем и их влияния на эксплуатацию сооружения (П) 7 – разработки технологий и рекомендаций по ликвидации последствий возможных геотехногенных чрезвычайных ситуаций (Р). В обозначениях индекс, соответствует климатическому ритму, равному 1 году,  $i=1,2,3...n$  (где  $n$  – заданное количество лет проведения мониторинга).

В этот период объем мониторинговых геокриологических наблюдений существенно сокращается, а оставшиеся его функции по оценке эксплуатационного состояния ПТС и ГТС включаются в состав технического мониторинга.

### Выводы

Задачи на каждом этапе строительства инженерных сооружений были различными. На этапе проектирования трассы выполняемые мониторинговые наблюдения и оценка влияния климатических параметров на криогенную среду позволили сотрудникам ИМЗ СО РАН и правительству РС(Я) убедить строителей изменить направление трассировки железной дороги, сохранить уникальный памятник природы народов Якутии – наледь Булуус.

На этапе строительства, полученный в результате проведения мониторинга массив количественной информации, характеризующий опыт эксплуатации первой очереди железной дороги, позволил проектировщикам перейти на индивидуальное проектирование конструкций железнодорожного полотна, на основе учета конкретной геокриологической обстановки на трассе. Разработка конструкций была выполнена на основе использования аналитических моделей для оценки изменений геокриологических условий, что дало возможность в каждом случае сочетать различные мероприятия по сохранению вечной мерзлоты в основании земляного полотна. На этом этапе в состав уже решаемых задач, включена еще одна задача - контроля функционирования линейного сооружения на участках с различными типами конструкций земляного полотна.

Таким образом, мониторинг в современном понимании, является сложной многоцелевой системой, направленной на разработку рациональных приемов и методов эффективного управления природно-техническими системами и создания экологически безопасных экспресс технологий предупреждения или ликвидации чрезвычайных ситуаций, воз-

никающих при взаимодействии природных с техническими системами.

В пределах криолитозоны устойчивость и эксплуатационная надежность линейных сооружений определяется преимущественно температурным режимом грунтов оснований земляного полотна, а также развитием комплекса криогенных процессов и явлений: пучения промерзающих и осадок оттаивающих грунтов, термокарста и термоэрозии, наледей и заболачивания, других процессов, оказывающих отрицательное влияние на состояние всех элементов сооружений. В связи с этим, только системный контроль состояния природных условий и технического сооружения в области взаимного их влияния, может обеспечить и рациональное использование окружающей среды, и обеспечить эффективное функционирование линейного сооружения. Решение этой задачи с минимальными расходами возможно при своевременной организации инженерно-геокриологического мониторинга, функциональная структура которого включает систематические наблюдения, оценку и прогноз трансформации криогенной среды, разработку экспресс технологий, методов и методик управления природной и технической систем трассы железной дороги АЯМ, оптимизации и технического совершенствования каждой из подсистем мониторинга.

### Список литературы

1. Алексеев, В. Р. Геокриологический мониторинг на железнодорожном транспорте / В. Р. Алексеев, Р. М. Каменский, А. В. Самохин // Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 1999. – 53 с.
2. Вернадский, В. И. Несколько слов о Ноосфере / В. И. Вернадский // Успехи современной биологии. 1944. – № 18, вып. 2. – С. 113-120.
3. Епишин, В. К. Особенности взаимодействия геологической среды и инженерных сооружений / В. К. Епишин, В. Т. Трофимов // Теоретические основы инж. геол. Социально-экономические аспекты, ред. акад. Е. М. Сергеев. – М. : Недра, 1985. – С. 32-36.
4. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.
5. Кондратьев, В. Г. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркамит – Томмот – Якутск / В. Г. Кондратьев, В. А. Позин. – Чита : Изд-во «Забтранс», 2000. – 84 с.
6. Королев, В. А. Мониторинг геологической среды / В. А. Королев ; ред. В. Т. Трофимов. – М. : Изд-во МГУ, 1995. – 272 с.
7. Мельников, П. И. Мониторинг криолитозоны / П. И. Мельников, Р. М. Каменский,

А. В. Павлов // Вестн. РАН. – 1993. –Т. 63, № 12. – С. 1090– 1095.

8. Одум, Ю. Основы экологии / Ю. Одум. – М. : 1975. – 353 с.

9. Ревзон, А. Л. Картографирование состояний геотехнических систем / А. Л. Ревзон. – М. : Недра, 1992. – 223 с.

10. Сергеев, Е. М. Инженерная геология – наука о геологической среде / Е. М. Сергеев // Инж. геология. – 1979. – № 1. – С. 1– 9.

11. Ферсман, А. Е. Химия Космоса /

А. Е. Ферсман // Избр. тр. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – Т. II. – С. 245– 364.

### References

1. Alekseev, V. R, Kamensky, R M, Samokhin, A.V. 1999. *Geocryological Monitoring on Railway Transport*. – Irkutsk: Institute of Geography Press, 53 pp. (in Russian).

2. Vernadsky, V. I. 1944. Some words about the Noosphere. *Advances in Modern Biology*, no. 18, vol. 2: 113-120 (in Russian).

3. Epishin, V. K, Trofimov, V. T. 1985. Features of interaction of the geological environment and engineering constructions. In: E.M.Sergeev (ed.). *Theoretical Bases of Engineering Geology. Social*

*and Economic Aspects*. Moscow: Nedra, 32-36. (in Russian).

4. Izrael, Y.A. 1984. *Ecology and Environmental Control*. Leningrad: Gidrometeoizdat: 560 pp. (in Russian).

5. Kondratiev, V.G., Pozin, V.A. 2000. *Concept of the System of Engineering-Geocryological Monitoring of the Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway*. Chita: Zabtrans, 84 pp. (in Russian)

6. Korolev, V.A. 1995. *Monitoring of the Geological Environment*. Moscow: Moscow State University Press, 272 pp. (in Russian).

7. Melnikov, P.I., Kamensky, P.M., Pavlov, A.B. 1993. Monitoring of cryolitozone. *Vestn. RAN* 63(12): 1090-1095. (in Russian).

8. Odum, U.P. 1971. *Fundamentals of Ecology*. (Russian Transl., Moscow: Mir, 1975), 353 pp.

9. Revzon, A.L. 1992. *Mapping of Conditions of Geotechnical Systems*. Moscow: Nedra, 223 pp. Nedra. (in Russian).

10. Sergeev, E.M. 1979. Engineering Geology — a science on Geological Environment. *J. Inzhenernaya Geologia* 1: 1-9. (in Russian).

11. Fersman, A.E. 1953. Chemistry of space. *USSR Acad. Sci. Transactions*, vol. II: 245-364. (in Russian).

## Geocryological problems in the Berkakit-Tommot section of the Amur-Yakutsk Railway

D.M. Shesternev, A.V. Litovko

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: Lav\_84@mail.ru

**Abstract.** This paper describes the geocryological conditions along the railway route. The embankment designs used in the railway construction are discussed. The methodology and results of the investigations are presented, which allowed us to classify the geocryological processes in terms of their impact on railway operation and maintenance. The main causes for the persisting problems in railway operation and maintenance are examined. Measures are proposed to mitigate these problems.

**Keywords:** geocryological problems; railway; engineering-geocryological processes; monitoring.

## Геокриологические проблемы эксплуатации участка железной дороги АЯМ «Беркакит – Томмот»

Д. М. Шестернёв, А. В. Литовко

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: Lav\_84@mail.ru

**Аннотация.** В докладе дана характеристика геокриологических условий трассы железной дороги. Рассмотрены конструктивные особенности земляного полотна, использовавшиеся для ее строительства. Приведена методика исследований и проанализированы полученные результаты, позволившие классифицировать инженерно-геокриологические процессы по степени воздействия на эксплуатацию железной дороги. Выявлены основные причины существования проблем эксплуатации железной дороги и предложены мероприятия по снижению степени их воздействия для повышения эффективности эксплуатации железной дороги.

**Ключевые слова:** геокриологические проблемы; железная дорога; инженерно-геологические процессы; мониторинг.

# Геокриологические проблемы эксплуатации участка железной дороги АЯМ «Беркабит – Томмот»

Д. М. Шестернёв, А. В. Литовко

## Введение

Проблемы эксплуатации железных дорог, вызванные геокриологическими условиями трассы изучаются Институтом мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук им. П.И. Мельникова на участке железнодорожной магистрали АЯМ «Беркабит-Томмот», в рамках Государственного контракта РС(Я) более 6 лет. В данной статье выполнено обобщение полученных в этот период результатов.

История эксплуатации отдельных участков Амуро-Якутской железной дороги начинается с 1977 г, с ввода в строй участка от станции Бамовская (Сковородино, северо-запад Амурской обл.) до Тынды, протяженностью 180 км. Его продолжение до Беркабита было осуществлено 1979 г., до Нерюнгри — в 1981 г. В дальнейшем строительство железной дороги велось медленно и только в декабре 1992 г. первый поезд пришел в Алдан (расстояние Нерюнгри - Алдан составляет 283 км). В октябре 1995 г. поезда стали ходить на 29-километровом участке от Алдана до станции Нижний Куранах, а в августе 1997 г. - до Томмота.

## 1. Инженерно-геокриологические условия района работ.

Протяженность эксплуатируемого участка железной дороги АЯМ «Беркабит—Томмот», проходящего в субмеридиональном направлении по Южной Якутии составляет 360 км. Согласно схеме инженерно-геологического районирования трасса пересекает Чульманское плато, в составе которого выделяются: Южно-Чульманское, Хатыминское и Приянгинское плато; Центрально-Алданское плоскогорье и плато, Приалданского плато [4, 5].

В пределах Чульманского плато на водоразделах распространены островные и массивно-островные многолетнемерзлые породы (ММП), прерывистые и сплошные – в долинах рек и ручьев. Как правило, ММП встречаются в средних и нижних частях склонов и в днищах долин. Площадь, занятая таликами радиационно-теплого класса изменяется от 30 до 60%.

Мощность склоновых элювиально-делювиальных, коллювиальных и аллювиальных отложений, не превышает 5-10 м,

объемная льдистость достигает 0,4-0,6 д.ед. Значение температур пород на глубине годовых их колебаний изменяется в диапазоне 0,0 ,..., -2,0° С. Мощность ММП изменяется от первых десятков до 100-150 и более м.

В полосе строительства железной дороги наиболее развитыми, экзогенными геологическими процессами и явлениями (ЭГПиЯ) являются бугры пучения, морозная сортировка, сезонные наледи, термокарст, на участках врезок – криогенное выветривание и осыпеобразование.

Алданское плоскогорье по особенностям формирования ММП подразделяют на плоскогорье и горные массивы [5].

В пределах плоскогорья на водоразделах, занимающих до 60% процентов всей территории плоскогорья, распространены островные и массивно-островные ММП, в долинах рек и ручьев – сплошные и прерывистые ММП. Наиболее низкие температуры пород достигают -4,0,...,-5,0° С. ММП приурочены к нижним частям склонов северных экспозиций, встречаются в днищах глубоко врезанных логов и на крутых, осыпных склонах. Повышение температур ММП происходит преимущественно от днищ долин к водоразделам, где они равны -0,5...-1,0°С. Мощность ММП изменяется от первых десятков до первых сотен метров.

Мощность склоновых отложений не превышает 3-5 м., аллювиальных – до 5-10 м. Комплекс ЭГПиЯ, практически не отличается от предыдущего района.

Низко- и среднегорные массивы по геокриологическим условиям существенно отличаются от геокриологических условия районов с равнинным типом рельефа. Здесь ММП занимают более 80% площади. Температура пород достигает -6,0,...,-8,0° С, мощность – до 500-700 м.

Мощность склоновых отложений чаще всего не превышает 1-3 м., аллювиальных – до 3-5 м. Комплекс ЭГПиЯ, представлен криогенным выветриванием, курумами, осыпями, наледями.

В Центрально-Алданской области по геокриологическим условиям выделяется три района: 1) инверсионное поднятие центральной части Верхне-Якокитской впадины; 2) высокие (абс. отм. 1200-1600 м) и 3) низкие (до 1200 м) водораздельные поверхности.



В первом районе температура ММП изменяется в пределах  $0,0 \dots -4,0^\circ \text{C}$ , мощность – до 300-400 м. Во втором районе преобладают узкие водоразделы с крутыми затененными склонами. Температура пород здесь может достигать  $-6,0 \dots -7,0^\circ \text{C}$ . На крутых склонах глубоко врезанных долин, где развита температурная инверсия, температура пород может быть и ниже. В третьем районе, в сравнение первыми двумя, геокриологические условия менее суровые. Среднегодовые температуры ММП достигают  $-0,5 \dots -1,0^\circ \text{C}$ , мощность, по видимому, не превышает 100 м.

Условий для развития таликов в первых двух зонах практически нет, в третьем районе они встречаются, на участках сложенных сильно трещиноватыми кристаллическими коренными породами, перекрытыми, крупнообломочными отложениями малой мощности. Их развитие обусловлено конвективным теплопереносом, формирующимся при инфильтрации атмосферных осадков

В верховьях долин рек рассматриваемой области, где подземные воды залегают на больших глубинах, преобладает сплошное распространение ММП мощностью до 200 м, в средних и нижних частях долин, при близком залегании подземных вод к дневной поверхности, мощность ММП сокращается до 100 м. В местах, где происходит питание и разгрузка подземных вод ММП отсутствуют.

Для Приалданского плато, сложенного нижнекембрийскими карбонатными породами, в отличие от выше рассмотренных инженерно-геологических областей, характерно островное распространение ММП. Они встречаются преимущественно в долинах рек и на отдельных участках водоразделов. Температура ММП изменяется в пределах  $-0,5 \dots -2,0^\circ \text{C}$ .

В рассматриваемом районе талики, как правило, развиты под руслами водотоков, сезонномерзлые породы развиты в пределах водоразделов, сложенных известняками и доломитами. В пределах их распространения повсеместно встречаются современные и древние карстовые формы рельефа.

Карстовые полости, заполненные песчаными отложениями, находятся в талом состоянии, глинистыми отложениями – в мерзлом состоянии, с отрицательными температурой не ниже  $-0,1 \dots -0,5^\circ \text{C}$ .

Температура на подошве сезонномерзлых пород на водоразделах составляет  $+1,0 \dots +3,0^\circ \text{C}$ . Формирование положительных температур пород в значительной мере обусловлено высокими фильтрационными свойствами пород древней коры выветрива-

ния. На участках, где древняя кора выветривания сформировалась в массивах мергелей, распространены ММП островного типа. Их мощность, как и мощность ММП в карстовых западинах достигает преимущественно первых десятков метров.

Наиболее суровые геокриологические условия существуют в долинах рек и ручьев. ММП на склонах северной экспозиции горного обрамления речных долин прослеживаются до бровки водоразделов, восточной – занимают нижнюю и среднюю часть склонов, южной – только в нижней их части.

В долинах рек и ручьев геокриологические условия характеризуются большим разнообразием, которое обусловлено отличающимися комплексами факторов их образующими в долинах мелких ручьев, долинах крупных ручьев и малых рек, в долинах средних и больших рек.

В первом случае ММП характеризуются прерывистым распространением. Аллювиальные отложения преимущественно крупнообломочные с различным содержанием глинистой составляющей, мощностью 2-8 м. Как правило, подошва ММП здесь залегает значительно глубже этой мощности.

В формировании геокриологических условий крупных рек принимает участие русловой поток, способствующий формированию таликов. Наличие или отсутствие ММП в пределах пойменных и надпойменных террас определяет преимущественно литологический состав их отложений и ландшафтно-ботанические условия. Аллювиальные глинистые отложения и отложения, перекрытые мощным мохово-торфяным слоем находятся преимущественно в мерзлом состоянии. На участках сложенных песчаными аллювиальными отложениями, ММП отсутствуют.

Русла средних рек Якобит, Большой Кураных и др. в Приалданском плато достигают ширины 50 м и более, сильно меандрируют, а пойма и 1-я надпойменная террасы достаточно широкие и ровные. Вторая терраса развита фрагментарно, в виде узких, небольшой протяженностью, полос. На участках развития древнего аллювия мощность отложений достигает 30-60 м., а в районе пересечения р. Якобитом магистрали АЯМ достигает 100...120 м. В составе аллювиальных отложений преобладают переслаивающиеся пески, супеси и суглинки с линзами и прослоями торфов.

Сложные геокриологические условия, предопределили наличие трудностей в проектировании, строительстве и эксплуатации участка железной дороги Беркакит – Кердем. Мониторинговые наблюдения показывают,

что и до сих пор, их присутствие осложняет функционирование этого участка железной дороги АЯМ.

## 2. Результаты обследований трассы в период с 1988 по 2010 гг.

Строительство любых линейных сооружений, как известно, сопровождается значительным техническим воздействием на природную среду. Наиболее распространенными из них являются вырубка леса, нарушение или снятие мохово-торфяного покрова, изменение естественного стока поверхностных вод и т.п. Кроме того, строительство земляного полотна сопровождается формированием искусственных положительных форм микрорельефа, врезками и подрезками склонов. Это приводит к изменению теплообмена на поверхности породы, как правило, сопровождается увеличением глубин сезонного их оттаивания, частичной или полной деградацией ММП. В результате во многих случаях, сохранить основание в мерзлом состоянии не удается [1, 4]. Изучение сотрудниками ИМЗ СО РАН динамики температуры грунтов в основании земляного полотна и на берме насыпи, отсыпанных в 1994–1995 гг. глыбово-щебенистыми доломитами с дресвяно-суглинистым заполнителем (около 30% объема насыпи) показали, что это может и не выполняться (таблица).

Температура ММП в основании насыпи (пикет 3837) и на берме насыпи (пикет 3840), г. Томмот

h, м	Косогорная насыпь h= 3,5 м (пикет 3837)				Берма h= 2 м (пикет 3840)			
	30.09.05	06.10.06	30.03.07	02.10.08	30.09.05	06.10.06	30.03.07	02.10.08
6	0	0,2	-0,5	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-0,8
7	-0,7	-0,5	-0,6	-0,6	-1,5	-1,2	-1,4	-1,3
8	-1,1	-0,7	-0,8	-0,8	-2,0	-1,5	-1,5	-1,5
9	-1,2	-0,8	-0,9	-0,9	-2,2	-1,8	-1,8	-1,8
10	-1,2	-0,8	-1,0	-0,8	-2,3	-2,0	-2,0	-2,0

Приведенные в таблице данные свидетельствуют, что температура грунтов основания насыпей в районе г. Томмота через 10 лет после отсыпки начала стабилизироваться и верхняя граница ММП, по-видимому, уже начинает подниматься. Дальнейшие наблюдения позволят установить ее динамику, на которую оказал влияние своеобразный «тепловой пресс», в виде земляного полотна, отсыпанного в летний период при строитель-

стве насыпи. Значительно более высокий темп охлаждения наблюдается в основании грунтов бермы (рис. 1).



Рис. 1. Устойчивая берма (230 км).

Выполненные в течение десяти лет обследования трассы различными организациями не дают еще большого оптимизма по улучшению эксплуатационных характеристик основания земляного полотна.

В первые годы эксплуатации трассы обследования, выполненные сотрудниками Мосгипротранса позволили выявить более 120 участков деформаций земляного полотна. Основными противодеформационными мероприятиями для их устранения были досыпки насыпи земляного полотна крупнообломочным грунтом [4].

В 2000-2002 гг. аналогичные исследования, выполненные сотрудниками проектно-исследовательского института Проектранстрой показали, что на участках где были реализованы противодеформационные проекты, деформации прекратились. Однако и в этот период были установлены деформации на 12 участках общей протяженностью 35 км, что составляло 9,3% от всей ее протяженности. Деформации оснований земляной насыпи, обусловленные деградацией льдистых грунтов III-IV категории просадочности были выявлены 32 км, 35-38 км, 117-123 км, 263-241 км, 355-358 км., деформации земляного полотна обусловленные разрывом грунтов насыпей установлены на 126, 309, 355 и 362 километрах [1].

Результаты выполненных в 2010 г. обследований службы технического контроля эксплуатируемого участка железной дороги, и сотрудниками ИМЗ СО РАН, в целом, совпадают. Они показывают, что период стабилизации земляного полотна еще не наступил. На отрезке железной дороги от ст. Нерюнгри II до ст. Таежная, протяженностью 132 км, установлено 31 случай нарушения эксплуата-

ционных характеристик земляного полотна, 11 из которых связаны с деформациями оснований многолетнемерзлых грунтов. Общая протяженность нестабильных участков земляного полотна в настоящее время достигла 16 км, или 12% от всей протяженности отрезка трассы АЯМ. На разрушение насыпей оказывают влияние и эрозионные процессы (рис. 2).



Рис. 2. Сплыв откоса насыпи в результате размыва ее основания в паводок у мостового перехода. Верховье ручья Васильевский (171 км).

На втором отрезке железной дороги Беркакит – Томмот от 158 км до ст. Томмот выявлено 27 нестабильных участков земляного полотна с различными типами нарушений, 9 из которых вызваны деформациями основания (рис. 3).



Рис. 3. Деформация земляного полотна. (174 км).

Общая длина исследуемого участка 102 км, суммарная протяженность нестабильных участков земляного полотна составляет 9,5 км или 9,3%.

Увеличение интенсивности и площади развития криогенных процессов и явлений дестабилизирующих эффективную эксплуатацию участка железной дороги АЯМ «Беркакит-Томмот» свидетельствует о том, что, вновь сформировавшаяся и функционирующая природно-техническая система,

еще далека от перехода в квазиравновесное состояние. В связи с этим, мониторинговые исследования в ее пределах необходимо не сокращать, а существенно расширить и направить на разработку экспресс технологий для управления кинетикой и механикой криогенных процессов и явлений.

### Заключение

1. Главными факторами, определяющими пространственную изменчивость характера и интенсивности мерзлотных процессов в полосе строительства АЯМа, является:

- большая амплитуда изменения абсолютных отметок местности, что вызывает четкую проявляющуюся высотную зональность в развитии процессов;

- значительная протяженность трассы с юга на север (800 км) в субмеридиональном направлении, обуславливает изменчивость природных условий и определяет особенности в распространении и видовом разнообразии криогенных процессов в Южной и Центральной Якутии;

- история геологического развития территории, рельеф, ландшафтно-ботанические, гидрологические и гидрогеологических условий.

2. Для эксплуатационной надежности железных дорог, построенных на многолетнемерзлых породах необходимо выполнить, по крайней мере, три условия:

- осуществить производство инженерно-геологических изысканий с высоким качеством и достаточным количеством информации, включая карту прогноза инженерно-геокриологических условий при хозяйственном освоении территории, для обеспечения индивидуального проектирования;

- при проектировании трассы типовые решения должны иметь подчиненное значение, а приоритет необходимо отдавать индивидуальному типу проектирования, базирующемуся на геокриологическом прогнозе;

- при строительстве в полосе трассы линейного сооружения необходимо допускать минимальное техническое воздействие на криогенную среду.

3. Возведение железной дороги приводит к существенным изменениям температурного режима мерзлых грунтов основания, а изменяющиеся мерзлотно-грунтовые условия приводят к снижению надежности и безопасности железнодорожной магистрали. Поэтому необходимо дальнейшее изучение взаимодействия инженерных сооружений и массива многолетнемерзлых пород, проявляющегося в различных формах. Устойчивость железнодо-



рожного полотна в суровых климатических и сложных инженерно-геологических условиях, остается трудно прогнозируемой, несмотря на то, что уже имеется опыт строительства и эксплуатации Восточно-Сибирской железной дороги и Байкало-Амурской магистрали.

3. Попытка решить проблему устойчивой конструкции земляного полотна железной дороги только за счет более строгого обоснования использования ММП с учетом существующих принципов строительства, в условиях глобального изменения климата возможна, но только при строгом учете динамики всех факторов природной среды, от которых зависит состояние грунтов основания инженерного сооружения;

4. Нам представляется, что способ назначения расчетной высоты насыпи для сохранения многолетнемерзлых грунтов в их основании, несмотря на его критику, не исчерпал себя и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в широком диапазоне изменения термодинамических условий существования земляного полотна.

5. Несмотря на продолжительное время эксплуатации пионерного участка железнодорожной магистрали АЯМ – Беркамит - Томмот, долгое время существования нестабильных участков и появление новых, влияющих на эксплуатационные его параметры требует длительного времени функционирования геокриологического мониторинга.

#### Список литературы

1. Байкова, Л. А. Состояние земляного полотна новой железнодорожной магистрали Беркамит – Томмот / Л. А. Байкова, М. С. Шавлохов, Д. А. Спиридонов // Материалы научно-практической конференции: тезисы докладов. – Якутск : Центр «Трнстройиздат», 2003. – С. 20–21.

2. Васильев, И. С. Мерзлотно-ландшафтное районирование трассы строящейся железной дороги Томмот – Кердем / И. С. Васильев, С. П. Варламов, А. Н. Федоров, М. Н. Железняк // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 3. – С. 15–23.

3. Винокуров, С. В. Дорожно-транспортные перспективы Республики Саха / С. В. Винокуров // Направление – Дальний Восток. – Хабаровск : изд-во ООО «Направление – ДВ», 2011, № 3. – С. 18-19.

4. Кондратьев, В. Г. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркамит-Томмот-Якутск / В. Г. Кондратьев, В. А. Позин. – Чита : изд-во «Забтранс», 2000 – 83 с.

5. Южная Якутия. – М. : изд-во Моск. гос. ун-та, 1975. – 444 с.

#### References

1. Baikova, L.A., Shavlokhov, M.S., Spiridonov, D.A. 2003. Performance of the new Berkakit-Tommot railway embankment. *Proceedings of the Scientific-Practical Conference, Yakutsk, Russia*, 2003, pp. 20-21. (in Russian)

2. Vasiliev, I.S., Varlamov, S.P., Fedorov, A.N., Zheleznyak, M.N. 2007. Permafrost-landscape system of the Tommot-Kerdem Railway route area. *J. Kriosfera Zemli XI(3)*: 29-34. (in Russian)

3. Vinokurov, S.V. 2011. Prospects of road and railway transportation in the Republic of Sakha. *J. Napravlenie-Dalny Vostok 3*: 18-19. (in Russian)

4. Kondratiev, V.G., Pozin, V.A. 2000. *Concept of the System of Engineering-Geocryological Monitoring of the Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway*. Chita: Zabtrans, 84 pp. (in Russian)

5. Kudryavtsev, V.A. (ed.) 1975. *Southern Yakutia*. Moscow: Moscow State University Press, 444 pp. (in Russian)



## **Permafrost conditions and their changes in the “ice-wedge complex” section of the Amur-Yakutsk Railway**

D.M. Shesternev, N.I. Shender, S.P. Varlamov, A.V. Litovko, Yu.G. Sleptsova

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: Lav\_84@mail.ru

**Abstract.** This paper describes the permafrost conditions in the section of the Amur-Yakutsk Railway traversing ice-rich permafrost with ice wedges between KP 688 and 734. A methodology is presented for ground temperature observations within 10 m depth on an annual cycle. Changes in permafrost conditions in response to natural climate variability and construction activities are examined. Embankment designs adopted to protect the permafrost during railway construction and operation are characterized. Measures are proposed to control embankment performance in the ice-rich permafrost section of the railway.

**Keywords:** permafrost; ice wedges; permafrost and embankment monitoring; geocryological conditions.

## **Геокриологические условия и их изменения при строительстве железной дороги АЯМ на участке «ледового комплекса»**

Д. М. Шестернев, Н. И. Шендер, С. П. Варламов, А. В. Литовко, Ю. Г. Слепцова

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН,  
e-mail: Lav\_84@mail.ru

**Аннотация.** В докладе дана характеристика геокриологических условий «ледового комплекса», наиболее сложного участка (688 км – 734 км) строительства железной дороги АЯМ. Приведена методика исследований температур пород в годовом цикле их изменений до глубины 10 м. Показаны изменения геокриологических условий на территории ледового комплекса в ходе естественного изменения климата и под воздействием различного типа технической нагрузки. Дана характеристика используемых конструкций земляного полотна для строительства железной дороги по Принципу – I (сохранение многолетнемерзлых пород основания линейного сооружения при строительстве и на период его эксплуатации). Предложена система мероприятий по контролю качества выбранных конструкций для обеспечения эффективной эксплуатации железной дороги на участке ледового комплекса.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы; повторно-жильные льды; инженерно-геокриологический мониторинг; геокриологические условия.

## Геокриологические условия и их изменения при строительстве железной дороги АЯМ на участке «ледового комплекса»

Д. М. Шестернев, Н. И. Шендер, С. П. Варламов, А. В. Литовко, Ю. Г. Слепцова

### Введение

Под ледовым комплексом обычно понимают плащеобразно залегающий горизонт сильно льдистых отложений различного генезиса, состава, строения и свойств.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, в последние десятилетия выполняет комплексные фундаментальные и прикладные исследования геокриологических условий территории строительства железнодорожной магистрали АЯМ. В них принимали участие С.П. Варламов, П.П. Гаврильев, М.Н. Железняк, С.И. Заболотник, В.В. Куницкий, И.П. Константинов, И.С. Угаров, Н.И. Шендер и др. В результате получены дополнительные сведения о закономерностях формирования геокриологических условий «ледового комплекса». Обращено внимание на особенности их изменений от технической нагрузки на ландшафты. Показано, что естественное изменение климата, не окажет на «ледовый комплекс» большого влияния.

Доклад написан по результатам исследований ИМЗ СО РАН, выполненным в соответствии с программой Государственного контракта РС (Я). Цель работы заключалась в создании геокриологического мониторинга и оценке динамики геокриологических условий в полосе строительства железнодорожной магистрали АЯМ на участке Беркакит-Томмот-Кердем, включая территорию распространения ледового комплекса.

### Методика исследований

Исследования геокриологических условий ледового комплекса в мониторинговом режиме выполняются с 1987 г. по настоящее время. Выполненное на начальном этапе ландшафтное районирование территории исследований позволило обосновать границы стационаров и выполнить их оборудование (рис. 1).

Первая стационарная площадка расположена между населенными пунктами Качикатцы и ст. Нижний Бестях, вторая - в районе ст. Олень. Обе площадки оборудованы полигонами и стационарными пунктами исследований температур пород до глубины 10 м.

Изменение основных климатических характеристик отслеживается по данным

метеостанции г. Якутска. Для установления закономерностей формирования параметров снежного покрова, ежегодно, в конце зимы, производится снегомерная съемка.

На территории площадок проводится зон-дировочное бурение, для изучения состава, строения и свойств грунтов в изменяющихся природных условиях трассы АЯМ.



Рис. 1. Схема района исследований:

1 – стационары, 2 – полигоны, 3 – площади ландшафтного картографирования.

В 2009-2010 гг. выполнено дооборудование ключевых участков мониторинговой геодезической и геотермической сети, с учетом используемых строителями конструкций земляного полотна. В состав комплекса инженерно-геокриологических исследований входили следующие виды работ:

- проходка горных выработок на участках распространения высокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП), на марях, водонасыщенных, мерзлых и льдистых грунтах;
- оборудования геотермических скважин

и реперов, глубиной не менее 10 м, установке геодезических марок;

Оборудование термометрической и геодезической сети наблюдений выполнялось по профилям, ориентированным по нормали к

земляному полотну. Измерение температур осуществлялось с применением логгеров и термогилян (рис. 2).

На каждом профиле было оборудовано 3...5 и более пунктов наблюдений, каждый

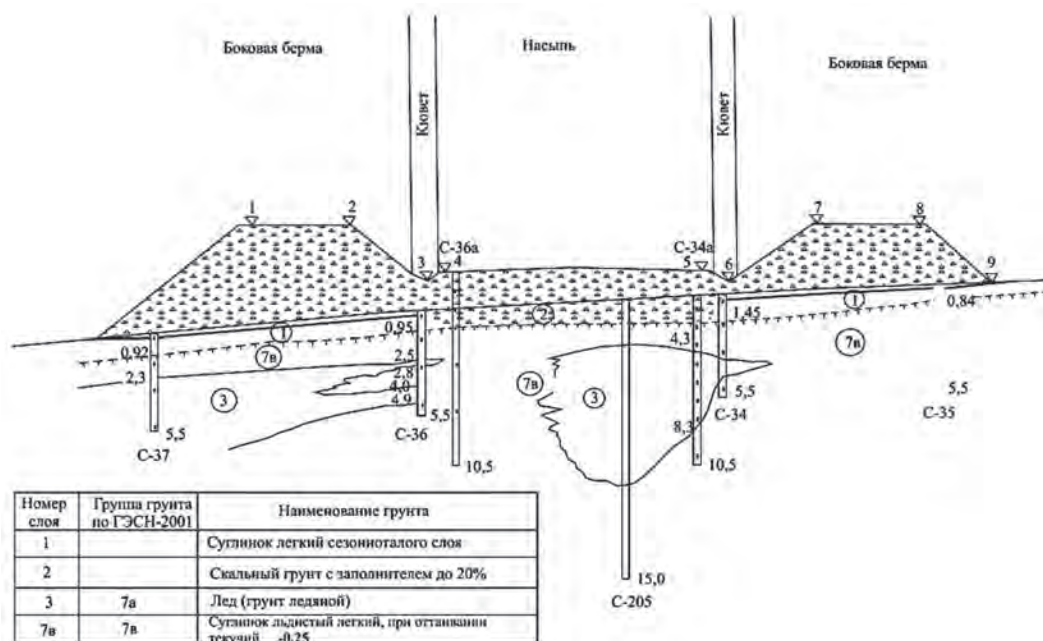


Рис. 2. Типовое обустройство в 2010 г. контроля изменения температур и деформаций земляного полотна железной дороги АЯМ (ПК 7175).

1-9 – марки геодезического контроля состояния земляного полотна; C-34а, C-36а –СОУ (сезонно охлаждающее устройство) без геодезического контроля; C-37, 36, 35, 34 - термометрические пункты наблюдений.

из которых располагался с учетом характера изменений природной среды.

Объектами исследований «ледового комплекса» являлись: криогенная среда - слой сезонного оттаивания и промерзания пород, ММП до глубины годовых колебаний температур;

- снежный покров, как самый мощный теп-лоизолирующий фактор, оказывающий влияние на формирование верхних граничных условий существования криогенной среды;

- криогенные процессы и явления (КПиЯ), развивающиеся в естественных природных условиях и под воздействием различных техногенных факторов в полосе трассы железнодорожной магистрали АЯМ.

- температурное поле грунтов оснований и земляного полотна на участках строительства магистрали по Принципу-1, предусматривающего, сохранение ММП при строительстве и на период ее эксплуатации.

Перечисленные виды исследований были выполнены в соответствии с требованиями нормативных документами (ГОСТ, СНИП, ведомственными нормативами).

### Результаты исследований

Климат. В Центральной Якутии в последние 30 лет наблюдается один из наиболее высоких в России трендов повышения среднегодовой температуры воздуха (до  $0,08^{\circ}$  C/год). Если в 60-70 годы прошлого века потепление климата еще не было таким заметным, то в 80-е годы оно проявилось уже достаточно отчетливо. Последние два десятилетия XX века и первое десятилетие

XXI в., были самыми теплыми за всю историю метеорологических наблюдений в Центральной Якутии[5] В этот период среднегодовая температура воздуха лишь дважды оказывалось ниже нормы, равной  $-10^{\circ}$  C. Из работ Ю.Б. Скачкова следует, что повышение среднегодовой температуры воздуха в Якутии связано, в первую очередь, с увеличением числа аномально теплых зим, формирующихся в результате трансформации циркуляции воздуха в атмосфере.

За период с 1981 по 2007 гг. отмечалось 19 зим с суммой отрицательных температур воздуха выше среднемноголетнего значения. Особенно примечателен период с 1988 по

2007 г., когда зимние сезоны ежегодно «не добирали» до нормы в среднем по 10% «положенного холода». Увеличение температуры воздуха в летние сезоны было менее значимым. Мощность снежного покрова в это период изменялась в пределах 0,4...0,6 м.

Распространение, строение и температура пород «ледового комплекса». В естественных условиях его верхняя граница, залегает преимущественно на глубине 1,5-2,5 м. В строении «ледового комплекса» кроме текстурообразующего льда, часто встречаются жильные и пластовые льды, мощностью 3-4 и более метров.

Исследования Института мерзлотоведения в рамках Госконтракта РС (Я) в 2005-2007 гг., обобщение результатов инженерно-геологических изысканий Южно-Якутского и Якутского ТИСИЗов позволили составить карту льдистости пород «ледового комплекса» на участке ст. Олень-ст. Кердем. Согласно составленной карте границы «ледового комплекса» в пределах Абалахской надпойменной террасы р. Лена (км 703 – км 743), можно расширить и считать, что железная дорога пересекает грунты аналогичного типа, что и «ледовый комплекс», на отрезке трассы 670 км – 750 км.

Таким образом, первый участок «ледового комплекса» приурочен к Ленно-Амгинскому песчаниковому району на его северной периферии (км 669 – км 703). Здесь рыхлые льдистые четвертичные отложения залегают на юрских песчаниках. В пределах р. Лютенги (км 689 – км 694) рыхлые четвертичные отложения залегают на кембрийских известняках и доломитах. В их пределах выделяются подрайоны - собственно песчаниковый (км 670 – км 688) и переходный - полигенетической равнины (км 688 – км 703). В первом подрайоне мощность четвертичных отложений составляет 5-8 м с льдистостью более 0,3 д.ед. В переходной зоне колебаний, нижней границы подошвы слоя сезонного оттаивания, установлен выдержанный по простиранию слой льда мощностью до 0,5 м. Температура массива пород на глубине годовых колебаний температуры  $-1,0...-2,0^{\circ}\text{C}$ .

В пределах переходной полигональной равнины, распространены четвертичные отложения с полигонально-жильными льдами. Мощность отложений 15...20 м. Мощность пластовых льдов, встреченных здесь достигает 10 м.

Температура грунтов в подрайонах отличается незначительно и изменяется на глубине годовых колебаний в пределах  $-1,2...-2,5^{\circ}\text{C}$ . Глубина сезонного оттаивания и промерза-

ния грунтов составляет 0,8-1,8 м. В долине р. Лютенки диапазон изменения температур грунтов значительно шире и составляет  $-0,8...-4,4^{\circ}\text{C}$ .

Второй участок, собственно «ледовый комплекс», расположен в пределах Виллойской синеклизы. Трасса железной дороги пересекает его в зоне смыкания синеклизы с Алданской антеклизой.

В геоморфологическом отношении «ледовый комплекс» расположен на V надпойменной (Абалахской) среднеплейстоценовой тер-расе р. Лены. В пределах распространения «Ледового комплекса» существует большое количество разнообразных типов местности: региональный склон Лено-Алданского плато; межаласный водораздел; склон межаласного водораздела; озерно-аласная котловина; межкотловинное понижение; склоны речных долин; днища речных долин [1, 2].

Поверхность Абалахской террасы практически состоит из аласных понижений и межаласий. Современные аласы заняты озерами, под которыми существуют несквозные талики. В пределах древних аласов отмечается новообразование криолитозоны. В межаласовых поднятиях, развиты повторно-жильные льды и высокольдистые грунты. Наряду с этим в межаласиях встречаются, маловлажные грунты в слое сезонного оттаивания и промерзания мощностью 2,0-2,5 м. Мощность отложений «ледового комплекса» достигает 20-25 м, ниже, до глубины 50 м, залегают аллювиальные маловлажные, влажные реже – насыщенные водой грунты. Температура грунтов на глубине годовых их колебаний на межаласье изменяется в пределах  $-2,5...-4,0$ , в днищах аласов –  $-0,5...-2,5^{\circ}\text{C}$ , глубина сезонного оттаивания составляет 0,5...2,5 м

Исследования П.П. Гаврильева и И.С. Угарова [3], выполненные на лево- и правобережье (ледовый комплекс) р. Лены показали, что при отсутствии нарушений в пределах луговых ландшафтов за 18 лет тренд увеличения глубины сезонного оттаивания составил 0,024, лесных – 0,014 м/год. В это же время с 1989 по 2007 годы в пределах полигона Майя, на раскорчеванных участках лесных ландшафтов с дальнейшим их использованием в сельском хозяйстве произошло повышение температур пород от  $-3,0...-5,0$  до  $-0,5...-2,0^{\circ}\text{C}$ , в пределах распаханых межаласовых луговых ландшафтов до  $-1,0...-2,0$ , а на склонах температура пород была в 2001 г. была уже не ниже  $-1,0^{\circ}\text{C}$ . Глубина сезонного оттаивания в отдельных случаях увеличилась от 1,5 до 4,5 м. На рассмотренных выше территориях локальные просадки диаметром до 0,6 м



достигали глубины 1,5 и более метров, а их количество увеличилось в 25-30 раз.

Аналогичные исследования, выполненные И.П. Константиновым, Н.И. Шендером, другими авторами статьи, в пределах «ледового комплекса» на трассе железной дороги АЯМ показали, что изменения температур, увеличения глубин слоя сезонного оттаивания и деформаций оттаивающих грунтов существенно зависят от типов нарушения почвенно-растительных покровов (рис. 3).



Рис. 3. Изменение глубины сезонного протаивания грунтов «ледового комплекса»

1 - поверхность с естественной растительностью; 2 – поверхность с удалением лесорастительного покрова (вырубка); 3 – поверхность с удаленным напочвенным (мощность 10-20 см) и лесорастительным покровами.

В ненарушенных условиях глубина сезонного оттаивания грунтов в период с 2005 по 2009 год практически не изменилась, при вырубке леса - увеличилась от 0,8 до 1,7, при удалении напочвенного покрова – от 0,8 до 2,7 м (рис.3). Этого увеличения глубин сезонного оттаивания достаточно, чтобы вызвать развитие термокарста, поскольку верхняя граница залегания жильных льдов часто находится в интервале 1,5...2,3 м.

В пределах распространения льдистых и высокольдистых грунтов, даже при высоких их отрицательных температурах, при проектировании строительства АЯМ на участке «ледового комплекса», предпочтение было отдано использованию Принципу I. Но его применение требует достаточно надежных, и часто индивидуальных мероприятий, обеспечивающих сохранение существующих параметров криолитозоны или их улучшение.

Разработка индивидуальных конструкций земляного полотна осуществлялась ООО «Проекттрансстрой» с использованием разработок МИИТа, при участии ИМЗ СО РАН, ЦНИИСа, ТрансИГЭМ. Несомненно, был учтен и опыт строительства и эксплуатации железных дорог в России и за ее пределами [4]. К сожалению, воздействие криогенных

процессов на земляное полотно и их влияние не изменение структуры температурного поля в полосе трассы в целом, не учитывалось.

В комплекс мероприятий, определяющих возможность использования Принципа I, входят: 1) вертикальные парождкостные СОУ в сочетании с теплоизолятором – пенополистиролом на 39 участках (км 693 – км 710, км 730), общей протяженностью 4,9 км (грунты IV категории просадочности); 2) тепловая изоляция из экструдированного пенополистирола толщиной 5 см на откосах и бортах (на км 709 протяженностью 129 м); 3) устройство консольных солнцезащитных навесов на откосах(на км 709 протяженностью 100 м); 4) устройством СОУ (на км 109 протяженностью 100 м). Мероприятия 2, 3 и 4 были использованы на опытном участке, в пределах которого геокриологические условия примерно одинаковы. Для установления эффективности перечисленных мероприятий, Институтом мерзлотоведения в 2007-2010 гг. на 4-х участках было оборудовано 9 термометрических створов (ПК 6926, 6932, 6934, 7087, 7088, 7089, 7175+15, 7179, 7270+23).

Первые результаты наблюдений за изменением температуры пород в основаниях земляного полотна, построенного по индивидуальным проектам, с применением управляющих технологий по защите грунтов оснований от протаивания, дали в целом положительные результаты. При существующей тенденции к повышению температур на глубинах 1,5...2,0 м в течение 2-х последних лет, температура грунтов на этих глубинах колебалась в пределах -1,0...-2,0°C. В то же время в бортах откосов и в пределах водоотводных кюветов температура пород начала повышаться, увеличивается здесь и глубина сезонного протаивания. В результате в полосе трассы, наблюдается развитие нежелательных физико-геологических, криогенных процессов и явлений.

В пределах трассы железной дороги, на участке развития «ледового комплекса» в периферийных зонах земляного полотна широкое развитие получили следующие КПиЯ: сезонное наледеобразование, пучение, термокарст и термоэрозия; в бортах выемок – оползни, сплывы, термоэрозия; на контакте земляного полотна и периферийных участков трассы и кюветах – осадки, просадки, заболачивание, термоэрозия; в пределах искусственных сооружений: мостов – размыв грунтов земляного полотна, осыпи, сплывы; водопропускных труб – термокарст, просадки и осадки на периферии сооружений и в основании земляного полотна.

Уже в настоящее время суммарный эффект воздействия на состояние земляного полотна проявляется в фрагментарном изменении его контуров, а в пределах искусственных сооружений – в виде незначительных деформаций.

### Выводы

Необходимо отметить, что в отличие от строительства участка Беркакит-Томмот, строители сумели в экстренном порядке разработать и применить современные технологии управления температурным режимом грунтов в основании земляного полотна. Результаты наблюдений изменения геокриологических условий при строительстве железной дороги на участке распространения «ледового комплекса», выполненные в последние три года показали:

1. Глобальное изменение климата, в сравнение с техногенным прессингом оказывает на изменение геокриологических условий медленное и незначительное влияние.

2. Первые результаты наблюдений за изменением температуры пород в основаниях земляного полотна, построенного по индивидуальным проектам, с применением управляющих технологий по защите оснований от протаивания, дали в целом положительные результаты.

3. Техногенный прессинг, заключающийся в рубке леса и снятии напочвенного покрова повышает температуру пород от  $-3,0 \dots -5,0$  до  $-1,0 \dots -2,0^\circ\text{C}$ , а глубину сезонного оттаивания в 2-3 раза (от 0,75 до 2,5-3,0 м).

4. В периферийных зонах земляного полотна, на участках строительства искусственных сооружений развит комплекс криогенных процессов и явлений, суммарный эффект воздействия от которого на состояние грунтов основания земляного полотна может быть выше примененных управляющих технологий.

5. Используемые индивидуальные конструкции земляного полотна, при всей их обособанности, все-таки, могут быть эффективными только в том случае, если будет решена задача по оводу поверхностных вод из коридора трассы.

6. На наш взгляд, было бы ошибкой считать, что уже сейчас можно быть полностью уверенным, в положительном результате применения выше перечисленных технологий обеспечения функционирования оснований земляного полотна по Принципу I. Поэтому, мониторинговые исследования в пределах трассы АЯМ должны быть длительными и регулярными, и обеспечивать объективную оценку качества используемых разработанных и известных конструкций земляного полотна в условиях криолитозоны.

### Список литературы

1. Варламов, С. П. Инженерно-геокриологические условия территории распространения пород ледового комплекса на строящейся железнодорожной магистрали Томмот-Якутск / С. П. Варламов // Проблемы. инж. Мерзлотоведения : мат-лы VII Междунар. Симпозиума, 21-23.11.2007. – Чита, 2007. – С. 77-81.

2. Васильев, И. С. Мерзлотно-ландшафтное районирование трассы строящейся железной дороги Томмот-Кердем / И. С. Васильев, С. П. Варламов, А. Н. Федоров, М. Н. Железняк. // Криосфера Земли. – 2007. – Т. XI, № 3. – С. 29-34.

3. Гаврильев, П. П. Реакция пород ледового комплекса центральной Якутии на потепление климата / П. П. Гаврильев, И. С. Угаров // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII, № 1. – С. 24-30.

4. Позин, В. А. Проект решения по земляному полотну на участках «ледового комплекса» / В. А. Позин, И. П. Лукин, Н. П. Дедова // Обеспечение надежности строящихся сооружений железнодорожной линии Томмот – Кердем на участке «ледового комплекса» : мат-лы Семинара-совещания 11-12 сентября 2007 г. в г. Якутске. – Якутск : ООО «Центр Трансстройиздат», 2007. – С. 39-60.

5. Шац, М. М. Изменение климата Якутска и его влияние на городскую инфраструктуру / М. М. Шац, Ю. Б. Скачков // Чистый город. – 2010. – № 2 (50). – С. 16-22.

### References

1. Varlamov, S.P. 2007. Permafrost Conditions in Ice-Rich Terrain along the Tommot-Yakutsk Railway Project. In: D.M. Shesternev, R.V. Zhang, A.B. Ptitsyn (eds.). *Permafrost Engineering, Proceedings of the Seventh International Symposium, 21-23 November 2007, Chita, Russia: 77-81*. Yakutsk: Permafrost Institute Press (in Russian)

2. I.S. Vasiliev, S.P. Varlamov, A.N. Fedorov, M.N. Zheleznyak. 2007. Permafrost-landscape system of the Tommot-Kerdem Railway route area. *J. Kriosfera Zemli XI(3): 29-34*. (in Russian)

3. Gavriliev P.P., Ugarov I.S. 2009. The response of ice-rich permafrost in central yakutia to climate warming. *J. Kriosfera Zemli XIII(1): 24-30*(in Russian)

4. Pozin V. A, Lukin I.P., Dedova N.P. 2007. Project of the decision on an earthen cloth on sites of the " Ice complex» *Proceedings of the Workshop on Structural Reliability of the Tommot-Kerdem Railway in the Ice-Complex Area, 11-12 September 2007, Yakutsk, Russia: 39-60*. Yakutsk: ООО Center Transstroiiizdat, (in Russian)

5. Shats M.M, Skachkov U.B. 2010. Climate's change of Yakutsk and its influence on a city infrastructure. *J. Clean city Saubere Stadt. № 2 (50): 16-22* (in Russian)

# Ground temperatures around and beneath the Yakutsk CHP plant buildings

S.I. Zabolotnik, P.S. Zabolotnik

Melnikov Permafrost Institute SB RAS

Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: zabolotnik@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Ground temperatures at the Yakutsk Combined Heat and Power (CHP) plant site were measured monthly in 38 boreholes, up to 16 m in depth, for two years (2008 and 2009). Measurements were made beneath the buildings (16 boreholes) and around the buildings along their walls (21 boreholes). Taliks are present below all buildings designed on the principle of maintaining the supporting soil in its frozen state. The highest temperature (up to 12°C) and thickness (up to 23 m) was observed in a talik near the circular pump station sunken to the depth of more than 10 m. This talik extends around the pump station for 25-30 m and into the southern corner of the main building. A talik beneath the hot-water boilers building is 17 to 20 m thick with mean annual ground temperatures of less than 2.5°C. This talik is the largest in horizontal extent and underlies about half of the building. This talik extends in a narrow strip to the carbon dioxide department and underlies its southern part. Permafrost around this part of the building has thawed down to 12.0 to 19.5 m and the mean annual temperature of the thawed layer is 1.7 to 1.8°C. Around and beneath the eastern part of the chemical water purification unit, the thawed ground has refrozen from top to 7.0-8.2 m by 2009. A thaw layer has preserved below with a temperature of 1.0-1.5°C at 10-11 m depth. In spite of the large number of taliks, the soils are in a perennially frozen state over much of the Yakutsk CHP site. Beneath the main building, annual ground temperatures in the depth interval 4–10 m varied from near 0°C to – 3.5°C in 2008 and lowered to –3.9°C in 2009. As a result, the taliks have slightly decreased in extent, indicating that the foundation soils are gradually restoring their thermal regime.

**Keywords:** mean annual ground temperatures; taliks; permafrost.

## Температура грунтов вокруг и под зданиями Якутской ТЭЦ

С. И. Заболотник, П. С. Заболотник

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН

Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: zabolotnik@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Проведён двухгодичный (2008 и 2009 гг.) цикл ежемесячных измерений температуры грунтов в 38 скважинах глубиной до 16 м. Измерения проводились под зданиями (16 скважин) и вдоль стен на прилегающих к ним участках (21 скважина). В настоящее время под всеми зданиями, построенными по принципу сохранения многолетнемёрзлых грунтов в их основании, имеются таликовые зоны. Наиболее высокая температура (до 12° С) и мощность (до 23 м) талика установлена вокруг заглубленной более чем на 10 м циркуляционной насосной станции. Талик распространяется вокруг неё на 25-30 м и захватывает южный угол главного корпуса. Под зданием водогрейных котлов мощность талика не превышает 17-20 м, а средние годовые температуры были не выше 2,5°С. В то же самое время площадь этого талика наибольшая, и он занимает почти половину площади под зданием. Этот же талик узкой полосой простирается до углекислотного цеха, распространяясь под его южную половину. Вокруг этой части здания многолетнемёрзлые грунты оттаяли до 12,0-19,5 м, а средняя годовая температура в оттаявшем слое достигала 1,7-1,8° С. Около восточной части здания химводоочистки и под ней оттаявшие ранее грунты к 2009 году промёрзли сверху до 7,0-8,2 м. Ниже сохранился талый горизонт, средняя годовая температура которого на глубине 10-11 м достигала 1,0-1,5° С. Несмотря на большое количество таликов, на большей части ЯТЭЦ грунты находятся в многолетнемёрзлом состоянии. Средняя годовая температура их в интервале 4-10 м под главным корпусом изменялась в 2008 году от близких к нулю значений до -3,5°С, а в 2009 году она понизилась до -3,9° С. В связи с этим площади таликовых зон немного сократились, что свидетельствует о постепенном восстановлении температурного режима грунтов в основании сооружений.

**Ключевые слова:** среднегодовые температуры грунтов; талики; многолетнемёрзлые породы.

# Температура грунтов вокруг и под зданиями Якутской ТЭЦ

С. И. Заболотник, П. С. Заболотник

## Введение

Якутская тепловая электроцентраль (ЯТЭЦ) является первым промышленным объектом СССР, построенным в 1937 году по принципу использования вечномёрзлых грунтов в качестве его основания. Непосредственно на площади застройки до возведения сооружений мощность вечномёрзлой толщи достигала 180-200 м, а средние годовые температуры на глубине 15 м изменялись от  $-3$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Через десять лет после ввода ЯТЭЦ в эксплуатацию температура грунтов в основании фундаментов главного корпуса на глубине 5 м изменялась от  $-3,2$  до  $-3,6^{\circ}\text{C}$ , а мощность сезоннопротаивающего слоя не превышала 1 м [1].

В процессе длительной эксплуатации целого комплекса сооружений со значительными тепловыделениями, на территории ЯТЭЦ произошло частичное растепление многолетнемёрзлых грунтов, а в ряде мест сформировалась локальные таликовые зоны, в том числе и непосредственно под зданиями. Для выявления особенностей создавшейся геокриологической обстановки, выяснения причин и степени растепления грунтов, определения глубины и площади распространения таликов Институт мерзлотоведения и ранее проводил там исследования. В частности, с 1985 по 2005 гг. силами института было пробурено около 50 скважин вокруг основных сооружений и под ними. В них сначала проводились эпизодические, а с 2008 года начаты круглогодичные систематические измерения температуры грунтов как непосредственно под зданиями, так и вдоль стен на прилегающих к ним участках (рис. 1).

Измерения температуры проводились ежемесячно в 38 скважинах глубиной от 4,0 до 15,5 м, в том числе в 16-и – непосредственно под зданиями, с помощью полупроводниковых сопротивлений (терморезисторов), смонтированных в специальные термоустановки в соответствии с Руководством, разработанным в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН [2].

Все скважины были подготовлены для долговременных геотермических измерений, для чего они были обсажены на полную глубину герметично заваренными (снизу и на стыках) металлическими трубами диаметром 40-50 мм. Затрубное пространство вокруг



Рис. 1. Схема расположения скважин, в которых проводились измерения температуры в 2008-2009 гг.

скважин было засыпано сухим песком. Для предотвращения попадания в скважины осадков и наружного воздуха, особенно в зимнее время, обсадные трубы сверху были закрыты металлическими нарезными крышками.

Территория ЯТЭЦ вокруг главного корпуса и ряда других служебных помещений частично асфальтирована и до глубины 1-4 м сложена насыпным грунтом из разнозернистых песков, реже суглинков с примесью щебня, гальки и шлака. Ниже повсеместно залегают аллювиальные отложения, представленные мелкозернистыми песками, часто переслаивающимися со среднезернистыми и крупнозернистыми. Влажность грунтов изменяется от 20 до 70%, а плотность – от 1700 до 2690  $\text{кг}/\text{м}^3$  [3].

В настоящей работе предлагаются результаты измерений температуры грунтов за два года: 2008 и 2009.

## Результаты и обсуждение

Двухгодичный цикл ежемесячных измерений температуры грунтов в скважинах позволил не только установить состояние криолитозоны на территории ЯТЭЦ, но и определить динамику развития мерзлотных процессов. К концу периода измерений на большей части её сохранилось или было восстановлено мёрзлое состояние грунтов.



Наиболее низкие средние годовые температуры грунтов были установлены вокруг западного угла главного корпуса. В интервале глубин 4-10,5 м в 2008 году они изменялись от -3,5 до -2,4°С, а в 2009 году – понизились на 0,9-0,2°С и варьировали от -3,9 до -2,8°С (рис. 2). Это свидетельствует о том, что под этой частью здания и вокруг неё почти восстановилось предпостроечное состояние многолетнемёрзлых пород (ММП).

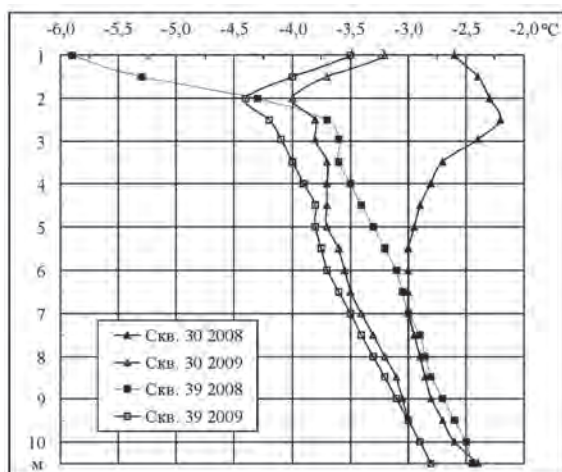


Рис. 2. Средние годовые температуры грунтов около западного угла главного корпуса.

Такие низкие температуры обусловлены тем, что в этой части главного корпуса располагаются только административные службы, и здесь нет агрегатов с большим тепловыделением. Естественно, что в этом месте влияние здания на подстилающие грунты минимально. Понижение температуры в течение второго года в основном обусловлено тем, что средняя годовая температура воздуха в 2009 году стала на 0,7°С ниже, чем в 2008.

Вокруг большей части главного корпуса, где расположено основное технологическое оборудование, средние годовые температуры стали существенно выше. Глубже 4 м они изменялись от -2,9 до 0°С в 2008 г., а в 2009 г. минимальные температуры понизились до -3,2°С (рис. 3).

В мёрзлых грунтах под главным корпусом сохранились только 2 скважины глубиной 4-6 м (см рис. 1), расположенные вблизи границы с таликовой зоной, которая образовалась под южным углом здания. Естественно, что средние годовые температуры грунтов здесь более высокие. Ниже уровня расположения основания фундаментных опор (4-6 м) температура ММП в 2008 году изменялась от -1,2 до -0,4°С (рис. 4, скв. 14). К сожалению, вмороженные в этой скважине в грунт терморезисторы, в 2009 году вышли из строя.

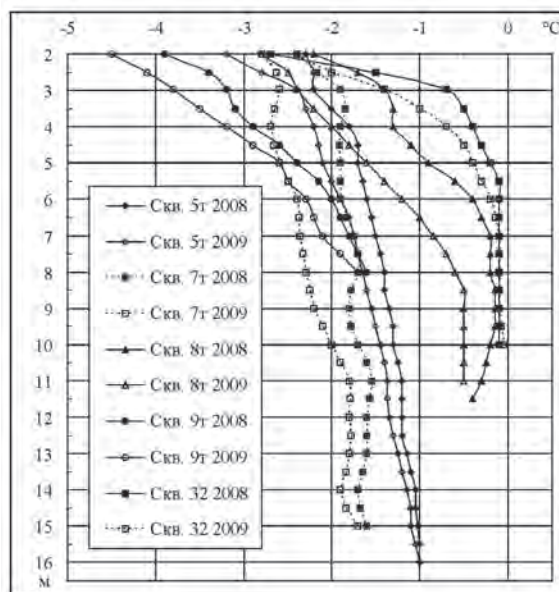


Рис. 3. Средние годовые температуры грунтов вокруг основной части главного корпуса.

Другая скважина вскрыла талик на глубине 3 м, средняя годовая температура которого в 2008 году на глубине 4 м достигала 1,2°С. В 2009 году площадь этого талика сократилась и средняя годовая температура на подошве слоя сезонного протаивания в скв. 27 понизилась до -0,7°С (см. рис. 4).

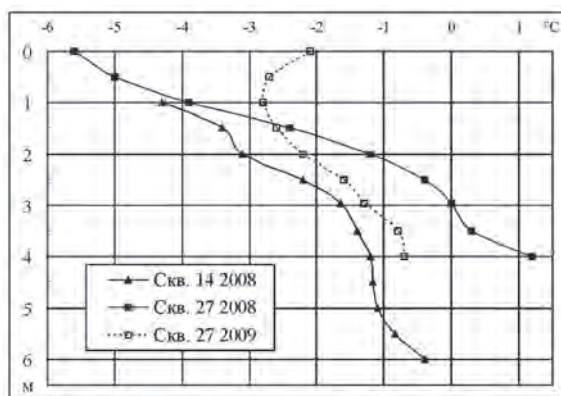


Рис. 4. Средние годовые температуры грунтов под главным корпусом вблизи таликовой зоны.

К южному углу главного корпуса при-мыкает здание циркуляционной насосной станции, подземная часть которой заглублена более чем на 10 м. Её отапливаемое заглубленное помещение является постоянным источником тепла большой мощности. В результате этого, грунты вокруг станции оттаяли на значительную глубину. В июле 2005 г. при бурении скважины 31, расположенной в непосредственной близости от неё было установлено, что грунты оттаяли здесь до

глубины 23 м, а таликовая зона вокруг циркуляционной насосной распространилась не менее чем на 25 м и захватила южный угол главного корпуса.

В 2008 и 2009 гг. средняя годовая температура грунтов в 1,5 м от насосной станции была положительной во всём диапазоне измерений. В интервале 4-10,5 м она была постоянно выше  $+8^{\circ}\text{C}$  и достигала почти  $+12^{\circ}\text{C}$  (рис. 5, скв. 31).

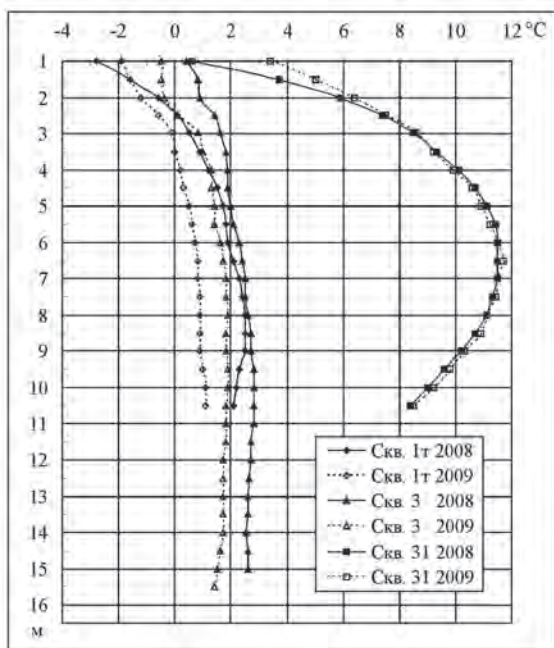


Рис. 5. Средние годовые температуры грунтов в таликовой зоне вокруг циркуляционной насосной.

Под южным углом главного корпуса и снаружи около стены, скважины расположены в 10-20 м от циркуляционной насосной станции. Естественно, что там средние годовые температуры грунтов уже не столь высокие. В 2008 году они не превышали  $2,8^{\circ}\text{C}$ , а в 2009 г. были ниже  $2,0^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 5, скв. 1т и 3).

Пристроенное к юго-восточной стене главного корпуса здание водогрейных котлов также расположено на мёрзлых и талых грунтах. Многолетнемёрзлые породы сохранились только под примыкающей к главному корпусу частью здания. К сожалению, в скважинах 7 и 10т, расположенных снаружи около стен здания, с глубины 3-4 м образовались пробки, что не позволило определять температуру ниже их. Тем не менее двухгодичный цикл наблюдений позволяет оценить мерзлотную обстановку и в местах их расположения.

Как и следовало ожидать, наиболее низкие средние годовые температуры грунтов были установлены около затенённой с запада, юга и востока стены котельной. Ниже

слоя сезонного протаивания, максимальная мощность которого не превышала 3 м [3], в 2008-2009 гг. они изменялись от  $-3,4$  до  $-5,2^{\circ}\text{C}$  (рис. 6, скв. 10т).

Около юго-восточной стены здания средние годовые температуры грунтов в скважине 7, расположенной вблизи главного корпуса, были на  $2,7-2,9^{\circ}\text{C}$  выше. По мере приближения к пристроенной в конце восьмидесятых годов части здания водогрейных котлов, под которой расположены скважины 12т – 23т (см. рис. 1) температуры грунтов в 2008 году оставались в отрицательном диапазоне только до глубины 5,5 м. В интервале от 5,5 до 15 м грунты были талыми, однако средняя годовая температура их была не выше  $+0,1^{\circ}\text{C}$ . В 2009 году в верхнем пятиметровом слое произошло понижение температуры на  $0,5-0,7^{\circ}\text{C}$ , нижняя граница мерзлоты опустилась до 6,5 м, а глубже образовалась нулевая зона (рис. 6, скв. 8).

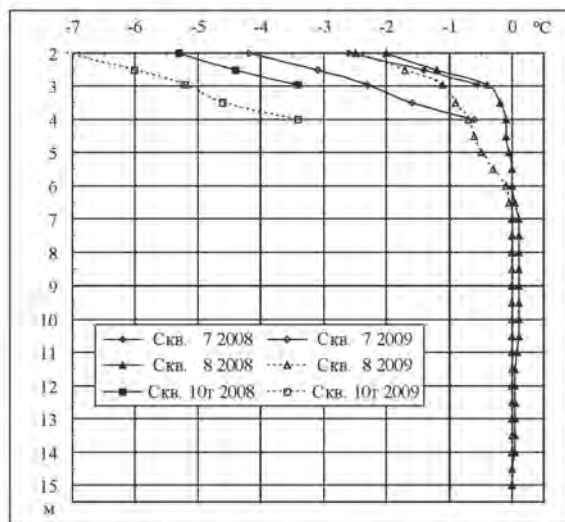


Рис. 6. Средние годовые температуры мёрзлых грунтов под зданием водогрейных котлов и около его стен.

Под упомянутым выше пристроен к зданию водогрейных котлов талик сформировался ещё до начала его строительства из-за утечек горячих производственных вод непосредственно в грунты основания из ранее введенной в строй его части. Такие утечки наблюдались нами во время исследований на территории ЯТЭЦ с 1982 по 1985 годы, а их воздействие на температурный режим грунтов было определено при непосредственных измерениях в специально пробуренной 25-метровой скважине, при проходке которой мощность талого грунта составляла 24,5 м. Наиболее сильно грунты в этом месте были прогреты в 1982-1983 гг., когда средняя годо-



вая температура их на глубине 6-7 м достигала +17°C. К 2005 году температура грунтов понизилась до 6,5° С. Хотя перед возведением здания котлован промораживался в зимнее время, талик сохранился здесь и до настоящего времени.

При возведении последней очереди здания водогрейных котлов 25-метровая скважина была уничтожена, правда под ней были пробурены 16 скважин 4-метровой глубины (см. рис. 1).

Вокруг таликовой зоны под зданием средняя годовая температура грунтов была достаточно высокая. На глубине 4 м в 2008 г. она изменялась от -0,2 до -0,5°C, а в 2009 г. понизилась до -(0,4-0,7)°С. Это свидетельствует о постепенном, медленном промерзании талика со стороны многолетнемерзлых пород (рис. 7).

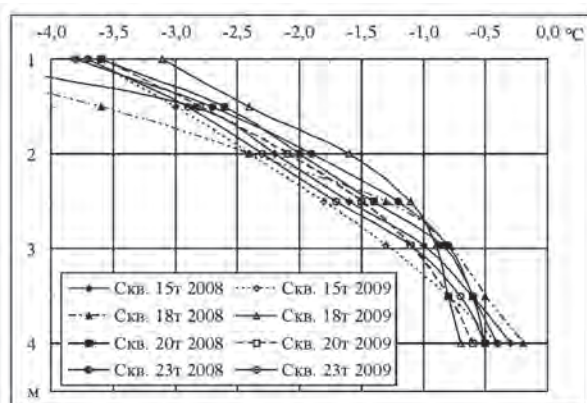


Рис. 7. Средние годовые температуры мерзлых грунтов по краям талика под пристроем к зданию водогрейных котлов.

Непосредственно в талике средние годовые температуры грунтов в 2008 году на глубине 4 м изменялись от 0 до 2,9° С. В 2009 году они уже не превышали 2,3° С, а под северным углом здания в скважинах 17г, 12г и 19г (см. рис. 1) понизились до -0,1° С (рис. 8). На основании этого можно утверждать, что в этом месте началось промерзание талой толщи сверху.

Мощность талика по таким мелким скважинам определить невозможно. Однако мы можем оценить её по 10-16-метровым скважинам, пробуренным нами в 2005 году вокруг этой части здания (см. рис. 1). Установлено, что здесь максимальные значения средних годовых температур были в интервале 6,5-8,0 м и не превышали в 2008 г. +2,5° С, а в 2009 г. +1,9° С (рис. 9). Что касается мощности талика, то можно с большой долей вероятности утверждать, что она составляет 17-20 м.

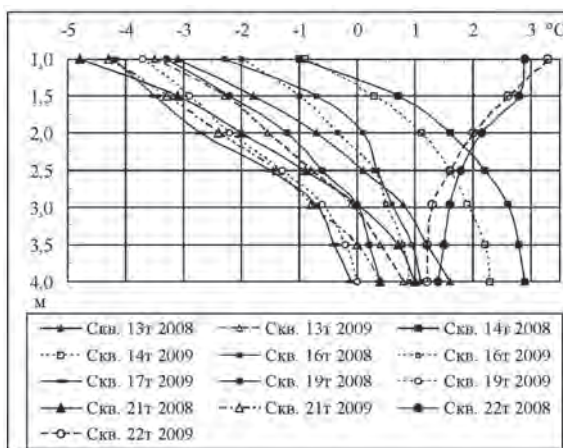


Рис. 8. Средние годовые температуры талых грунтов под пристроем к зданию водогрейных котлов.

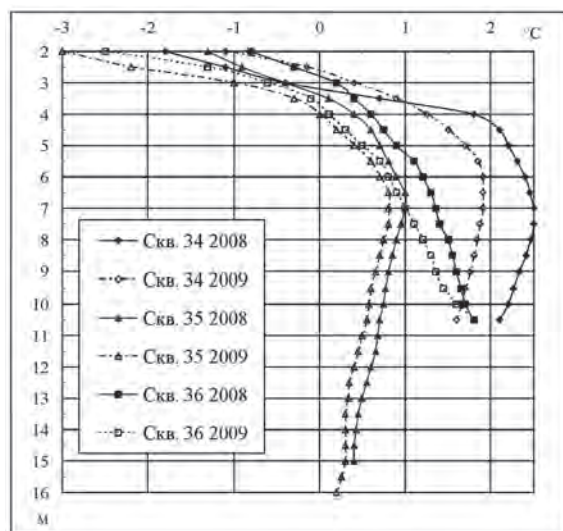


Рис. 9. Средние годовые температуры талых грунтов вокруг пристроя к зданию водогрейных котлов.

Таликовая зона от здания водогрейных котлов узкой полосой протягивается до углекислотного цеха и захватывает его южную часть.

Под углекислотным цехом (УКЦ) скважин нет, однако две (сква. 37 и сква. 11г), расположенные с двух его сторон в непосредственной близости от стен (см. рис. 1), были пройдены в талых грунтах.

При бурении скважины 37 в августе 2005 г. до глубины 19,5 м был вскрыт талик, температура которого на глубине 8-10 м в 2005-2006 гг. изменялась от +1,0 до +2,0°С. К сожалению, в июне 2006 г. эта скважина была уничтожена. В месте примыкания УКЦ к главному корпусу средняя годовая температура грунтов в 2008 г. в интервале 2-11 м изменялась от +1,8 до +0,1°С, а верхняя граница многолетнемерз-

лых пород предположительно находилась на глубине 12 м. Однако в 2009 году произошло очередное растепление грунтов. На глубинах 11-11,5 м температура грунтов повысилась до  $0,5^{\circ}\text{C}$  и, следовательно мощность талика увеличилась (рис. 10, скв. 11г).

Здание химводоочистки (ХВО) находится на удалении от основных производственных корпусов. Измерения температуры в скважинах, расположенных вокруг здания (см. рис. 1), показали, что под слоем сезонного протаивания на всю глубину мёрзлые грунты находятся только под западной частью здания. Однако средняя годовая температура их достаточно высокая. Кроме того она повышается с глубиной, достигая  $-0,5^{\circ}\text{C}$  на глубине 9,5 м (рис. 10, скв. 44).

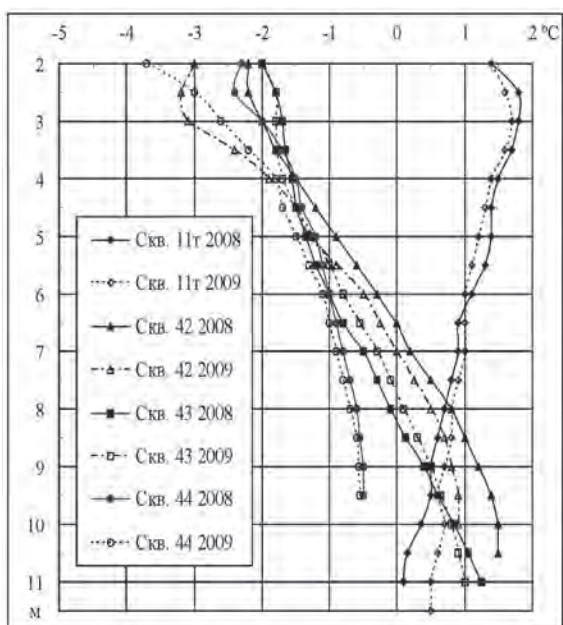


Рис. 10. Средние годовые температуры грунтов около УКЦ и вокруг здания химводоочистки.

Под восточной частью здания мёрзлые породы в 2008 году залежали только под слоем сезонного протаивания, составляющего 2,9 м [4], до 6,5-7,0 м. В 2009 году температуры грунтов немного понизились и нижняя граница ММП опустилась до 7,8-8,2 м. Под мёрзлым слоем повсеместно были талые грунты, средняя годовая температура которых на глубине 10-11 м достигала  $1,0-1,5^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 10, скв. 42-43).

### Заключение

Таким образом, к настоящему времени на территории Якутской ТЭЦ произошли довольно сильные изменения геокриологической обстановки. Несмотря на это она остаётся

достаточно стабильной. В последние годы благодаря ряду превентивных мероприятий наблюдается постепенное восстановление температурного режима грунтов в основании зданий и на примыкающим к ним участках. Однако происходит оно очень медленно и на полное восстановление мёрзлого состояния грунтов понадобятся многие годы. Поэтому необходим постоянный контроль температур грунтов, позволяющий на его основе своевременно проводить инженерные мероприятия для сохранения устойчивости всех сооружений.

### Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность инженеру-исследователю В.Н. Панину и ведущему инженеру А.М. Литовко, принимавшим непосредственное участие в круглогодичных измерениях температуры грунтов, в том числе и зимнее время, в суровые 40-градусные морозы.

### Список литературы

1. Цытович, Н. А. Фундаменты электростанции на вечной мерзлоте (опыт проектирования, возведения и эксплуатации Якутской центральной электростанции по принципу сохранения вечной мерзлоты) / Н. А. Цытович, Н. И. Салтыков, В. Ф. Жуков и П. И. Мельников. – М. ; Л. : Изд-во Академии наук СССР, 1947. – 104 с.
2. Балобаев, В. Т. Руководство по градуировке терморезисторов и использованию их при геотермических измерениях / В. Т. Балобаев, Б. В. Володько, В. Н. Девяткин, А. И. Левченко. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1977. – 39 с.
3. Zabolotnik, S. I. Ground Temperatures beneath the Buildings of the Yakutsk CHP Plant / S. I. Zabolotnik, P. S. Zabolotnik // EISOPE 2009 : Proceedings of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xi'an, China. Recent Development of Research on Permafrost Engineering and Cold Region Environment. Ming Huo, Wei Ma & Fujun Niu (eds.). Lanzhou University Press, 2009. – P. 318–323.
4. Заболотник, С. И. Температура, сезонное протаивание и промерзание грунтов под зданиями Якутской ТЭЦ и на прилегающей к ним территории / С. И. Заболотник, П. С. Заболотник // Наука и образование. – 2009. – № 4 (56). – С. 70–75.

### References

1. Tsytoovich, N.A., Saltykov, N.I., Zhukov, V.F. and Melnikov, P.I. 1947. *Foundations for Electric Power Stations on Permafrost (Experience with Design, Construction, Operation and Maintenance*



of the Yakutsk Central Electric Station Using the Principle of Permafrost Preservation). Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences Press, 104 pp. (in Russian).

2. Balobaev, V.T., Volodko, B.V., Devyatkin, V.N. and Levchenko, A.I. 1977. *Manual on Calibration and Use of Thermistors in Geothermal Measurements*. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 39 pp. (in Russian).

3. Zabolotnik, S.I. and Zabolotnik, P.S. 2009. Ground temperatures beneath the buildings of the Yakutsk CHP Plant. *EISOPE 2009. Proceedings of*

*the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering. 15-17 October, 2009, Xi'an, China. Recent Development of Research on Permafrost Engineering and Cold Region Environment*. Ming Huo, Wei Ma & Fujun Niu (eds.). Lanzhou University Press: 318-323.

4. Zabolotnik, S.I. and Zabolotnik, P.S. 2009. Ground temperature, seasonal thawing and freezing beneath Yakutsk Combined Heat and Power Plant buildings and adjacent sites. *J. Nauka i Obrazovanie* 4(56): 70-75. (in Russian).

## Predictive calculations for the frost grout curtain at the Vilyuiskaya HPP-3 with application of collector seasonally operating cooling devices

G.M. Dolgikh<sup>1</sup>, S.N. Okunev<sup>1</sup>, V.N. Zakharova<sup>1</sup>, M.S. Maramygina<sup>1</sup>, S.N. Dolgikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundamentstroyarkos Research & Production Association

Ul. Novatorov, 12, Tyumen, Russia 625000, E-mail: fsa@npo-fsa.ru

<sup>2</sup> Yakutniproalmaz Institute, Mirny, E-mail: sdolgh@yna.alrosa-mir.ru

**Abstract.** The article addresses the possibility of frost curtain grouting to prevent seepage flow at the base of the near-entrance dam section at the Vilyuiskaya HPP-3. The referenced comparable facility is the existing frost curtain at the dam on the Liendokit Creek, which was built by using collector seasonally operating cooling devices with the air-cooler unit.

**Keywords:** dam; filtration; seasonally operating cooling devices (SOCD); frost curtain; soil freezing; air-cooler units (ACU).

## Прогнозные расчеты мерзлотной противофильтрационной завесы плотины Вилюйской ГЭС-3 с использованием коллекторных СОУ

Г. М. Долгих<sup>1</sup>, С. Н. Окунев<sup>1</sup>, В. Н. Захарова<sup>1</sup>, М. С. Марамыгина<sup>1</sup>, С. Н. Долгих<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НПО Фундаментстройаркос

Россия 62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12, e-mail: fsa@npo-fsa.ru

<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз», Мирный, e-mail: sdolgh@yna.alrosa-mir.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность устройства мерзлотной завесы для предотвращения образования фильтрационного потока в основании припортового участка плотины на Вилюйской ГЭС-3. В качестве аналога приводится существующая мерзлотная завеса на плотине ручья Лиендокит, созданная при помощи коллекторных СОУ с аппаратом воздушного охлаждения (АВО).

**Ключевые слова:** плотина; фильтрация; сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ); мерзлотная завеса; замораживание грунтов; аппараты воздушного охлаждения (АВО).

## Прогнозные расчеты мерзлотной противofiltrационной завесы плотины Вилюйской ГЭС-3 с использованием коллекторных СОУ

Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, В. Н. Захарова, М. С. Марамыгина, С. Н. Долгих

В условиях криолитозоны построено много плотин и до настоящего времени существует множество проблем, с которыми сталкиваются проектировщики. Одна из них – фильтрация в грунтовом основании плотины. Существующие фильтрационные потоки усиливаются после заполнения водохранилища (с увеличением напора). Для предотвращения развития фильтрации в основании припортового участка Вилюйской ГЭС-3 необходимо создать мерзлотную завесу.

Мерзлотные и фильтрационные условия на Вилюйской ГЭС-3 очень сложные. В основании плотины в районе припортового участка залегают пестроцветные породы илгинской свиты – алевролиты и мергели с прослоями доломитов, известняков, песчаников и аргиллитов. Породы в оползневом залегании, расчленены на отдельные блоки трещинами отрыва, зонами скольжения и дробления, заполненными щебенисто-дресвяным материалом и льдом. Породы мерзлые, криогенная текстура – трещинно-пластовая, трещинно-жильная, корковая, массивная. Местами базальная. Визуальная льдистость в массиве – 5%, в зоне уплотнения – 10%, по трещинам и зонам скольжения – от 15-30% до 50%. Ниже залегают породы верхоленской свиты – аргиллиты, мергели с прослоями алевролитов, известняков и доломитов, слоистые, сильнотрещиноватые, перемяты и раздавлены до щебня и суглинка с отдельными блоками сохранных пород. Породы засолены (0,5-7,0%), загипсованы (1-2%), мерзлые и талые с криопэгмами. Криогенная текстура трещинно-пластовая и массивная. Визуальная льдистость – 5%. Температура начала замерзания пород понижается до значений минус 3,2 °С.

На абсолютной отметке 115 м – верхоленская свита представлена алевролитом глинистым, карбонатным с прослоями мергеля, известняка, доломита, реже аргиллита. Породы слоистые, с горизонтальным залеганием, сильнотрещиноватые, средней прочности и малопрочные, характерна плитчатая отдельность. Под влиянием оползневых деформаций породы смяты в полого-наклонные, реже крутые микроскладки, в замках которых породы разрушены до щебенисто-дресвяного грунта с суглинистым заполнителем (10-30%). Зона разуплотнения пород выделена на глубину до абсолютных отметок 105-107 м, где на отдель-

ных участках сохранилось первоначальное залегание пород. По плоскостям напластования и трещинам отдельности отмечаются гнеда и трещины гипса мощностью 0,3-2,0 см, загипсованность пород до 10%. По содержанию воднорастворимых солей – 0,4-2,8% от массы сухого грунта (породы относятся к незасоленным, переходящим в засоленные). Породы в бортах долины талые с криопэгмами, с отрицательной температурой пород. В левом борту криопэги имеют температуру минус 2,5 градуса С, а в основании правой плотины – до минус 4 градуса С. Поэтому фильтрация в основании может развиваться и в области отрицательных температур.

В слабых породах усиление фильтрации угрожает развитием суффозии, что может привести к образованию каналов сосредоточенной фильтрации и размыву грунтового основания.

Для предотвращения развития фильтрации ООО НПО «Фундаментстройаркос» предложено замораживание грунтов в основании припортового участка Вилюйской ГЭС-3 коллекторной системой с аппаратом воздушного охлаждения (АВО). Коллекторные СОУ предназначены для интенсификации замораживания грунтов за счет применения аппарата воздушного охлаждения (АВО), а также для применения централизованной холодильной машины для замораживания грунтов в летнее время. Применение АВО с принудительной циркуляцией воздуха позволяет получить температуру на трубе охлаждающей вертикальной (ТОВ) практически равной температуре наружного воздуха (до 95%). В состав коллекторной системы входят: аппарат воздушного охлаждения, трубы охлаждающие вертикальные (ТОВ), жидкостной и паровой коллекторы.

Для определения оптимальной установки труб охлаждающих вертикальных (ТОВ) коллекторных систем были выполнены расчеты в программе «PLOTINA» (сертификат соответствия № 06.0001.0315, выдан автономной некоммерческой организацией «Межрегиональный испытательный центр», 22 февраля 2010 г.).

В программе рассматривается двухмерная (профильная) напорная фильтрация подземных вод под телом плотины. В верхнем бьефе задается постоянный уровень воды в

водохранилище, в нижнем бьефе толщина слоя воды пренебрежимо мала. Сложение грунтов под основанием плотины горизонтально слоистое. В средней части тела плотины находится водонепроницаемое ядро, в ее основании - слабопроницаемые прослойки суглинка, остальная часть плотины сложена хорошо проницаемыми грунтами. Нижнее основание соответствует подошве слою водоупорных пород. Линии течения подземных вод проходят по зоне протаивания основания плотины, вода из верхнего бьефа фильтруется и высачивается в нижнем бьефе. Тепловой режим грунтов определяется переменной температурой воздуха и воды в водохранилище, наличием снежного покрова на теле плотины и промораживающим воздействием нескольких рядов труб охлаждающих вертикальных (ТОВ). На нижней границе соответствующей подошве водоупора задается постоянная температура. При замораживании грунтов будет учитываться уменьшение их коэффициента фильтрации в соответствии с уменьшением открытого порового пространства. При увеличении льдистости  $w$  коэффициент фильтрации уменьшается по степенному закону  $k_f = k_0 (1-w)^n$ ,  $n=1-3$ , данная зависимость соответствует формуле Козени.

Температура грунта на припортом участке по результатам замеров в декабре 2009 г. показана на рисунке 1. На рисунке 2 приведен график температуры грунта на начало расчета, на рисунке 3 - на конец первого летнего периода (после одного зимнего периода работы охлаждающих систем).

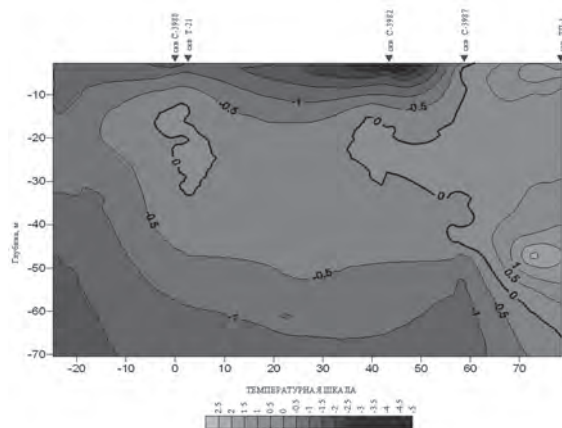


Рис. 1. Температурное поле в основании припортом участка плотины Вилюйской ГЭС-3 на декабрь 2009 г.

В результате выполненных расчетов определена оптимальная расстановка ТОВ: два ряда с шагом 1,5 и глубиной 60 м. Такая расстановка позволяет предупредить от-

таивание грунтов и развитие фильтрации в грунтовом основании припортом участка плотины. Выполненные расчеты показали необходимость заглубления охлаждающих установок в мерзлый грунт на глубину не менее 5 м – это позволяет предупредить развитие фильтрации вглубь основания из-за увеличения напора при промораживании.



Рис. 2. Температура и кодировка грунта на начало расчета.

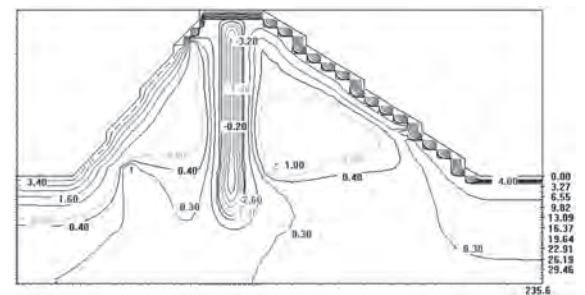


Рис. 3. Температура грунта на конец первого летнего периода.

Подобная мерзлотная завеса создана на плотине ручья Лиендокит. Коллекторные СОУ с АВО установлены на плотине р. Лиендокит и включены в работу в конце зимнего периода 2007 года. Конструкция единичной коллекторной системы показана на рисунке 4.

Всего на плотине установлено 5 единичных систем. ТОВ глубиной 20 м установлено 52 шт. и ТОВ глубиной 30 м - 158 шт. Работа коллекторной СОУ по скважине 6 за 2007-2010 годы показана на рисунке 5.

Из графика видно, что в зоне действия ТОВ (30 м) производится эффективное замораживание грунтов. В области мерзлых грунтов на глубине 20-30 м температура грунтов понизилась с минус 3,4° С до минус 7,7° С, в зоне талых грунтов – с +2,8° С до минус 3,1° С. Работа системы осуществлялась с 2 (из 3) включенными вентиляторами.



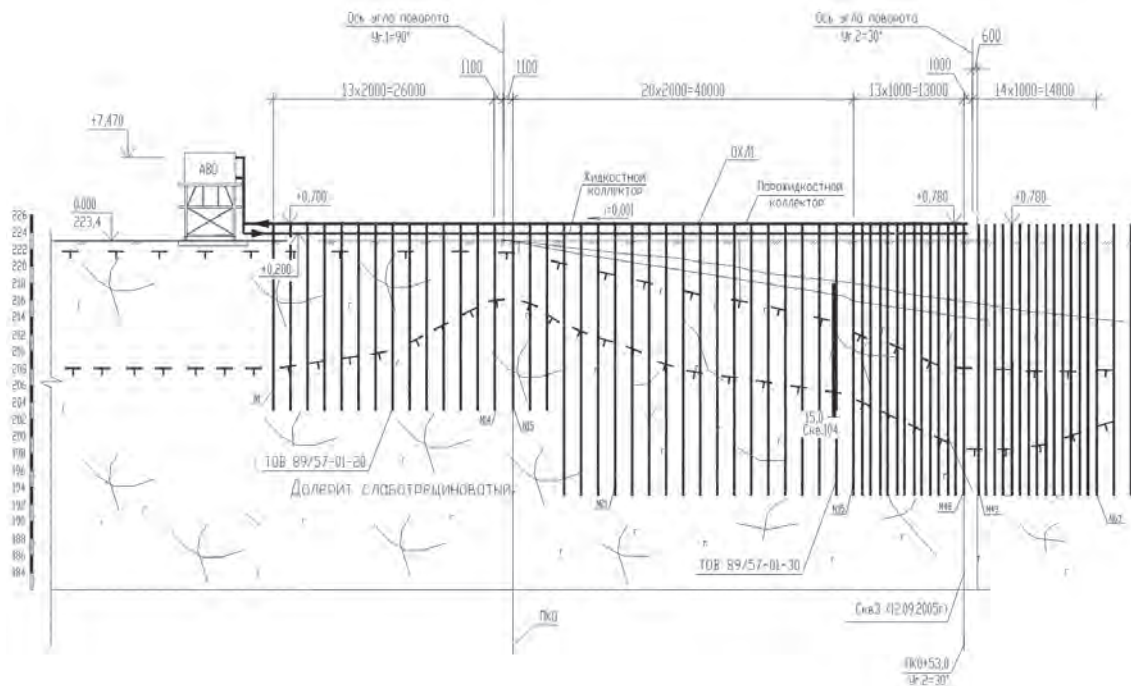


Рис. 4. Конструкция коллекторной СОУ с аппаратом воздушного охлаждения (АВО).

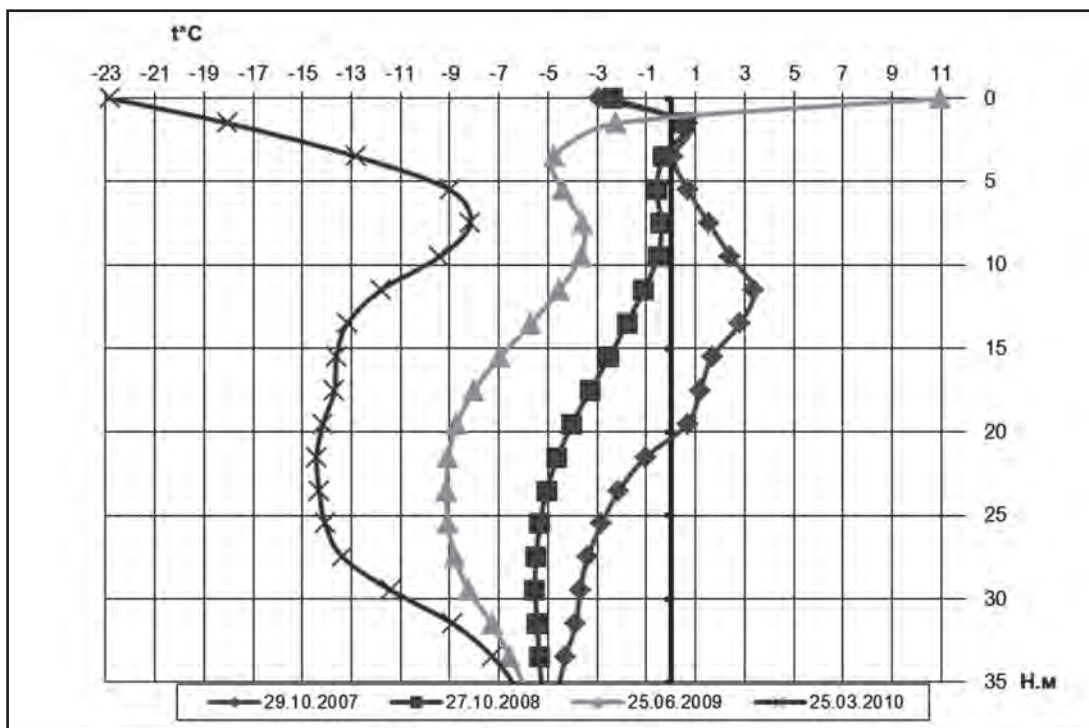


Рис. 5. Изменение температуры грунтов за 2007-2010гг. работы коллекторной СОУ (участок установки ТОВ длиной 30 м) на плотине р. Лиендокит.

Замеры температуры на стенке ТОВ подтвердили работоспособность системы и показали увеличение эффективности работы коллекторной СОУ в два раза при включенных вентиляторах.

Таким образом, разработанные ООО НПО «Фундаментстройаркос» конструкции

коллекторных СОУ являются эффективными замораживающими установками и могут применяться для создания мерзлотной завесы с основания припортового участка Вилюйской ГЭС-3 с целью предотвращения фильтрационных потоков.

## Heat and mass transfer in vertical cooling pipes of VET systems with application of ammonia

G.M. Dolgikh, S.N. Okunev, G.V. Anikin, S.N. Strizhkov, V.F. Vlasov

Fundamentstroyarkos Research & Production Association  
Ul. Novatorov, 12, Tyumen, Russia 625000, E-mail: fsa@npo-fsa.ru

**Abstract.** Methods and calculations have been developed and made for ammonia temperature distribution in vertical cooling pipes at the depth equal up to 30 meters. The obtained data show efficiency of application of VET systems with using ammonia at the depth of 30 meters.

**Keywords:** soil freezing; vertical naturally operating pipe (VET) systems; vertical cooling pipes (VCP); coolant; temperature profiles; thermal stabilization.

## Тепломассоперенос в вертикальных охлаждающих трубах систем ВЕТ при работе на аммиаке

Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, Г. В. Аникин, С. Н. Стрижков, В. Ф. Власов

НПО Фундаментстройаркос  
Россия 62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12, НПО Фундаментстройаркос  
e-mail: fsa@npo-fsa.ru

**Аннотация.** Разработана методика и проведены расчеты распределения температуры аммиака в ТОВ при глубине до 30 метров. Полученные данные показывают эффективность применения систем ВЕТ при работе на аммиаке до глубины 30 метров.

**Ключевые слова:** замораживание грунтов; вертикальные естественнодействующие трубчатые (ВЕТ) системы; трубы охлаждающие вертикальные (ТОВ); хладагент; температуры грунта по глубине; термостабилизация.

## Тепломассоперенос в вертикальных охлаждающих трубах систем ВЕТ при работе на аммиаке

Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, Г. В. Аникин, С. Н. Стрижков, В. Ф. Власов

В настоящее время для замораживания талых грунтов на объектах с заглубленной кровлей многолетнемерзлых грунтов применяется система ВЕТ. Экспериментальные данные показывают высокую эффективность систем при работе на аммиаке с трубами охлаждающими вертикальными (ТОВ) до глубины 14 метров. При глубине более 14 метров в системах ВЕТ требуется применение в качестве хладагента углекислоты. Однако при работе на углекислоте рабочее давление составляет до 40 атм., что приводит к увеличению толщины стенок ТОВ, соединительных труб и применению конденсаторного блока с рабочим давлением до 100 атм. Кроме того усложняется доставка и заправка систем углекислотой. Все перечисленное приводит к значительному удорожанию конструкции системы ВЕТ и строительно-монтажных работ. В связи с появлением потребности в массовом применении замораживания грунтов до глубины 30 метров, необходимо рассмотреть возможность применения систем ВЕТ при работе на аммиаке с глубиной ТОВ до 30 метров.

Целью данной работы является расчет распределения температур по глубине ТОВ при работе на аммиаке до глубины 30 метров

Система "ВЕТ" (вертикальная, естественнодействующая, трубчатая), состоит из вертикальных охлаждающих труб (ТОВ), соединительных труб, конденсаторного блока, ускорителя циркуляции и гидрозатвора.

Расчетная схема трубы охлаждающей вертикальной (ТОВ) представлена на рис. 1. ТОВ является составной частью более сложных систем охлаждения, таких например как вертикальные естественно-трубчатые системы (ВЕТ), которые подробно описаны в работе [1]. ТОВ в верхней своей части соединен с горизонтальной трубой по которой образовавшийся в ТОВ пар перемещается в конденсатор охлаждающего устройства. По внутренней трубе хладагент опускается сверху вниз, а по кольцевому каналу, между внешней и внутренней трубой, поднимается вверх. Во внутренней трубе и нижней части кольцевого канала хладагент находится в жидком состоянии, а в верхней части кольцевого канала он представляет собой смесь пара и жидкости. Поскольку плотность смеси меньше чем плот-

ность жидкого хладагента, давление столба жидкости во внутреннем канале перевешивает давление столба смеси в кольцевом канале и, следовательно, вызывает циркуляцию хладагента. В системе координат, изображенной на рисунке №1, уравнения движения хладагента в круглой трубе и нижней части кольцевого канала записываются следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dz} &= \frac{\lambda_1 W^2}{2D_{r1} \rho_1 S_1^2} - \rho_1 g \\ -\frac{dP}{dz} &= \frac{\lambda_2 W^2}{2D_{r2} \rho_2 S_2^2} + \rho_2 g \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P$ - давление в заданной точке,  $z$ - продольная координата,  $W$ - суммарный массовый поток хладагента,  $g$ -ускорение свободного падения,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотности жидкого хладагента в круглом и кольцевом каналах соответственно,  $D_{r1}$ ,  $D_{r2}$  - гидродинамические радиусы в круглом и кольцевом каналах,  $S_1$ ,  $S_2$ - площади сечений каналов,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  - коэффициенты сопротивления, которые для каждого из каналов находятся стандартным образом, с помощью методов, изложенных в работе [1].

Уравнение движения в верхней части кольцевого канала (там, где происходит кипение) записывается в следующем виде [2]

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP_F}{dz} + \rho_{CM} g; \quad (2)$$

$$\frac{dP_F}{dz} = \Phi_L^2 \frac{dP_{SL}}{dz} = \Phi_G^2 \frac{dP_{SG}}{dz}$$

$$\begin{aligned} \Phi_L^2 &= 1 + \frac{\Omega}{X} + \frac{1}{X^2} \\ \Phi_G^2 &= 1 + \Omega X + X^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$X(z) = \sqrt{\frac{dP_{SL}(z)}{dz} / \frac{dP_{SG}(z)}{dz}}$$

$$\begin{aligned} -\frac{dP_{SG}(z)}{dz} &= \frac{\lambda_2 W_G(z)^2}{2\rho_G D_{r2} S_2^2}, \\ -\frac{dP_{SL}(z)}{dz} &= \frac{\lambda_1 W_L(z)^2}{2\rho_L D_{r1} S_1^2} \end{aligned} \quad (4)$$



где  $\frac{dP_{sg}}{dz}$ ,  $\frac{dP_{sl}}{dz}$  - градиенты давления, необходимые для преодоления трения жидкостью и газом соответственно, в том случае, если бы каждая из этих компонент занимала бы все сечение трубы,  $\Omega = 5$  - если поток пара и поток жидкости являются ламинарными,  $\Omega = 10$  если поток пара ламинарный а поток жидкости турбулентный,  $\Omega = 20$  если поток пара турбулентный и поток жидкости турбулентный,  $\rho_G, \rho_L$  - плотности пара и жидкости соответственно,  $\lambda_3, \lambda_4$  - коэффициенты сопротивления пара и жидкости соответственно, в том случае если бы они занимали все сечение канала,  $\rho_{CM}$  - плотность смеси пара и жидкости. Коэффициенты сопротивления  $\lambda_3, \lambda_4$  - находятся стандартным образом по методике, описанной в работе [1],  $\rho_{CM}$  вычисляется по следующей формуле (5).

$$\rho_{CM} = \alpha_L \rho_L + (1 - \alpha_L) \rho_G \quad (5)$$

$$\alpha_L = (\Phi_L^2)^{-1/3}$$

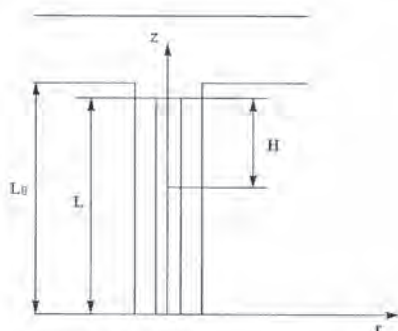


Рис. 1. Схема ТОВ: 1 - внутренняя труба, 2 - внешняя труба, 3 - горизонтальная труба.  $L_0$  - длина внешней трубы,  $L$  - длина внутренней трубы,  $H$  - длина зоны кипения,  $r$  - радиальная координата,  $z$  - продольная координата (на нижней кромке  $z=0$ ).

$W_G(z)$  и  $W_L(z)$  массовые потоки пара и жидкости соответственно в точке с координатой  $Z$ . При равномерном распределении теплового потока подлине трубы данные величины задаются следующими соотношениями.

$$W_G(z) = \frac{U(z - (L - H))}{hL_0}; \quad W_L(z) = W - W_G \quad (6)$$

где  $U$  - полная тепловая мощность, которая подается на ТОВ.

Решая численно уравнения (1)- (4), для стандартной ТОВ производства НПО «Фундаментстройаркос» получаем параметры потока приведенные в таблице №1. Расчеты показывают, что как правило, в нижней части кольцевого канала, там где нет кипения, движение жидкости носит ламинарный характер. В этом случае решая уравнение теплопроводности.

$$V_z \frac{\partial t}{\partial z} = \chi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (7)$$

для кольцевого канала по методу разделения координат [3] можно получить температуру на внешней стенке ТОВ. В выражении (7)  $V_z$  - скорость жидкого хладагента,  $t$  - температура жидкого хладагента,  $\chi$  - температуропроводность жидкого хладагента,  $z, r$  - продольная и радиальная цилиндрические координаты, изображенные на рис. 1. Сравнение теоретической и экспериментальной температур приводится на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики потока в зависимости от подаваемой на ТОВ тепловой нагрузки при температуре хладагента  $-20$  °С (хладагент- аммиак)

Тепловая нагрузка, Вт	Полный поток, кг/с	Глубина кипения, м	Истинное газосодержание на выходе	Массовое газосодержание на выходе
100	0.0107	1.277	0.102	$3.56 \cdot 10^{-4}$
200	0.0140	2.237	0.147	$8.96 \cdot 10^{-4}$
300	0.0163	2.821	0.187	$1.35 \cdot 10^{-4}$
400	0.0184	3.189	0.283	$1.68 \cdot 10^{-4}$
500	0.0200	3.649	0.289	$2.16 \cdot 10^{-4}$

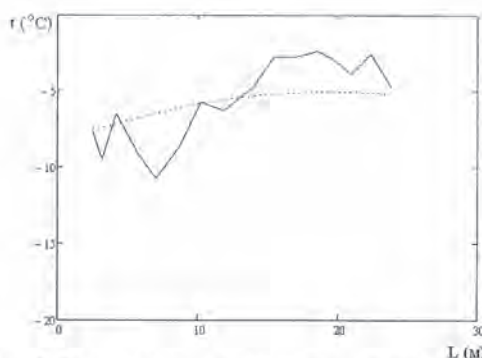


Рис. 2. Зависимость температуры стенки от глубины при тепловой нагрузке 90 Вт. ----- - теоретические значения температуры, сплошная линия; ----- - экспериментальные значения температуры.



Анализ экспериментального и теоретического распределения температур по глубине ТОВ свидетельствует о сходимости результатов. Перепад температур по глубине составляет не более 3 град С, следовательно за счет циркуляции аммиака происходит интенсивное охлаждение нижней части ТОВ. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения систем «ВЕТ» при работе на аммиаке с глубиной ТОВ до 30 м.

#### **Список литературы**

1. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992.

2. Clayton, T. Crowe Multiphase flow handbook / T. Clayton. – Boca Raton London New York, Taylor&Francis, 2006.

3. Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, В. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988.

#### **References**

1. Idelchik I. E. 1992. Handbook of hydraulic resistance. Moscow, Mashinostroenie

2. Clayton T. 2006. Crowe Multiphase flow handbook. Boca Raton London New York, Taylor&Francis.

3. Landau L.D., Lifshitz E.M. 1988. Hydrodynamics. Moscow, Nauka

## Experience in design development and operation of the thermal stabilization system for soils at the dam on the Irelyakh River

G.M. Dolgikh<sup>1</sup>, S.N. Okunev<sup>1</sup>, S.N. Strizhkov<sup>1</sup>, S.N. Dolgikh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundamentstroyarkos Research & Production Association  
Ul. Novatorov, 12, Tyumen, Russia 625000, E-mail: fsa@npo-fsa.ru

<sup>2</sup> Yakutniproalmaz Institute, Mirny, E-mail: sdolgh@yna.alrosa-mir.ru

**Abstract.** The past experience in design development and operation has been studied with reference to different systems for soil freezing used in construction and operation of the dam on the Irelyakh River. Recommendations are given for efficient application of subsurface seasonally operating cooling devices manufactured by Fundamentstroyarkos Research & Production Association.

**Keywords:** soil freezing; thermal stabilization; seasonally operating cooling devices (SOCD); dam; coolant; heat stabilizers.

## Опыт проектирования и эксплуатации системы термостабилизации грунтов плотины на р. Ирелях

Г. М. Долгих<sup>1</sup>, С. Н. Окунев<sup>1</sup>, С. Н. Стрижков<sup>1</sup>, С. Н. Долгих<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НПО Фундаментстройаркос  
Россия 62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12, e-mail: fsa@npo-fsa.ru  
<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз», Мирный, e-mail: sdolgh@yna.alrosa-mir.ru

**Аннотация.** Рассмотрен исторический опыт проектирования и использования различных систем замораживания грунтов при строительстве и эксплуатации плотины на р. Ирелях. Приводятся рекомендации по эффективному применению для этих целей глубинных СОУ производства НПО «Фундаментстройаркос».

**Ключевые слова:** замораживание грунтов; термостабилизация; сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ); плотина; хладагент; термостабилизаторы.

## Опыт проектирования и эксплуатации системы термостабилизации грунтов плотины на р. Ирелях

Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, С. Н. Стрижков, С. Н. Долгих

В 1964 году на р. Ирелях впервые была построена земляная плотина с суглинистым ядром высотой 20 метров с воздушной охлаждающей системой и сохранением мерзлого основания. Плотина была возведена из талых укатанных суглинков с пригрузкой откосов песком, каменным креплением и термоизоляционным слоем. Основанием плотины служат мергелистые глины, доломиты, мергели. Аллювий, прикрывающий коренные породы, содержит линзы льда толщиной до 40 см. Первоначальная воздушная установка состояла из 327 колонок глубиной от 8,5 до 25 метров. Шаг между колонками – 1,5 метра. Вся система была разбита на семь самостоятельных секций. Диаметр труб достигал 140 мм. Производительность каждого вентилятора на секции достигала 13 тыс. м<sup>3</sup>/час. К 1966 году толщина мерзлотной завесы составляла 10 метров.

При эксплуатации этой системы выявились ее недостатки - закупорка труб льдом. Лед образовывался за счет конденсации и замораживания влаги воздуха. Это привело к значительному растеплению как грунтов плотины, так и нижележащего грунта, а также к увеличению фильтрации воды через основание плотины.

Однако основным источником растепления основания грунтовой плотины стал водосбросной береговой канал. Первоначально русло водосбросного канала было выполнено без гидроизоляции и крепления. Уже через 3 года температура грунтов на глубине 15 метров достигала +10° С. В последующие годы предпринимались неоднократные попытки выполнить гидроизоляцию канала и остановить процесс растепления его основания. Однако процесс проходил малозаметно. В 2002 году расход фильтрации вырос до критических величин, после чего были предприняты определенные защитные меры по снижению фильтрации и замене замораживающей системы с воздушной на парожидкостную. Для этого в процессе капитального ремонта плотины в 2003 году было принято решение о применении цементации грунтов плотины, после чего выполнить их замораживание при помощи глубинных СОУ глубиной 40 метров.

Первоначально для замораживания грунтов планировалось разместить в суще-

ствующих скважинах воздушной системы многотрубные глубинные термостабилизаторы. Схема установки многотрубных термостабилизаторов приведена на рис. 1. Индивидуальные термостабилизаторы размещались в скважине таким образом, что каждый из них производил замораживание только определенного горизонта. Таким образом, осуществлялось промораживание по всей глубине. В качестве хладагента применяется аммиак. Однако в процессе производства работ по очистке скважин выяснилось, что они имеют значительные деформации и в них практически невозможно установить многотрубные термостабилизаторы. Поэтому многотрубные термостабилизаторы были установлены только лишь в 29 скважинах. Для замораживания остальной части плотины решено использовать однотрубные глубинные СОУ, устанавливаемые во вновь пробуренные скважины (рис. 2). В качестве хладагента в однотрубных СОУ используется углекислота. Работы по установке глубинных СОУ были завершены в 2004 году. Всего на плотине гидроузла на р. Ирелях были установлены 198 СОУ 50/40, одна СОУ 50/50, одна СОУ 100/80 и 29 ТК 32/L.

Фото плотины с установленными глубинными СОУ приведено на рис. 3.

Замеры температур грунтов в первый зимний период работы СОУ показали наличие талых участков, что свидетельствовало о наличии фильтрации воды в этих зонах. Проведенные повторные работы по устранению фильтрации грунтов на правом борте с применением двухрядной цементационной завесы и двухрядной системы замораживания грунтов привели к исключению фильтрации грунтов только на этом участке, что позволило выполнить замораживание грунтов по всей глубине установки СОУ и создать низкотемпературный массив грунта (рис. 4). На участках плотины, где фильтрационные потоки в грунтах плотины не устранены, наблюдаются талые участки. Таким образом, если на участках талых зон будут выполнены работы по исключению фильтрации грунтов, то глубинные СОУ полностью заморозят грунты на глубину их погружения. В 2006 году были проведены работы по определению эффективности работы однотрубных СОУ. По результатам замеров было выяснено,





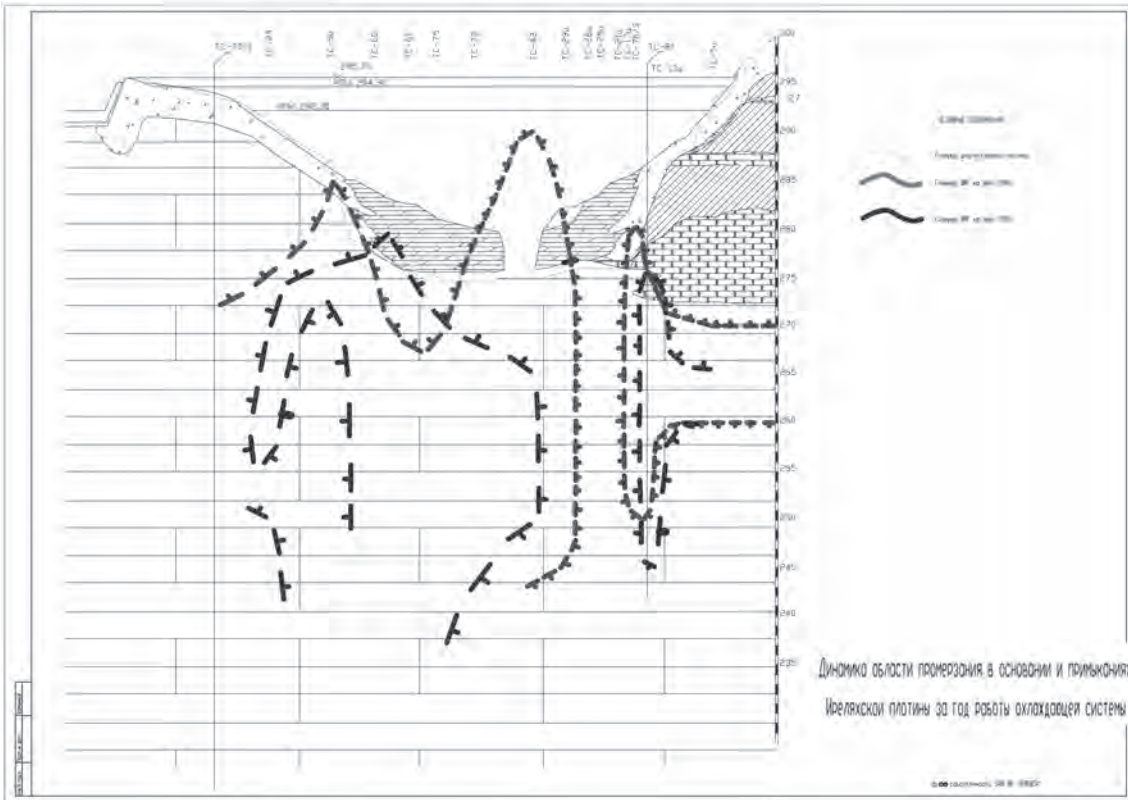


Рис. 4. Динамика области промерзания в основании и примыканиях Иреляхской плотины за год работы системы термостабилизации грунтов.

## Secondary use of metal pile foundations in permafrost in the Chayanda oil-gas condensate field

S. Kudryavtsev, A. Shtokolov

Far Eastern State Transport University  
Serysheva St. 47, Khabarovsk, Russia 680000, e-mail: kudr@festu.khv.ru

**Abstract.** The research paper deals with variants of secondary use of metal pile foundations in permafrost soil in the oil-gas condensate fields of Russia. The ways to determine pile drawing force in permafrost soil were studied. We received the data of experimental dependence of pile drawing forces on the length of metal piles what makes it possible to have a rational choice of withdrawal equipment.

**Keywords:** metal piles; permafrost; numerical simulation.

## Повторное использование металлических свай в вечномёрзлых грунтах на Чаяндинском нефтегазоконденсатном месторождении

С. А. Кудрявцев, А. В. Штоколов

Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Россия 680000, г. Хабаровск, Серышева д. 47, e-mail: kudr@festu.khv.ru

**Аннотация.** Рассмотрены варианты использования металлических свайных фундаментов при их вторичном использовании на новых нефтегазоконденсатных месторождениях России. Исследованы способы определения выдергивающей силы в вечномёрзлых грунтах. Получены экспериментальные зависимости выдергивающих сил от длины металлических свай позволяющие рационально подобрать оборудование для их извлечения.

**Ключевые слова:** металлическая свая; вечномёрзлый грунт; численное моделирование.

## Повторное использование металлических свай в вечномерзлых грунтах на Чайядинском нефтегазоконденсатном месторождении

С. А. Кудрявцев, А. В. Штоколов

В настоящее время в нефтегазовой промышленности все большую актуальность вызывают мероприятия по вторичному использованию металлических конструкций. Так, например, значительное количество металлических фундаментов (свай и ростверков) целесообразно вторично использовать на новых буровых строительных площадках, удаленных от промышленных центров изготавливающих типовые конструкции. Наиболее перспективным по добыче в ближайшее время в планах ОАО «Газпром» является Чайядинское нефтегазо-конденсатное месторождение (НГКМ) расположено в Якутии на юге Сибирской платформы в пределах Непского свода [1].

В географическом отношении Чайядинское НГКМ расположено в пределах Ленского и Мирнинского районов республики Якутия, приблизительно в 150 км к западу от г. Ленска. В орографическом отношении участок представляет собой слабовсхолмленную равнину. Месторождение было открыто в 1989 г. и включает в себя два ранее открытых месторождения – Озерное и Нижне-Хамакинское.

Запасы Чайядинского месторождения по категории оцененные (С1) и предполагаемые (С2) составляют 1,24 трлн. м<sup>3</sup> газа, 68,4 млн. т нефти и конденсата. Запасы гелия составляют 1400 млн. м<sup>3</sup>.

Согласно плану, первая разведочная скважина № 43 на Чайянде была забурена в апреле 2010 года. Кроме того, в 2010 году забурено около 8 тыс. м горных пород, проведены испытания и закончено строительство четырех скважин, подготовлены для монтажа буровых станков пять площадок на 2011 год. К концу 2016-го года месторождение должно быть введено в эксплуатацию.

Исследования вторичного применения металлических свай при строительстве свайных фундаментов проводились под буровую установку БУ-4200/250 ЭУК-БМ ВЗБТ сооружаемую на Чайядинском НГКМ Якутии.

В большинстве случаев строительство скважин осуществляется на площадках, на которых сгруппирован куст эксплуатационных скважин. В связи с этим, для сокращения времени монтажа и демонтажа буровой установки целесообразно применять фундаменты,

по которым буровая установка сможет передвигаться и выполнять работы по бурению скважин.

Свайные фундаменты под буровую установку на кустовых площадках являются временными сооружениями и после выполнения работ по бурению подлежат рекультивации.

Извлечение металлических свай из вечномерзлого грунта возможно двумя основными способами:

1) непосредственно из вечномерзлого грунта, основываясь на выдергивающем усилии используемого оборудования и прочностных свойств металлических свай;

2) растепления грунта вокруг сваи по внутренней поверхности всей длины и последующего выдергивания сваи соответствующим оборудованием. В этом случае целесообразно применять следующее оборудование: парогенератор и вибропогружатель с боковым захватом. При помощи парогенератора производится растепление грунта вокруг сваи. По всей длине сваи образуется область талого грунта с низкой удерживающей силой сваи в вечномерзлом грунте, что способствует незатруднительному извлечению ее при помощи вибродинамического оборудования с боковым захватом металлической сваи.

Для определения силы выдергивания сваи из вечномерзлого грунта были проведены аналитические и численные исследования методом конечных элементов для металлических свай, используемых на Чайядинском НГКМ.

При строительстве буровых скважин на Чайядинском НГКМ применяются сваи в виде металлических труб длиной 12 м., диаметром 0,53 м., с толщиной стенки 0,008 м. с заполненной в нижней части на 3 м. цементно-песчанной смесью.

Инженерно-геологические условия площадки строительства на Чайядинском НГКМ представлены вечномерзлыми глинистыми грунтами мощностью до 180 м с различным литологическим строением и степенью засоленности, с процессами термоэрозии, сезонного пучения грунтов и других явлений.

При аналитических исследованиях необходимо определить величину удерживающей силы и массу самой металлической сваи [2, 3].

Расчет удерживающих сил сваи в вечномерзлом грунте определяется по следующему выражению:

$$F_{y\partial} = P + (S * f_{\text{сум}} * f_{\text{тр}}) \quad (1)$$

где  $P$  – вес сваи;  $S$  – площадь боковой поверхности сваи;  $f_{\text{сум}}$  – суммарное расчетное сопротивление основания на боковой поверхности сваи,  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения стали об влажный глинистый грунт.

Вес сваи определяем по формуле:

$$P = (S_c * h_{\text{пнс}} * \rho_{\text{пнс}}) + (h_c * G_c) \quad (2)$$

где  $S_c$  – площадь поперечного сечения сваи;  $h_{\text{пнс}}$  – высота заполнения сваи песчано-цементной смесью;  $\rho_{\text{пнс}}$  – плотность песчано-цементной смеси;  $h_c$  – длина сваи;  $G_c$  – вес сваи.

Удерживающие силы сваи в грунте определяются по выражению:

$$F_{\text{ду}} = U \sum f_{n,i} * h_i \quad (3)$$

где  $u$  – наружный периметр поперечного сечения сваи, м;  $f_{n,i}$  – отрицательное трение  $i$ -го слоя оттаивающего грунта по боковой поверхности сваи, кПа;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

В результате аналитических расчетов установлено, что вес сваи составляет  $P = 46,55$  кН, а удерживающая сваю сила в вечномерзлом грунте составляет  $F_{\text{уд}} = 1367,67$  кН.

Численное моделирование эксперимента методом конечных элементов по определению выдергивающей силы сваи из вечномерзлого грунта проводилось на программном комплексе FEMmodels, разработанном сотрудниками ЗАО "НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», Санкт-Петербург под руководством профессора Улицкого В.М. При данном исследовании использовалась упруго-пластическая модель грунта [4].

Расчетная схема численного эксперимента приведена на рис. 1. В расчетной модели, в вечномерзлый грунт погружена металлическая свая диаметром 0,53 м. и длиной 12 м.

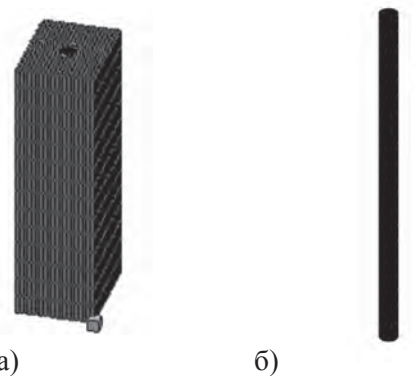


Рис. 1. Расчетная схема численного моделирования:

а) вечномерзлый грунт; б) металлическая свая.

Выдергивающая нагрузка прикладывалась ступенями по 250, 500, 750, 1000 кН для двух технологических условий: из вечномерзлого грунта и оттаиваемого с помощью парогенератора в области вечномерзлого грунта по всей длине сваи в радиусе до 0,4 м от ее оси.

На рис. 2 приведены результаты вертикальных перемещений сваи от пошагового приложения выдергивающей нагрузки в вечномерзлых грунтах. Максимальная величина деформации при выдергивающем усилии 1000 кН составила около 0.1 м, что позволяет сделать вывод о том, что сцепление вечномерзлого грунта с металлической сваем преодолено.

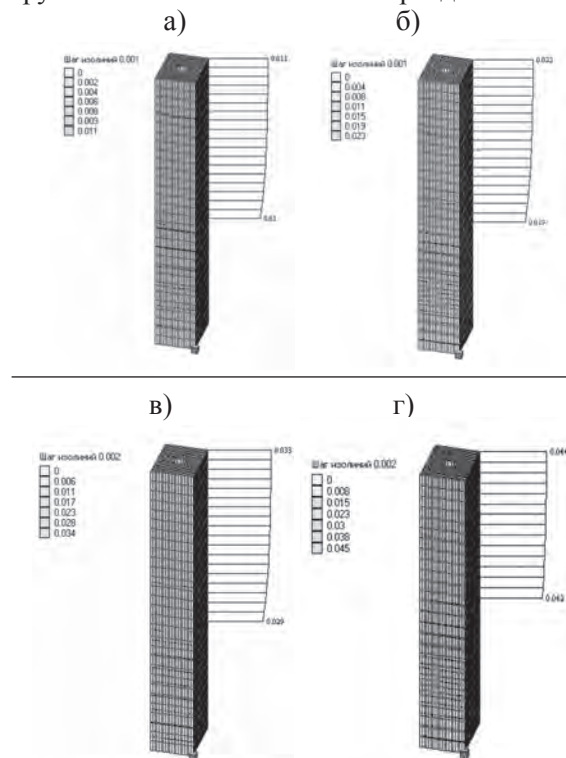


Рис. 2. Эпюры вертикальных перемещений сваи от пошагового приложения выдергивающей нагрузки в вечномерзлых грунтах: а) 250 кН; б) 500 кН; в) 750 кН; г) 1000 кН.



На рис. 3. приведены графики зависимости деформации выдергивания от выдергивающей нагрузки в вечномёрзлых грунтах и в талых грунтах.

Анализ выполненных аналитических и численных расчетов по определению выдергивающих усилий из вечномёрзлого грунта металлических свай показал, что в данном случае целесообразно использовать современное вибродинамическое оборудование с боковым захватом металлической сваи, а при более значительном сцеплении вечномёрзлого грунта дополнительно применять оттаивание вечномёрзлого грунта с помощью парогенератора для растепления грунта вокруг внутренней поверхности свай.

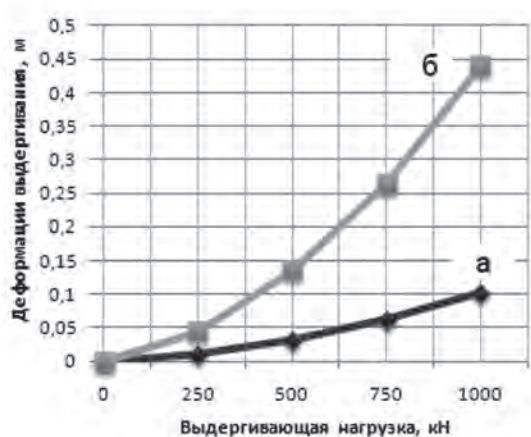


Рис. 3. График зависимости деформации выдергивания от выдергивающей нагрузки: а) в вечномёрзлых грунтах; б) в оттаиваемых вокруг свай грунтах.

Исследования показали, что при соблюдении предлагаемой технологии по извлечению металлических свай и их вторичному применению для последующего строительстве однотипных сооружений предлагаемое решение позволяет значительно снизить стоимость

при устройстве фундаментов на металлических сваях на новых буровых строительных площадках, удаленных от промышленных центров.

### Список литературы

1. Бурова, И. А. Карбонатные коллекторы вендско-нижнекембрийского нефтегазоносного комплекса Восточной Сибири / И. А. Бурова // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2010. – № 2. – С. 1–17.
2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1986. – 42 с.
3. СНиП 2.02.04-89. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 56 с.
4. Кудрявцев, С. А. Полевые исследования несущей способности буронабивных свай статической вдавливающей нагрузкой в условиях г. Хабаровска / С. А. Кудрявцев, А. А. Штоколов // Проблемы развития газовой промышленности Сибири. ООО «ТюменНИИгирогас». – 2010. – С. 162–166.

### References

1. Burova, I.A. 2010. Carbonate collectors of the Vendian – Lower Cambrian oil-and-gas bearing complex in Eastern Siberia. *Neftegazovaya Geologia, Teoria i Praktika* 2: 1-17. (in Russian)
2. USSR State Committee on Construction. 1986. *Building Code SNiP 2.02.03-85, Piles Foundations*. Moscow: Stroyizdat, 42 pp. (in Russian)
3. USSR State Committee on Construction. 1990. *Building Code SNiP 2.02.04-88, Foundations in Permafrost*. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 56 pp. (in Russian)
4. Kudryavtsev, S.A., Shtokolov, A.V. 2010. Field research of bearing capacity of a bored pile with a static pressing load in the conditions of Khabarovsk. In: *Gas Industry Development Problems in Siberia*. Tyumen: TyumenNIIgrogas, p. 162-166.

## **Peculiarities of the active layer compaction by tamping in the cryolithozone**

N.B. Kutvitskaya<sup>1</sup>, N.P. Semenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Fundamentproekt», Moscow, Russia, e-mail: otim@fundamnt.ru

<sup>2</sup>Minstroy RS(Y), Yakutsk, Russia, e-mail: semnatpro@mail.ru

**Abstract.** For the first time under permafrost conditions test experiments on soils of the active layer compaction by tamping have been conducted. Peculiarities of the active layer compaction in the cryolithozone have been revealed based on test results.

**Keywords:** active layer; thaw-subsident soil; compaction by tamping.

## **Особенности уплотнения грунтов деятельного слоя трамбованием в условиях распространения вечномёрзлых грунтов**

Н. Б. Кутвицкая<sup>1</sup>, Н. П. Семенова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия, г. Москва, ОАО «Фундаментпроект», e-mail: otim@fundamnt.ru

<sup>2</sup> Россия, Якутск, Минстрой РС(Я), e-mail: semnatpro@mail.ru

**Аннотация.** Впервые в условиях распространения вечномёрзлых грунтов рассмотрено устройство фундаментов на уплотнённых грунтах деятельного слоя (слоя сезонного оттаивания-промерзания) трамбованием. По результатам исследований выявлены особенности уплотнения талых грунтов трамбованием в условиях криолитозоны.

**Ключевые слова:** деятельный слой; просадочные грунты; механическое трамбование.

# Особенности уплотнения грунтов деятельного слоя трамбованием в условиях распространения вечномерзлых грунтов

Н. Б. Кутвицкая, Н. П. Семенова

## Введение

Серьезную опасность для строительства на вечномерзлых грунтах представляют сезонное промерзание и оттаивание деятельного слоя, вызывающих деформацию зданий и сооружений. В связи с этим строительство в районах распространения вечной мерзлоты, как правило, ведётся на свайных фундаментах по

I принципу, с сохранением мерзлого состояния грунтов. Глубина заложения свай зависит от сил морозного пучения деятельного слоя, т.е. от его влажности, пористости, гидрофильности, плотности и достигает 25 м и более, что значительно увеличивает стоимость строительства.

Поскольку в современных условиях рыночной экономики одним из основных требований заказчиков строительства является снижение затрат на строительство, устройство поверхностных и малозаглубленных фундаментов сегодня особо привлекательно, так как в этом случае расходы по возведению нулевого цикла зданий значительно сокращают сметную стоимость всего строительства. Однако в России, из-за особенностей и свойств деятельного слоя (пучение при промерзании и значительные осадки при оттаивании, пористость, высокая влажность, гидрофильность, ...) поверхностные и малозаглубленные фундаменты в условиях распространения вечномерзлых грунтов широкого распространения не получили.

## Устройство поверхностных и малозаглубленных фундаментов в условиях распространения вечномерзлых грунтов

Опыт строительства зданий на поверхностных фундаментах в России, за рубежом и исследования института Мерзлотоведения СО РАН показывают, что применение малозаглубленных и поверхностных фундаментов не эффективно без предварительной подготовки грунтов деятельного слоя [4-6]. При этом положительный опыт строительства имеют чаще всего фундаменты на гравийных подсыпках, при толщине которых 1 м и более гасятся неравномерные осадки грунтов деятельного слоя [2].

Сократить материалоемкость, значительно снизить высоту подсыпки и упростить

конструкцию фундамента позволяют известные способы и методы упрочнения слабых талых грунтов в зоне распространения вечной мерзлоты: промораживание, химическое закрепление (цементация, силикатизация, смолизация, и т.п.), но в силу стоимостных показателей химических реактивов, толщины деятельного слоя (3 м и более) эти способы не имеют экономической эффективности.

## Уплотнение грунтов деятельного слоя трамбованием

Впервые рассмотрен способ улучшения свойств грунтов деятельного слоя механическим трамбованием для создания несущего основания под поверхностные фундаменты. Уплотнение грунта трамбованием для создания несущего основания успешно используется на слабых просадочных грунтах России и за рубежом как наиболее экономически эффективный способ [1, 3].

Комплексных исследований в данном направлении не проводилось. В связи с этим возникла необходимость изучения реальности, надежности и эффективности применения уплотненных грунтов сезонно-оттаивающего слоя в качестве несущего основания.

Проведенные с 1998 г. исследования в г. Якутске показали, что гидрогеологические и физико-механические свойства грунтов деятельного слоя аналогичны свойствам просадочных грунтов.

Отличие уплотнения грунтов слоя сезонного оттаивания в процессе вытрамбовывания котлованов по сравнению с их устройством на обычных талых грунтах (полупространствах) состоит в том, что уплотняться должна вся толща сезонного оттаивания в целях исключения вертикальных деформаций при промерзании и оттаивании.

Особенности технических решений оснований и конструкций фундаментов в уплотненном механическим трамбованием грунтов деятельного слоя на вечномерзлых грунтах должны быть обусловлены, в основном, наличием подстилающего несжимаемого мерзлого грунта и конечными размерами уплотняемого талого слоя.

Предварительная оценка влияния глубины вытрамбовывания котлованов (при оптимальных значениях энергии удара) на рас-

пределение напряжений по глубине позволяет рекомендовать для талых слоев мощностью до 4,5 м применение фундаментов мелкого заложения. Это могут быть столбчатые или ленточные фундаменты с заложением подошвы на глубину менее 1,5 среднего диаметра (ширины) вытрамбованного котлована. Как разновидность ленточных, могут применяться ленточные прерывистые имеющие более высокие технико-экономические показатели.

При использовании фундаментов в вытрамбованных котлованах на вечномерзлых грунтах основное негативное воздействие на них может оказать увеличение толщины слоя сезонного оттаивания и ежегодное сезонное промерзание-оттаивание верхнего слоя грунтов. При этом возникает вероятность возникновения процессов морозного пучения и осадки оттаивания верхнего слоя.

Если глубина сезонного оттаивания не выходит из пределов непучинистой при промерзании и непросадочной при оттаивании планировочной насыпи, подошву малоуглубленного фундамента можно располагать в пределах деятельного слоя. В этом случае необходимо не допустить оттаивание вечномерзлых грунтов и обводнение грунтов насыпи путем устройства, например, вентилируемого подполья и водоотвода от сооружения.

Если же уберечь от заиливания или переувлажнения подсыпку во время эксплуатации не представляется возможным, например, в случае устройства ее на застраиваемой территории в котловане, или насыпь отсыпана пучинистыми грунтами, то над фундаментом следует устроить дополнительный слой подсыпки, возможно даже, со слоем эффективной теплоизоляции, чтобы локализовать процессы сезонного оттаивания-промерзания слоем насыпи выше подошвы фундамента. Оба этих варианта могут быть использованы при любых типах мелкозаглубленных фундаментов.

Второй особенностью устройства оснований с фундаментами в вытрамбованных котлованах на вечномерзлых грунтах является необходимость учитывать то, что во время строительства и в начальный эксплуатационный период произойдет двухстороннее промерзание талой подсыпки и талого природного грунта, которое также может вызвать пучение грунта под подошвой или острием фундамента.

При вытрамбовке котлованов в талом слое грунтов, подстилаемых мерзлыми, могут встретиться три варианта (рис. 1).

При третьем варианте вытрамбовки наблюдается, как правило, уплотнение до «отказа», когда дальнейшее увеличение энергии

уплотнения сопровождается, в основном, обратными изменениями, не происходит повышения степени уплотнения (возможно только разжижение) и продавливания уплотненной зоны, так как ее основание опирается на мерзлые «непродавливаемые» грунты.

В результате проведенных опытных работ в г. Якутске по уплотнению грунтов деятельного слоя механическим трамбованием с поверхности определены технологические параметры вытрамбовывания котлованов в слое конечной толщины: оптимальное количество сбрасываний на уплотняемый грунт трамбовки весом 2,5 т, высота ее сбрасывания;

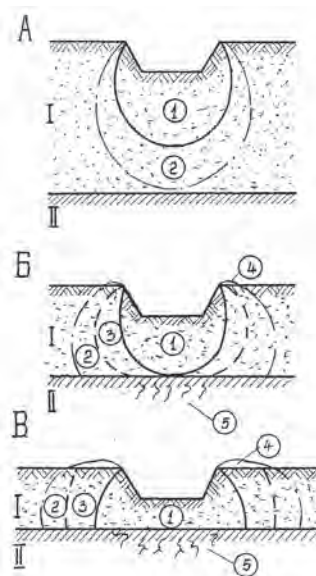


Рис. 1. Варианты формирования зон при вытрамбовке котлована в двухслойном основании А, Б, В – варианты влияния вытрамбовки на мерзлые грунты в зависимости от толщины талого уплотняемого слоя и зон уплотнения. I, II – соответственно, уплотняющийся талый и недеформирующийся мерзлый слой. 1 – достаточно уплотненная зона; 2 – зона распространения уплотнения; 3 – боковое расширение уплотненной зоны; 4 – выпор грунта; 5 – зона нарушенной структуры мерзлого грунта.

А. талый слой имеет мощность, достаточную для восприятия и полного затухания в ней процессов, вызванных трамбованием, в этих случаях его мощность превышает зону уплотнения;

Б. уплотненная зона не превышает мощности талого слоя, а уплотняющее воздействие (напряжения) распространяются в подстилающий мерзлый грунт;

В. зона уплотнения теоретически превышает мощность талого слоя, то есть механическое воздействие больше необходимых и достаточных величин для уплотнения всей толщи талого слоя.



толщина и размеры уплотненной зоны вокруг котлована. Наилучшие результаты достигнуты при суммарной влажности грунтов менее 0,25 д.е. и плотности скелета грунта менее 1,3 т/м<sup>3</sup> при массе трамбовки 2,5 - 3 т, сбрасываемой с высоты 4 м. В плотных грунтах с плотностью выше 1,65-1,7 т/м<sup>3</sup> при степени влажности меньше 0,7 уплотнение грунтов происходит, но степень уплотнения ниже, чем в рыхлых грунтах [7].

### Заключение

В районах распространения вечномерзлых грунтов основание, в котором проводится уплотнение грунтов трамбованием, имеет существенное отличие от талого основания просадочных грунтов, при этом используемые конструкции фундаментов существенных отличий не имеют.

### Список литературы

1. Багдасаров, Ю. А. Конструкции фундаментов в вытрамбованных котлованах / Ю. А. Багдасаров, И. И. Крутов // Жилищное строительство. – 1979. – № 9. – С. 25–29.
2. Гончаров, Ю. М. Эффективные конструкции фундаментов на вечномерзлых грунтах / Ю. А. Гончаров. – Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1988. – 193 с.
3. Крутов, В. И. Фундаменты в вытрамбованных котлованах / В. И. Крутов, Ю. А. Багдасаров, И. Г. Рабинович. – М. : Стройиздат, 1985. – 164 с.
4. Киселев, М. Ф. Незаглубленные и мелкозаглубленные фундаменты под малоэтажные здания на пучинистых грунтах в нечерноземной зоне / М. Ф. Киселев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – № 2. – С. 3–4.
5. Киселев, М. Ф. Указания по проектированию и строительству мелкозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах / М. Ф. Киселев. – М. : Стройиздат, 1964.
6. Сальников, П. И. Устойчивость фундамен-

тов зданий на мерзлых грунтах в Южном Забайкалье / П. И. Сальников. – Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. – 207 с.

7. Semenova, N. P. Experience of active layer tamping in cryolithozone / N. P. Semenova, Tseeva A. N., N. B. Kutvitskaya // Proceedengs of the 8 International Conference on Permafrost. – Swiss Federal Institute for Snow and Avalance Research (SLF), Institute for Geotechnical Engineering (IGT), Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Switzerland, 21-25, July 2003. – С. 1007–1011.

### References

1. Bagdasarov, Yu.A, Krutov, V.I. 1979. *Foundations in tamped out foundation pits*. House construction. №9. pp. 25-29. (in Russian)
2. Goncharov Yu.M. 1988. *Effective foundations on the permafrost*. 1985. Siberian Branch AS, Novosibirsk: Nauka., 193 pp. (in Russian)
3. Krutov V.I., Bagdasarov, Yu.A., Rabinovich, I.G. 1985. *Foundations in tamped out foundation pits (in Russian)*. Moscow: Stroyizdat. 164 pp. (in Russian)
4. Kiselev M.F. 1982. *Surface and shallow foundations of lowlevel building on the frost susceptible soil upon freezing*. Bases, Foundations and Mechanics of the Soils. No.2: pp/ 3-4.
5. Kiselev M.F. 1964. *Guidance on foundation design and construction on the frost susceptible soil upon freezing*. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
6. Salnikov P.I. 1996. *Stability of building foundations on the permafrost in South Zabaikalie*. Yakutsk: Permafrost Institute Press (in Russian). 207 pp. (in Russian)
7. Semenova N.P., Tseeva A.N., Kutvitskaya N.B.. 2003. Experience of active layer tamping in cryolithozone. *Proceedengs Of The 8 International Conference On Permafrost. 21-25, July 2003. Switzerland*: pp. 1007-1011. Swiss Federal Institute for Snow and Avalance Research (SLF), Institute for Geotechnical Engineering (IGT), Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Switzerland.

## Research of the effect of «floating» working equipment static rippers in frozen soil

I.K. Rastegaev<sup>1</sup>, V.B. Serdobov<sup>2</sup>, R. V. Morozov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS

Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: rastegaev2009@yandex.ru

<sup>2</sup>Moscow Automobile And Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

**Abstract.** In the research of mechanics of breakage frozen soil was carried out analysis of analytical relationships to determine the active forces of ripping operation. Established a formula for determining the rational depth of ripping, when ripper tip "floats", i.e. the vertical force component ripping resistance is zero (or close to it), and the horizontal component equal to the total resistance. Established that the depth of the "floating" the tip depends on the strength of the developed soil, the geometric parameters of the tip (width, angle of ripping, the rear angle), ripping the drag force, power basic tractor, the angle of shear of the soil and the coefficient of external friction of the soil and steel. The main parameters are the strength of the developed soil and resistance to ripping, depending on the power base of the tractor. Experimental study allowed to determine that the depth of "floating" tip of the ripper is 0,6 ... 0,8 of the maximum attainable depth of ripping of developed soil that forms the basis for selection of rational modes of operation of the machine. It is proposed to calculate metalware rippers and their productivity at work on a rational depths, i.e. at a depth of the "floating".

**Keywords:** depth of «float»; static ripping; frozen soil.

## Исследование эффекта «плавания» рабочего оборудования рыхлителей статического действия в мерзлом грунте

И. К. Растегаев<sup>1</sup>, В. Б. Сердобов<sup>2</sup>, Р. В. Морозов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН,  
e-mail: rastegaev2009@yandex.ru

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)  
г. Москва, Россия

**Аннотация.** В ходе исследования механики процесса рыхления мерзлого грунта был осуществлен анализ аналитических зависимостей для определения активных сил рыхления. Установлена формула для определения рациональной глубины рыхления, когда наконечник рыхлителя «плавает», то есть вертикальная составляющая силы сопротивления рыхлению равна нулю (или близка к нему), а горизонтальная составляющая равна полному сопротивлению. Установлено, что глубина «плавания» наконечника зависит от прочности разрабатываемого грунта, геометрических параметров наконечника (ширины, угла рыхления, заднего угла), силы сопротивления рыхлению, мощности базового тягача, угла скалывания грунта и коэффициента внешнего трения грунта по стали. Главными параметрами являются прочность разрабатываемого грунта и сила сопротивления рыхлению, зависящая от мощности базового тягача. Экспериментальное исследование позволило установить что глубина «плавания» наконечника рыхлителя составляет 0,6...0,8 от максимально достижимой глубины рыхления разрабатываемого грунта для базового тягача, что составляет основу для выбора рациональных режимов работы машины. Предлагается производить расчет металлоконструкции рыхлителей и их производительности при работе на рациональной глубине, то есть на глубине «плавания».

**Ключевые слова:** глубина «плавания»; статическое рыхление; мерзлый грунт.

# Исследование эффекта «плавания» рабочего оборудования рыхлителей статического действия в мерзлом грунте

И. К. Растегаев, В. Б. Сердобов, Р. В. Морозов

## Введение

При работе статических рыхлителей процесс рыхления имеет чётко выраженную цикличность. Цикл рыхления грунта состоит из последовательно выполняемых и повторяемых в процессе движения рыхлителя операций заглубления, установившегося рыхления и выглубления. Именно в этой последовательности рассмотрим механику процесса рыхления мерзлого грунта.

## Механика процесса рыхления

### Заглубление рыхлителя

В процессе заглубления на наконечник рыхлителя действуют активные силы  $P_i$ , вызывающие появление равных и противоположно направленных реакций  $R_i$  со стороны сезонно-мерзлого грунта (рис. 1). Активную силу рыхления обычно раскладывают на две составляющие:  $P_{01}$  – касательную и  $P_{02}$  – нормальную:  $P = -R$ ,  $P_{01} = -R_{01}$ ,  $P_{02} = -R_{02}$ . При заглублении угол рыхления составляет  $\alpha_{p3}$ , величина которого по условию облегчения операции заглубления должна быть меньше угла установившегося рыхления грунта  $\alpha_{p3} < \alpha_p$ . Глубина рыхления в этот момент еще не достигла наибольшей соответствующей процессу установившегося рыхления  $h > h_3$ . При этом угол отклонения результирующих сил рыхления и сопротивлений имеет отрицательные значения  $-\varphi_3$ , так как отклонен от горизонтали вниз (рис. 1).

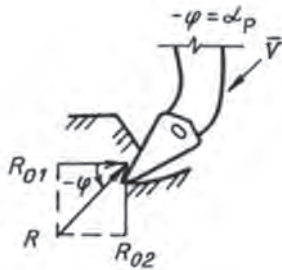


Рис. 1. Изменение сопротивлений грунта рыхлению в процессе заглубления стойки рыхлителя.

«Плавающее» состояние – часть процесса заглубления.

В некоторый момент времени, соответствующий глубине рыхления  $h_0$  ( $h_i < h_0 < h$ ), наконечник рыхлителя оказывается в «плавающем» состоянии (при этом  $R_{02} = 0$ , а  $R = R_{01}$ ) (рис. 2). Отметим, что с позиций нагрузок

на элементы металлоконструкции рыхлителя это состояние оптимально, но оно не соответствует наибольшей глубине рыхления и, следовательно, максимальной производительности рыхления.

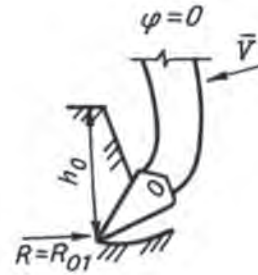


Рис. 2. Изменение сопротивлений грунта рыхлению в «плавающем» состоянии в ходе процесса заглубления стойки рыхлителя.

### Установившееся рыхление

При дальнейшем заглублении рыхлителя реакций  $R_{02}$  меняет знак и направлена вниз. Это говорит о том, что наконечник заглубляется в грунт сам без приложений усилий. Во избежание стопорения машины (из-за резкого возрастания усилий рыхления в связи с увеличивающейся глубиной рыхления) оператор рыхлителя вынужден, управляя гидросистемой, прикладывать к наконечнику усилие  $P_{02}$ , направленное вверх к поверхности грунта. Этот момент, когда глубина рыхления достигает наиболее возможной ( $h > h_{max}$ ), соответствует максимуму производительности и является расчетным для установления основных закономерностей механики процесса рыхления грунта (рис. 3).

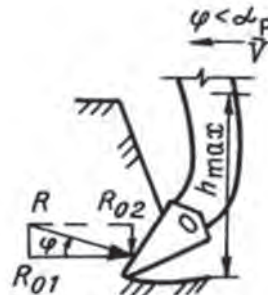


Рис. 3. Изменение сопротивлений грунта рыхлению в процессе установившегося рыхления грунта.

В данный момент угол рыхления занимает промежуточное положение между  $\alpha_{p3}$  и  $\alpha_{pв}$ , соответствующих заглублению и подъему стойки рыхлителя из грунта:  $\alpha_{p3} < \alpha_p < \alpha_{pв}$ .

#### Выглубление рыхлителя

По окончании операции рыхления стойку рыхлителя поднимают вверх при поступательном движении рыхлителя. При этом на наконечник рыхлителя со стороны грунта действуют реакции  $R_{02}$  и  $R_{01}$ . Глубина рыхления при выглублении меньше наиболее возможной  $h_g < h$ , а угол рыхления для облегчения выглубления наконечника наибольший:

$$\alpha_{pв} > \alpha_p$$

#### Выводы

Эффект «плавающего» состояния наконечника рыхлителя наблюдается со времени начала применения мощных статических рыхлителей при разработке высокопрочных и мерзлых грунтов. Ранее, до 1970-х годов, этот эффект не наблюдался, так как первые модели рыхлителей имели малую мощность, силу тяги и глубину рыхления. Поэтому в литературе [1, 2] нет формул для определения глубины «плавания»  $h_0$ . Сам эффект впервые установлен и описан в работах И.К. Растегаева [3, 4], но и в них отсутствует математическое уравнение для определения глубины «плавания». Однако приведенные в этих работах формулы позволяют после соответствующих преобразований получить зависимость для определения глубины «плавания»  $h_0$ . Ниже мы покажем что, вычислив реакцию  $R_{01}$  и зная прочностные характеристики разрабатываемого грунта и силу тяги базового тягача можно определить интересующую нас глубину «плавания» по разработанной методике.

#### Теоретическое определение глубины «плавания» наконечника

В ранних исследованиях И.К. Растегаев установил [3, 4], что характер физических явлений, происходящих при статическом рыхлении мерзлого грунта, позволяет выделить по сечению прорези три зоны: вдавливания грунта в дно прорези высотой  $h_B$ , сжатия грунта лобовой поверхностью наконечника высотой  $h_C$  и развала грунта в стороны высотой  $h_P$  (см. рис. 4).

Зона развала имеет в десятки и сотни раз большую площадь, чем зоны сжатия и вдавливания грунта. Зона развала начинается выше дна прорези на высоте  $h_C + h_B$  от дна и наклонена под некоторым углом развала к горизонту в боковую сторону. Поверхность зоны развала не имеет признаков пластического разрушения, так как при отделении грунта от массива в этой зоне преобладают

растягивающие напряжения. В зонах сжатия и вдавливания имеет место заблокированное рыхление грунта. В зоне сжатия происходит периодическое сжатие грунта перед его скалыванием (отделением) от массива. В зоне вдавливания осуществляется только сжатие и последующее вдавливание грунта в дно и боковые стенки прорези. Площади зон развала и сжатия грунта при работе переменны. Размер зоны вдавливания грунта в процессе рыхления не меняется, но по мере износа наконечника рыхлителя площадь этой зоны возрастает.

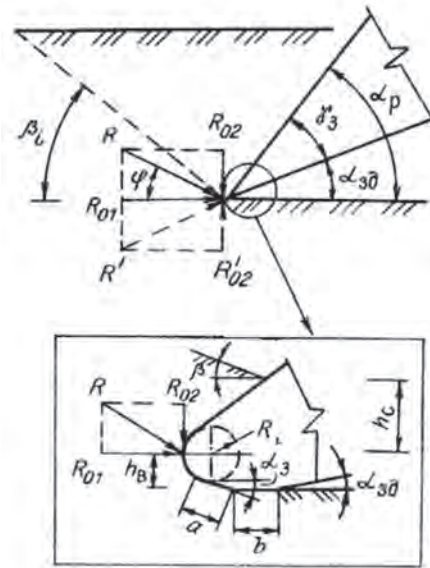


Рис. 4. Действующие сопротивления при статическом рыхлении и геометрические параметры наконечника рыхлителя.

Расчетным моментом для определения касательной составляющей общего сопротивления мерзлого грунта рыхлению ( $R_{max}$ ) является положение, когда площадь зоны сжатия грунта наибольшая. В этот момент происходит скалывание крупного элемента грунта от массива.

Глубина «плавания» наконечника рыхлителя статического действия определяется путём преобразования формулы (1) предложенной И.К. Растегаевым для определения касательной составляющей общего сопротивления мерзлого грунта рыхлению. Она равна

$$R_{01} = \frac{\sigma_p \cdot \pi \cdot (h - h_B)^2}{4 \sin^2 \beta \cdot e} + \sigma_c d, \quad (1)$$

здесь

$$d = B \cdot a \cdot (\sin \alpha_3 + f \cdot \cos \alpha_3);$$

$$e = \sin(\alpha_p + \beta) + f \cdot \cos(\alpha_p + \beta);$$

$$h_B = a \cdot \sin \alpha_3 + R \cdot \cos \alpha_3,$$



где  $\sigma_p$  – сопротивление растяжению мерзлого грунта;  $\sigma_c$  – сопротивление одноосному сжатию мерзлого грунта;  $h$  – полная глубина рыхления;  $h_B$  – высота зоны вдавливания;  $f$  – коэффициент внешнего трения грунта по стали;  $\beta$  – угол скалывания грунта;  $\alpha_p$  – угол рыхления грунта;  $\alpha_3$  – угол наклона площадки затупления к горизонтали;  $B$  – ширина наконечника;  $a$  – протяженность наклонной площадки затупления;  $R$  – радиус затупления наконечника (см. рис. 4).

В «плавающем» состоянии  $R_{02} = 0$ , а  $R = R_{01}$ . Следовательно, вычислив значение касательной составляющей реакции грунта  $R_{01}$ , и подставив его в полученную нами формулу (2), учитывая прочность разрабатываемого грунта, геометрические параметры наконечника (ширины, угла рыхления, заднего угла), угол скалывания грунта и коэффициент внешнего трения грунта по стали, получим искомое значение глубины «плавания»  $h_0$ .

$$h_0 = \sqrt{\frac{[R_{01} - \sigma_c \cdot d] \cdot 4 \sin^2 \beta \cdot e}{\sigma_p \cdot \pi}} + h_B, \quad (2)$$

где  $R_{01} = k_{nl} \cdot T = 0,6 \dots 0,8 \cdot T$ ;  
Здесь  $k_{nl}$  – коэффициент глубины «плавания»;  
 $T$  – сила тяги базового трактора.

Касательную составляющую общего сопротивления грунта  $R_{01}$  в данной формуле (2) определяем с учётом коэффициента глубины «плавания», так как в исходной формуле (1), эта составляющая учитывается для максимально возможной глубины рыхления. При работе рыхлительного оборудования на глубине «плавания» происходит снижение сопротивления грунта на величину коэффициента глубины «плавания».

Значения коэффициента глубины «плавания» определены на основании результатов полевого эксперимента по рыхлению мерзлого грунта гусеничным рыхлителем статического действия.

### Полевой эксперимент и его результаты

Для подтверждения теоретических положений исследования и полученных расчетных значений глубины «плавания»  $h_0$  был организован и проведен полевой эксперимент по рыхлению мерзлого грунта гусеничным рыхлителем статического действия в зимний период 2010 года.

На выбранной площадке (Одинцовский район Московской области) разрабатывался сезонно-мерзлый грунт V...VII категории трудности разработки при температурах воздуха от  $-5$  до  $-15^\circ \text{C}$  одним и тем же гусе-

ничным одностоечным рыхлителем тягового класса 250 кН (Komatsu D155A-1) управляемым оператором высшей квалификации. Путь рыхления составлял 25...30 м. Серия состояла из 5 опытов (про-ходов). В ходе экспериментов определялась глубина «плавания» наконечника и наибольшая на данном грунте глубина рыхления.

В момент начала заглубления наконечника в сезонно-мерзлый грунт синхронно включалась видеокамера и секундомер. При достижении наконечником глубины «плавания» машина останавливалась. Момент достижения наконечником глубины «плавания» определялся оператором рыхлительного агрегата по смене направления усилия в гидроцилиндрах «подъёма-опускания» рыхлительного оборудования. Участок грунтовой прорези, где была достигнута глубина «плавания» помечался аэрозольной краской. Затем поступательное движение машины и заглубление рыхлителя возобновлялось до момента достижения наибольшей глубины рыхления. После достижения наконечником предельной глубины рыхления, что определялось по наступлению буксования гусениц, рыхлительный агрегат вновь останавливался. Этот участок прорези также помечался краской. Затем движение машины возобновлялось и рыхлительное оборудование выглублялось. После завершения прохода рыхлительного агрегата проводилась расчистка отмеченных участков прорези (см. рис. 5).

На расчищенных участках, соответствующих глубине «плавания наконечника и максимальной глубине рыхления, с помощью геодезической рейки и измерительной рулетки были проведены замеры геометрических параметров полученной грунтовой прорези. В ходе замеров определялась полная глубина и ширина прорези по верху (в зоне развала грунта), а также ширина и глубина прорези в зонах сжатия и вдавливания грунта (см. рис. 6).

Кроме того, при помощи динамического плотномера (ударника) конструкции ДорНИИ замерялась прочность грунта (определялась его категория трудности разработки) по дну выполненной прорези. Все результаты измерений фиксировались видеокамерой.

Фрагмент профилограммы грунтовой прорези, полученной при проведении полевого эксперимента, приведен на рис. 7. Обработка полученных данных позволила сделать вывод, что глубина «плавания» наконечника рыхлителя составляет от 0,6 до 0,8 от максимально достижимой глубины рыхления.



Рис. 5. Участок расчищенной грунтовой прорези с видимыми зонами сжатия и развала мерзлого грунта.



Рис. 6. Обмер одной из контрольных точек расчищенного участка грунтовой прорези.

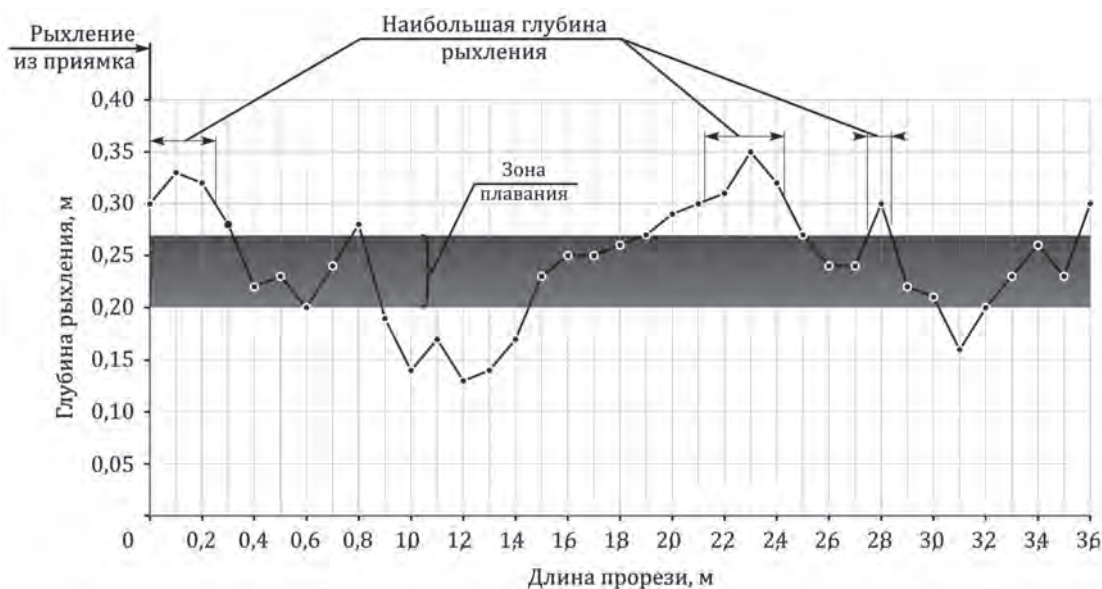


Рис. 7. Профилограмма одного из расчищенных участков грунтовой прорези.

### Заключение

В ходе исследования механики процесса рыхления мерзлого грунта был осуществлен анализ аналитических зависимостей для определения активных сил рыхления. В результате этого нами впервые установлена формула для определения рациональной глу-

бины рыхления, когда наконечник рыхлителя «плавает», то есть когда вертикальная составляющая силы сопротивления рыхлению равна нулю. Установлено, что глубина «плавания» наконечника зависит от прочности разрабатываемого грунта, геометрических параметров наконечника (ширины, угла рыхления, заднего

угла), силы сопротивления рыхлению, мощности базового тягача, угла скалывания грунта и коэффициента внешнего трения грунта по стали. Главными параметрами являются прочность разрабатываемого грунта и сила сопротивления рыхлению, зависящая от мощности базового тягача.

Экспериментальное исследование позволило установить что глубина «плавания» наконечника рыхлителя составляет 0,6...0,8 от максимально достижимой глубины рыхления разрабатываемого грунта, что составляет основу для выбора рациональных режимов работы рыхлительных агрегатов.

#### Список литературы

1. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А. Н. Зеленин. – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
2. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ / А. Н. Зеленин, В. И. Баловнев, И. П. Керов. – М.: Машиностроение, 1975. – 422 с.
3. Растегаев, И. К. Механика и теплофизика статического рыхления вечномерзлых грунтов / И. К. Растегаев. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. – 224 с.
4. Растегаев, И. К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И. К. Растегаев – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. – 351 с.

5. Сердобов, В. Б. Исследование рыхления грунтов криолитозоны / В. Б. Сердобов, И. К. Растегаев // Применение природосберегающих технологий в условиях холодных регионов : материалы IX Международного симпозиума по развитию холодных регионов 1-5 июня 2010 г., г. Якутск, Россия. – Якутск, 2010. – С. 159.

#### References

1. Zelenin, A.N. 1968. *Fundamentals of Destruction Soil by Mechanical Methods*. Moscow: Engineering industry, 376 pp. (in Russian)
2. Zelenin, A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. 1975. *Machines for Digging*. Moscow: Engineering Industry, 422 pp. (in Russian)
3. Rastegaev, I.K. 1988. *Mechanics and Thermodynamics of Static Ripping of the Permafrost Grounds*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University Press, 224 pp. (in Russian)
4. Rastegaev, I.K. 1992. *Working out Frozen Soils in Northern Construction*. Novosibirsk: "Science" Siberian bookpublishing firm, 351 pp. (in Russian)
5. Serdobov, V.B., Rastegaev, I.K. 2010. Research of Rpping of Gounds in Cyolite Zne. *The Aplication of Tehnologies for the Cnservation of Nature in Cold Re-gions. Proceedings of the Ninth International Symposium on Cold Regions Development 1-5 June 2010, Yakutsk, Russia*: 159. Yakutsk: Permafrost Institute Press (in Russian)

## Providing of concrete corrosion firmness in high-mineralized circulating waters

O.I. Matveeva<sup>1</sup>, G.D. Fedorova<sup>2</sup>, A.T. Vinokurov<sup>1</sup>, E.N. Nikolaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Yakut State Design, Scientific Research Institute of Construction»  
Russia 677000, Yakutsk, Dzerzhinsky Street, 20, ОАО "YakutPNIIS",

e-mail: matveevaoi@mail.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «М.К.Аммосов North-Eastern Federal University»  
Yakutsk, Russia

**Abstract.** In 2002 ... 2007 research studies in providing of concrete corrosion firmness in high-mineralized circulating waters in permanently frozen ground was completed by the Department of Building Materials and Constructions of ОАО "Yakut PNIIS". The purpose of research studies is working out of B20 and B30 concrete classes composition with marks on water resistance to W16 for erection of mine trunks of АК «ALROSA» underground mines (ZАО). It is established that the basic way of protection of concrete bracings at influence of brines under high hydrostatic pressure (to 3,6 MPa) in the conditions of the negative or lowered positive temperature of medium is creation of concrete of especially low permeability at which the filtration of brines through it is practically excluded. It is proved that in Metegero-Ichersky water-bearing complex zone providing especially low permeability of concrete (water resistance mark at least W10, concrete filtration factor is not above 7,5 x 10<sup>-11</sup> cm/s) corrosion processes in concrete influencing on them high-mineralized circulating waters have fading character.

**Keywords:** concrete; brine; pressure; permafrost; corrosion; firmness.

## Обеспечение коррозионной стойкости бетона в высокоминерализованных подземных грунтовых водах

О. И. Матвеева<sup>1</sup>, Г. Д. Федорова<sup>2</sup>, А. Т. Винокуров<sup>1</sup>, Е. П. Николаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства»

Россия, 677000, г. Якутск, ул. Дзержинского, 20, ОАО «ЯкутПНИИС»,

e-mail: matveevaoi@mail.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова»  
г. Якутск, Россия

**Аннотация.** В 2002–2007 гг. отделом строительных материалов и конструкций ОАО «Якут-ПНИИС» был выполнен комплекс исследований по обеспечению коррозионной стойкости бетона в высокоминерализованных подземных грунтовых водах в многолетнемерзлых грунтах. Целью исследований является разработка составов бетонов классов В20 и В30 с марками по водонепроницаемости до W16 для возведения шахтных стволов подземных рудников АК «АЛ-РОСА» (ЗАО). Установлено, что основным способом защиты бетона крепей при воздействии рассолов под высоким гидростатическим давлением (до 3,6 МПа) в условиях отрицательной или пониженной положительной температуры среды является создание бетона особо низкой проницаемости, при которой практически исключается фильтрация рассолов через него. Доказано, что в зоне метегеро-ичерского водоносного комплекса за счет обеспечения особо низкой проницаемости бетона (марка по водонепроницаемости не менее W10, коэффициент фильтрации бетона не выше 7,5 x 10<sup>-11</sup> см/с). Коррозионные процессы в бетоне при воздействии на них высокоминерализованных подземных вод носят затухающий характер.

**Ключевые слова:** бетон; рассол; напор; вечная мерзлота; коррозия; стойкость.



## Обеспечение коррозионной стойкости бетона в высокоминерализованных подземных грунтовых водах

О. И. Матвеева, Г. Д. Федорова, А. Т. Винокуров, Е. П. Николаев

### Введение

Одним из важных вопросов при возведении шахтных стволов является разработка составов бетонов для возведения монолитных бетонных крепей шахтных стволов, подземных выработок рудников, контактирующих в процессе возведения с низкотемпературными (до  $-12^{\circ}\text{C}$ ) мерзлыми грунтами, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию высокоминерализованных подземных вод с гидростатическим напором (до 3,6 МПа) и сырой нефти.

Бетонирование глубоких шахтных стволов (до 1050 м) требует применения нерасплаиваемых высокоподвижных бетонных смесей, способных твердеть при отрицательной и пониженной положительной температуре, обеспечивающих распалубочную прочность к заданному сроку, а также заданные высокие показатели долговечности бетона в конструкциях: прочность, водонепроницаемость и коррозионную стойкость.

Сложность работы состояла в том, что наряду с обеспечением технических характеристик бетона требовалось обеспечить свойства бетонных смесей, связанных с технологией подачи бетонной смеси по вертикальным трубам и твердения бетона в различных температурных режимах.

В первую очередь были изучены фактические условия производства бетонных работ, оценены качество исходных материалов, агрессивность внешней среды и уточнены требуемые по проекту показатели бетонов. На основе анализа перечисленных данных была разработана методика подбора составов спецбетонов, предназначенных для возведения крепей в зоне воздействия высокоминерализованных подземных вод (рассолов) рудников «Мир» и «Удачный» со следующими показателями бетонной смеси и бетона:

- подвижность бетонной смеси, определяемая по стандартному конусу, должна составлять 20...22 см для обеспечения ее подачи по вертикальным трубам диаметром 159 или 168 мм при бетонировании крепей шахтных стволов на глубине до 1050 м;

- требуемое время сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси при продолжительности транспортирования, укладки и уплотнения до 1 ч.;

- обеспечение снятия опалубки через 12 ч при достижении прочности бетона 0,8 МПа;

- обеспечение проектного класса бетона по прочности, марки водонепроницаемости в возрасте 28 суток

Эксплуатация шахтных столов подземных рудников «Мир», «Айхал», «Удачный» будет связана с действием высокоминерализованных подземных вод, проявляющихся как в зоне мерзлых пород, так и в подмерзлотной зоне при температуре околоствольного пространства от минус 5 до  $5^{\circ}\text{C}$ . Химический состав подземных вод по каждому руднику различен и степень их агрессивного воздействия по отношению к бетону также различна.

На руднике «Мир» бетон крепи на участке метеоро-ичерского водоносного комплекса будет испытывать воздействие подземных минерализованных хлоридно-натриевых с повышенным содержанием сульфатов вод. При этом гидростатический напор подземных вод в условиях отсутствия водопонижения может достигать 386 м (3,9 МПа).

Наибольшая соленость подземных вод отмечена на руднике «Удачный» (до 400 г/л). При этом гидростатический напор на глубине 800...869 м достигает 70-80 кгс/см<sup>2</sup> (7-8 МПа). Рассолы имеют магниезильно-хлоридное засоление и проявляют магниезильную агрессивность сильной степени.

В указанных условиях работы бетонная крепь шахтных стволов должна обеспечить несущую способность на срок службы 50 лет, а бетон иметь высокую коррозионную стойкость при одновременном действии одностороннего высокого гидростатического напора.

Подбор состава потребовал проведения большого комплекса исследований по обеспечению коррозионной стойкости бетонов в столь экстремальных условиях, так как сведения об исследованиях коррозионной стойкости в рассолах при гидростатическом давлении в условиях пониженных температур и методика таких исследований отсутствуют.

Анализ работ, посвященных по изучению вышеуказанных проблем, позволил выдвинуть рабочую гипотезу о том, что при воздействии рассолов при высоком гидравлическом давлении (до 3,6 МПа) и отрицательной или пониженной положительной температуре необходимо создать бетоны особо низкой проницаемости, которые практически должны исключить фильтрацию и капиллярный подсос рассолов через бетон. В этом случае перенос растворенных веществ в бетоны будет осуществляться лишь по механизму диффузии, что значительно замедлит скорость взаимодействия бетона с агрессивной средой. Получить такой бетон можно максимальным снижением водоцементного отношения за счет использования водоредуцирующих добавок или применения уплотняющих добавок.

Анализ проектной документации, условий производства бетонных работ, условий работы конструкции подземных сооружений, а также опубликованных данных по исследованию коррозионной стойкости бетонов в минерализованных водных средах определили цели и задачи исследований.

Целью настоящих исследований является проведение экспериментальных исследований стойкости бетона специального состава при воздействии рассолов рудников «Мир» и «Удачный», включая стойкость при гидростатическом напоре, и разработка предложений по обеспечению долговечности шахтных стволов на указанных объектах.

#### Методы исследования

Методика исследования заключалась в следующем: получив бетон с заданной непроницаемостью, следует определить его коррозионную стойкость в рассолах при различных температурных режимах, характерных для подземного рудника:

- отрицательные температуры среды (зона вечномёрзлых грунтов);
- пониженная положительная температура среды (подмерзлотная зона), а также оценке водонепроницаемости коррозионно-стойкого бетона при длительном воздействии воды с односторонним напором 1,6 и 2,5 Мпа.

Для обеспечения технологических свойств бетонной смеси и получения заданных свойств бетона конструкций в бетонную смесь вводили комплексную добавку НН + ПФМ-НЛК, состоящую из противоморозного компонента и модификатора бетона с сильнопластифицирующим и воздухововлекающим эффектом.

Для приготовления бетонов использовали местные заполнители: мытый песок, получаемый из ПГС месторождения «Песчаное» и щебень из гравия из того же месторождения (рудник «Мир»), мытый песок из ПГС месторождения «Верхний» и щебень из долеритового камня месторождения «Долеритовое». В качестве вяжущего для сравнения использованы три вида вяжущих: сульфатостойкий портландцемент марки ССПЦ400 завода «Большевик» АО «Вольскцемент», сульфатостойкий портландцемент марки ССПЦ400 и портландцемент марки ПЦ500-ДО ОАО ПО «Якутцемент» (Минералогический состав клинкеров представлены в таблице 1).

Таблица 1. Минералогический состав портландцементного клинкера

Минералогический состав клинкера	Наименование цемента		
	ССПЦ 400 (Вольский)	ССПЦ 400 (Якутский)	ПЦ 500-ДО (Якутский)
C <sub>3</sub> S	48,80	47,40	58,70
C <sub>2</sub> S	30,00	29,26	16,38
C <sub>3</sub> F	3,80	4,27	6,44
C <sub>4</sub> AF	14,00	15,41	14,35
Силикатный модуль	2,59	2,29	2,08
Глиноземный модуль	0,95	0,96	1,15
Коэффициент насыщения	0,84	0,85	0,91

Приготовление бетонной смеси производилось в лабораторной бетономешалке гравитационного действия.

Бетонные образцы формовали с виброуплотнением на лабораторном вибростоле СМЖ 539 ( $f_{\text{кол}} = 2800$  кол/мин,  $A_{\text{к}} = 0,35$  мм).

Режим твердения бетонных образцов был подобран, исходя из сроков остывания бетона передовой крепи. Для подбора состава бетона режим твердения выбран следующий режим: 3 сут (+20° С) + 25сут(-4° С).

Исследования коррозионной стойкости в рассолах бетонов с заданной проницаемостью W16 выполнялись при различных температурных режимах, характерных для подземных рудников:

- отрицательные температуры среды (зона вечномёрзлых грунтов) – минус 4±0,3° С (образцы выдерживались в подземной камере);

- пониженная положительная температура среды (подмерзлотная зона) – от 0 до +5° С (образцы выдерживались в климатической камере).

Контрольные образцы выдерживались в рассоле, воде и на воздухе при температуре помещения 18±3° С.

Образцы 4x4x16 см и 10x10x10 см выдерживались при полном погружении в среды (вода, рассол). Образцы испытывались через 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев выдерживания их в рассолах, воде и на воздухе.

Наблюдаемыми параметрами являются: плотность бетона, предел прочности бетона при сжатии и изгиб, плотность рассолов и коэффициент коррозионной стойкости бетона ( $K_c$ ).

Глубину проникновения рассолов в бетон определяли визуально, расколов образцы цилиндры по вертикали.

За величину  $K_c$  принимается отношение прочности бетона, выдержанного заданный срок в агрессивной среде, к прочности бетона, выдержанного в пресной воде.

Испытание бетонной смеси и бетона производили в соответствии ГОСТ 10181-2000, ГОСТ 10180-90, ГОСТ 12730.1-78, ГОСТ 12730.5-84 и ГОСТ 27677-88.

### Результаты и обсуждение

Исследования коррозионной стойкости бетонов в минерализованных подземных водах метеоро-ичерского водоносного комплекса показали, что:

- исследуемые рассолы в условиях полного погружения в них образцов нейтральны по отношению к бетону на сульфатостойком цементе и заполнителях, применяемых для приготовления бетонов на Мирнинском КСМ;

- при действии гидростатического напора (при напоре воды 100...300 м или 10...30 атм) возможно развитие процессов выщелачивания  $Ca(OH)_2$  и выноса его из бетона;

- экспериментально показано, что отрицательные температуры (до -4° С) оказывают влияние на процессы выщелачивания  $Ca(OH)_2$  в присутствии хлоридов натрия, магния.

Полученные результаты согласуются ранее полученными данными при исследовании коррозионной стойкости бетонов свайных фундаментов при воздействии засоленных надмерзлотных вод, что при пониженной положительной температуре воды среды скорость химической реакции между агрессивными компонентами и минералами бетона

снижается, а при отрицательной температуре среды сульфатная коррозия прекращается [1-3]. Кроме того, в условиях отсутствия смены воды среды сульфатная коррозия носит затухающий характер.

Исследованиями установлена большая эффективность бетона с добавкой ПФМ-НЛК, которая обладает большей стойкостью к выщелачиванию по сравнению с бетоном с добавкой С-3. Это объясняется созданием оптимальной структуры бетона с условно замкнутой пористостью при применении модификатора ПФМ-НЛК. Доказано, что именно этот технологический прием является основным способом защиты бетона в зоне метеоро-ичерского водоносного комплекса за счет обеспечения особо низкой проницаемости бетона (марка по водонепроницаемости не менее W10, коэффициент фильтрации бетона не выше  $7,5 \times 10^{-11}$  см/с).

Бетоны, изготовленные на сульфатостойких цементах производства Вольского, Якутского цементных заводов и на Якутском портландцементе, показали одинаковую стойкость бетонов. Кроме того, было определено, что бетон на якутском портландцементе обладал наибольшей гидравлической активностью и по коррозионной стойкости не уступал бетонам на сульфатостойких цементах.

Расчет глубины повреждения бетонов с плотностью, соответствующей марке бетона по водонепроницаемости W16 показал, что за период службы подземного сооружения бетон может повредиться на глубину не более 1 см.

В 2004...2005 гг. выполнены уникальные испытания бетона на коррозионную стойкость при действии на него минерализованных подземных вод (рассола рудника «Удачный») с высоким гидростатическим напором.

Исследование проницаемости спецбетона при напоре жидких сред выполнялись на стандартных образцах диаметром 150 мм и высотой 150 мм, изготовленных из выбранного состава бетона В30 П5 W16 (вольский цемент) и твердевших по установленному режиму.

Часть образцов выдерживалась при гидростатическом давлении воды 16 атм (1,6 МПа) в течение 30 дней на установке УВФ=6/03. Другая часть образцов испытана при давлении воды 25 атм (2,5 МПа) на специально собранной установке с компрессорной установкой К-33 до 25 атм. Повышение давления воды выполнялось в соответствии с ГОСТ 12730.5-84. Продолжительность испытания –

30 дней. После прекращения испытаний образцы раскалывались, измерялась глубина проникновения воды в бетон. На основании полученных данных рассчитывалась ориентировочная глубина проникновения подземных вод в бетон или глубина перерождения бетона за проектный срок службы сооружения.

Экспериментально показано, что при одностороннем воздействии воды при гидростатическом давлении до 1,6 и 2,5 МПа в течении одного месяца бетонные образцы выдержали испытание, глубина проникновения влаги в бетон составляла не более 8 мм. Расчетами было показано, что возможная глубина перерождения бетона за проектный срок службы сооружения составит 19,5 см.

Учитывая глубину перерождения бетона при действии одностороннего действия одностороннего действия напорных подземных вод, а также образование проницаемых швов между ярусами бетонирования крепей шахтных стволов, было рекомендовано при строительстве осуществлять обязательные мероприятия по водопонижению и для снижения величины гидростатического напора.

При отсутствии мероприятий по понижению подземных вод или противофильтрационной завесы на бетон шахтных стволов будут действовать подземные воды с высоким напором до 800-869 м и определяющую роль в коррозии будут иметь процессы фильтрации агрессивной среды через бетон. В указанных условиях были определены предельно-допустимые коэффициенты проницаемости или коэффициенты фильтрации бетона на основании элементарных и несколько упрощенных расчетов баланса веществ, вносимых в бетон и выносимых из него. Марки бетона по водонепроницаемости и ориентировочные значения соответствующих им коэффициентов фильтрации приведены в таблице 2. Соотношение получено экстраполяцией соответствующих значений, установленных в работе Ю. А. Саввиной [4].

Сопоставляя полученный расчетом результат ( $K_{\phi} = 3,82 \times 10^{-12}$  см/с) с табличными данными, получаем, что бетон должен иметь марку по водонепроницаемости W16.

Таблица 2. Соотношение водонепроницаемости и коэффициента фильтрации бетонов

Марка по водонепроницаемости	W8	W10	W12	W16	W20
Коэффициент фильтрации, см/с	$1,1 \times 10^{-10}$	$6,1 \times 10^{-11}$	$2,25 \times 10^{-11}$	$3,3 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-13}$

## Заключение

Экспериментальными работами по подбору составов показано, что обеспечение требуемых показателей бетона и технологических свойств бетонной смеси, подаваемого в ствол по вертикальной трубе самотеком, возможно с помощью комплексной добавки 2%НН + 0,7% ПФМ-НЛК.

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по приготовлению и применению бетонов с химическими добавками при возведении крепи шахтных стволов подземных рудников «Мир» и «Удачный».

Технология приготовления бетонов с комплексной добавкой НН + ПФМ-НЛК освоена Мирнинским КСМ, технология бетонирования крепей с применением бетонов с комплексной добавкой НН + ПФМ-НЛК внедрены при возведении шахтных стволов подземных рудников «Мир» и «Удачный».

## Благодарности

Исследования коррозии бетонов для возведения шахтных стволов подземных рудников «Мир» и «Удачный» были выполнены по заданию института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ЗАО), за что авторы статьи выражают благодарность за доверие и предоставленную возможность выполнения научно-исследовательской работы.

## Список литературы

1. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона. Методы его защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов и др. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
2. Иванов, Ф. М. Коррозионные процессы и стойкости бетона в агрессивных средах: автореферат дис. ... д-ра. техн. наук / Ф. М. Иванов. – М., 1968. – 21с.
3. Матвеева, О. И. Бетоны, стойкие в агрессивных мерзлотно-грунтовых условиях (на примере Центральной Якутии): дис. ... канд. техн. наук / О. И. Матвеева. – М.: НИИЖБ, 1987. – 210 с.
4. Саввина, Ю. А. О процессе фильтрации воды и газа через бетон разной плотности / Ю. А. Саввина // Стойкость бетонов на порландцементе в агрессивных средах: сб. НИИЖБ. – М. : Стройиздат. – 1977. – С. 106–117.

## References

1. Moskvin, V. M., Ivanov, F. M. etc. 1980. Concrete and Ferro-concrete Corrosion: Methods of Protection. Moscow: Stroyizdat, 536 p. (in Russian)
2. Ivanov, F.M. 1968. Corrosion Processes and Resistance of Concrete in Aggressive Environments. Doctor of Tech. Sci.'s Diss. Abstract. Moscow, 21 pp. (in Russian)



3. Matveeva, O. I. 1987. Concretes Resistant to Aggressive Permafrost Conditions (on the Central Yakutia Example). Cand.Tech.Sci.'s Diss. Moscow: NIIZB,-210 p. (in Russian)

4. Savvina, Y. A. 1977. On water and gas filtration through concrete of different density. In: NIIZB Collected Papers, Resistance of Portland Cement Concrete in Aggressive Media. Moscow: Stroyizdat, p. 106-117. (in Russian)

# Research on the thermal stability of frozen soil embankment in the Chaidar-Muli Railway

Xianfu DONG<sup>1</sup>, Liping SUN<sup>1</sup>, Ji CHEN<sup>2</sup>, Yu SHENG<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Administration Bureau of Qinghai Local Railway  
Wusi Street No.72, Xining, China, 810008, e-mail: dongxianfu100@sina.com  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, Lanzhou, China

**Abstract.** The Chaidar-muli Railway (abbreviated as Chaimu Railway) is located in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau, where is covered widely by the permafrost in the mid-latitude area. The railway is 142.04 km long, about 80 km in the permafrost and 70 km in the wet land. The permafrost along the railway is characterized by swampy and warm, which leads to the poor Engineering geologic conditions of the transportation line. That the extending direction of the railway is nearly southeast-northwest causes its roadbed experience the yin-yang slope problems. To improve the stability of frozen soil roadbed, proactive cooling measures were adopted in a large proportion of the roadbed with permafrost, in which about 20 km railway was equipped with heat pipe, about 53 km railway equipped with convection embankment. At the same time, different design parameter was adopted in the sunny and shady side slopes in the railway. Observation data in the experimental section with heat pipe shows, heat pipe measures can effectively cool the frozen soil roadbed, substantially reduce the settlement and successfully solve the yin-yang slope problem of the railway subgrade in swampy warm permafrost. For the convection embankment, crushed stone only can effectively cool down the shadow part in the warm permafrost. In the lower temperature area, it can alleviate the adverse effect resulting from yin-yang slope.

**Keywords:** heat pipe; convection embankment; mid-latitude and swampy warm Permafrost; thermal stability; frozen soil roadbed; the Chaimu Railway.

## Изучение устойчивости земляного полотна железной дороги Чайдэр – Мули на многолетнемерзлых грунтах

Сяньфу ДУН<sup>1</sup>, Липин СУНЬ<sup>1</sup>, Цзи ЧЭНЬ<sup>2</sup>, Юй ШЭН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Управление Цинхайской железной дороги  
Китай, 810008, г. Синин, ул. Усы, д. 72, e-mail: dongxianfu100@sina.com  
<sup>2</sup>Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах Института инженерных и экологических исследований холодных и арктических регионов АН КНР, г. Ланьчжоу, Китай

**Аннотация.** Железная дорога Чайдэр – Мули находится в северо-восточной части Цинхай-Тибетского нагорья. Этот среднеширотный регион характеризуется широким распространением многолетнемерзлых пород. Общая протяженность железной дороги составляет 142,04 км, из которых 80 км проходит по территории с многолетнемерзлыми грунтами, а 70 км по заболоченной местности. Трасса железнодорожной линии характеризуется сложными инженерно-геокриологическими условиями, связанными с высокой температурой мерзлых грунтов и заболоченностью поверхности. Кроме того, железная дорога идет по направлению с юго-востока на северо-запад, что создает проблемы, связанные с различной освещенностью откосов. Для обеспечения стабильности земляного полотна на участке развития многолетнемерзлых пород были предусмотрены мероприятия по их сохранению: около 20 км пути были оборудованы термосифонами, а на участке длиной 53 км для охлаждения насыпи производилась отсыпка крупнообломочным материалом основания и откосов. При этом на солнечной и теневой сторонах насыпи были приняты различные параметры термосифонов и крупнообломочной отсыпки. Результаты наблюдений на экспериментальном участке с термосифонами показали, что в условиях развития высокотемпературных увлажненных мерзлых грунтов они способны обеспечить понижение температуры в основании земляного полотна, существенно уменьшить развитие осадков и эффективно решить проблему, связанную с разной освещенностью склонов. Что касается крупнообломочной отсыпки, в условиях высокотемпературных мерзлых грунтов она способна обеспечить охлаждение лишь на теневой стороне насыпи. На участках развития низкотемпературных мерзлых грунтов этот способ позволяет смягчить негативные последствия различного прогрева откосов солнечной радиацией.

**Ключевые слова:** термосифон; насыпь из крупнообломочных грунтов; высокотемпературная криолитозона; заболоченность; устойчивость температурного режима; мерзлое основание земляного полотна; железная дорога Чайдэр – Мули.

# Research on the thermal stability of frozen soil embankment in the Chaidar-Muli Railway

Xianfu DONG, Liping SUN, Ji CHEN, Yu SHENG

## Introduction

The Chaimu Railway, which is 142.04 km long, winds along the Datong River in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau. The Railway ranges in latitude  $N37.614^{\circ}$  -  $N38.145^{\circ}$  and longitude  $E99.167^{\circ}$  -  $E100.406^{\circ}$ , and extends administratively across the Gangcha county and Tianjun county of Qinghai province. Topographically, it stretches in the Datong River valley, the south-central Qilian Mountains. It links the Chaidar coal branch of QTR in the south and extends to the Muli basin in the north, and acts as an important passageway to transport the coking coal. The elevation along the railway ranges from 3600 m to 4100 m. The whole part of the railway is located in the isolated permafrost of Qilian Mountain.

Along the railway, wet land is distributed everywhere and ice content of permafrost is always very rich. Owing to the large variation of elevation, the mean annual ground temperature shows a little fluctuation. However, MAGT is lower than  $1^{\circ}\text{C}$  in the most part. Warm permafrost dominates the area. Under the condition of the extremely adverse engineering geological conditions, the stability of the Chaimu Railway is faced with severe challenges. Above all, the construction of railway subgrade changes the thermal transfer between the earth surface and atmosphere. Wet land surface was replaced by arid slope surface of embankment. Latent heat exchange was reduced significantly. The previous thermal balance was break. Much more heat enters the embankment and the underlying frozen soil. The permafrost table descends and the thawing settlement occurs. In the next place, the Chaimu Railway extends from the southeast to the northwest. The problem related with the slope orientation that the railway is faced with is more severely than the Qinghai-Tibet Railway.

For the purpose of improving the stability of frozen soil subgrade, a many of proactive cooling measures, including heat pipe, crushed stone subgrade and protection berm, crushed stone and sod slope, etc, were adopted widely in the construction of the railway. A total of 20391 heat pipes with an accumulated length of 140,000 m were installed, the protected railway was nearly 20 km long. About 53 km embankment was equipped with crushed stone.

Heat pipe (the heat pipe), a heat exchange

installation based on convection, could absorb the heat in the evaporation part and release it in the condensing part. As a result, the adjacent zone to the evaporation section is cooled. Foundations related with cold regions engineering often need to be cooled. Heat pipe is one of the measures to let the idea come true. Usually, heat pipes were inserted into the roadbed or other groundwork to be cooled. In the winter, the heat pipe works and the soil is cooled. In the summer, it almost always hibernates. Just one year cycle is concerned, heat pipe usually acts as a cooler (Hayley et al., 1983; Esch, 1988). Heat pipes can be divided into two types of open- and closed-style with respect to the structure, monophasic with only liquid and two-phase with liquid and gas respected to the working medium state. Two-phase closed heat pipe is applied widely in the practice of frozen soil engineering because of its high efficiency, simple and convenient construction (Ma Wei et al., 2002). In the year of 2005, 30-km low embankment was equipped with heat pipes in order to strengthen the subgrade of Qinghai-Tibet Railway (QTR). Subsequent observation study demonstrated its positive effect. Permafrost table was raised by more than 1.5 m, frozen heave and thaw settlement were also confined to the admissible value after heat pipe was applied (Pan Weidong et al., 2003; Ran Li et al., 2004).

For the convection embankment, the capacity of heat transfer in the crushed stone layer not only depends on thermal conductivity of the stone but also the amount and continuity of pores among the stones. Thermal conductivity of the stone is generally less than  $3 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Only under the condition of calm air in the crushed stone, it can play decisive role. Once the convection occurs, the effective thermal conductivity of the crushed stone layer will depend more on the velocity and density of air. However, the convection of air depends on the gravity and the difference of air density. The direction of heat flow is fixed. The heat flow of air convection only takes place under the condition that the lower part is warm than the upper part.

In 1960s, in order to deal with the thawing problem in the cutting sections, crushed stone convection embankment with 1.2 m thick and 5~8cm in diameter was adopted. Four years after the experiment section finished, the embankment and the side slope were stable. The

soil temperature below the crushed stone layer was 0.43 lower than the natural field in the warm season and 7.2°C in the cold season. The thermal conductivity in the winter is 11 times more than that in the summer (He Guisheng et al., 2000). In 1973, experiment convection embankment with crushed stone was constructed in the Reshui County in the Qilian Mountains. A year data showed that MAGT below the central part of convection embankment was far lower than that in the same part of the clay soil embankment. And also, the former artificial permafrost table is shallower than the latter (Cheng Guodong et al., 1981). In the west Heilongjiang Province, crushed stone convection embankment with 3.2 m thick was constructed in the wet peat land. MAGT below the embankment was generally 0.9~1.7°C lower than that in the neighboring natural site (Yang Hairong, 1985). Qinghai-Tibet Railway was equipped with 120-km crushed stone convection embankment. The measure reduced the absorbed heat, improved the thermal state of frozen soil and effectively suppressed the thawing settlement (Cao Yuanbing, 2008).

Although heat pipe and crushed stone are both important ways to exchange heat in the cold regions engineering, they has their own shortcomings. Their effect and efficiency mainly depend on the climate, properties of soil, etc. For heat pipe, air temperature, wind speed and frozen period often play decisive role in determining the size of the freezing radius (Haynes et al., 1988; Zarling et al., 1990). Lower temperature is more beneficial. Thermal conductivity and the temperature difference between the evaporating part and condensing part are closely related with the wind speed. Laboratory test shows that the heat conductivity of heat pipe has exponential relation with wind speed.

For the convection embankment with crushed stone, sand and snow may accumulate in the slope and weaken its cooling effect. The mechanism experiment of crushed stone convection embankment verified that the inner temperature of subgrade declined fast in the open embankment than in the closed one (Zhang Mingyi et al., 2005). Additionally, the diameter of crushed stone also can affect its cooling effect (Goering et al., 2000, 2003). Although the cooling effect of crushed stone was demonstrated by a lot of engineering practice and research, its applicability of this measure is limited. Study on the crushed stone convection embankment of the Qinghai-Tibet Railway showed that the thermal stability of subgrade was going worse and worse in some sections (Wu Qingbai et al, 2005). For the Chaimu Railway, crushed stone convection

embankment was mainly adopted in the warm permafrost area.

The QTR and the Chaimu Railway are both located in the mid-latitude area, but the development conditions of permafrost are greatly different. The arid climate and the relatively dry earth surface along the QTR leads to the extremely less latent heat exchange in comparison with the sensible heat exchange. When the roadbed is constructed, sensible heat exchange between roadbed and atmosphere still dominated the main heat exchange process. Temperature rise on the subgrade surface and slope surface equals to that on the natural ground surface. In this way, subgrade of QTR only exerts a little influence on the underlying permafrost regime. Permafrost distribution along the Chaimu Railway, however, is dominated by local factors, such as spring snow cover, paludification on the surface, etc. Thus, water on the ground surface intensively affects the energy balance. As construction of roadbed alters the water content of the surface soil, latent heat exchange between subgrade surface, slope surface and atmosphere will be reduced suddenly. Temperature rise becomes more remarkable than before. Accordingly, the simple migration of the experiences on heat pipe measure from the QTR to the Chaimu Railway could not meet the practical demands completely.

### **Observation Field**

According to the introduction of frozen soil engineering geological conditions, warm and cold permafrost are both distributed along the Chaimu Railway. Different schemes were applied in the warm and cold permafrost because of the different cooling efficiency of heat pipe and crushed stone convection embankment.

Owing to the high cooling efficiency of heat pipe, the experimental field about heat pipe (N38.062°, E99.634°, 3777 m a.s.l.) was set up between the section of Dk99+000 and Dk99+500 in the warm permafrost, which has an open terrain and gentle slope, less than 5°. Owing to the poor drainage and the relatively rich rainfall, water accumulation is serious in the summer, which contributes to the paludification of the ground surface. According to the drilling survey, ice content near the permafrost table is more than 20%, and the mean annual ground temperature is about -0.9°C. Data from the weather station near this field showed that mean annual air temperature is -4.66°C, the maximum air temperature 16.99°C, the minimum air temperature -39.37°C, the average wind speed 2.29 m/s, the maximum wind speed 13.74 m/s. Cold climates and strong wind are both beneficial to the realization of heat pipe's cooling effect.



Owing to the unideal effect of crushed stone convection embankment in the warm permafrost, there are four observation sections of crushed stone convection embankment along the railway. These sections are set up in the different permafrost zone ranging from warm permafrost to the cold permafrost. But the ice content is all rich in the four fields. In the field of the north slope of Datong mountain, vegetation grow well, slope gradient less than 5°, MAGT of the section of Dk40+000 about -0.65°C, natural permafrost table around 1.0 m, ice content very rich, the strike of the railway is northwest (320°). In the field of the north bank of Datong river, the terrain and geomorphology are similar with the section of Dk40+000. In the section of Dk74+000, MAGT is -0.55°C, ice content about 15%, the railway extending towards 300°. In the field of Xuzhigequ, slope gradient is about 7°, vegetation coverage more than 90%, MAGT about -1.3°C, the railway extending towards 345°. The last field was located in the section between Dk123+150 and Dk123+250,

where the MAGT is about -1.1°C, and the railway extends towards 260°. Along the railway, the annual snow accumulation is less than 50 cm, and the sand is scarce. Snow and sand won't weaken the cooling effect of crushed stone.

Construction of the field began in October, 2007 and finished in May, 2008. Monitoring of the ground temperatures were carried out at two boreholes with 8-m depth at the slope bottom, another two at the road shoulder with depth ranging in 11-15 m, one in the surface of the subgrade and its slope, and a natural borehole from the slope bottom (Fig.1-a,b). Temperature probes are thermistors with high precision and reliability, produced by the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering. The data loggers, provided by the Shijiazhuang Railway Institute, have been proved to work normally under the extremely low temperatures in the QTR. Fig. 1, c and d are the pictures of embankment with heat pipes and crushed stones.

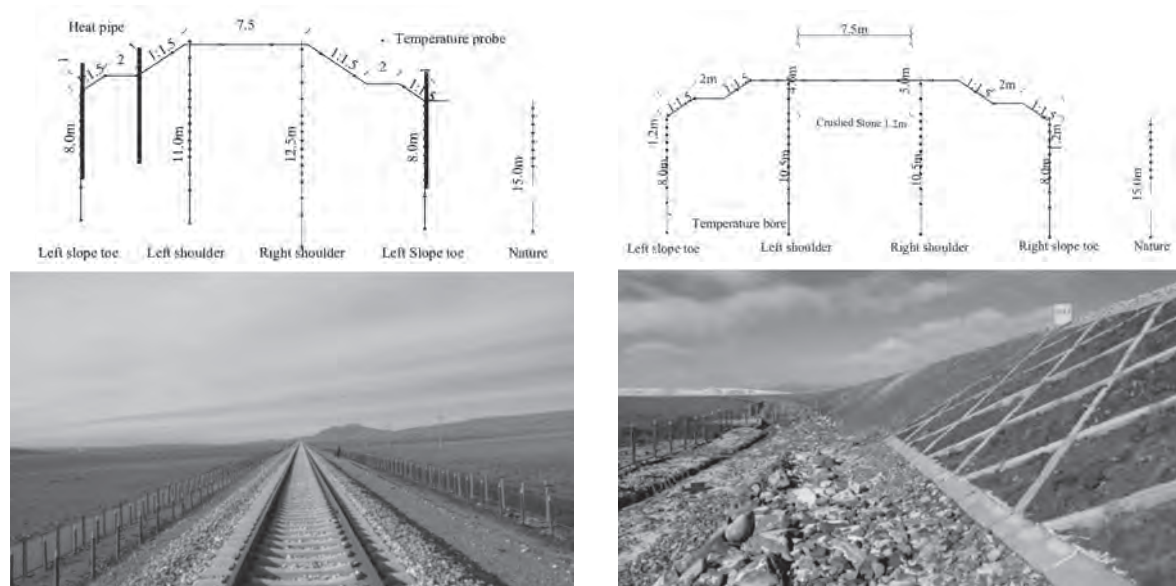


Fig. 1. Sketch map of embankment with heat pipes and crushed stones.

### Introduction of the Cooling Measures

Two-phase closed heat pipe with working medium of NH<sub>3</sub> is only type of heat pipe adopted in the Chaimu Railway. Top part of heat pipe is equipped with fins, which can strengthen the heat exchange between the condensing section and neighboring air. The pipe's diameter is 83 mm, wall thickness 5 mm, length 7 m. Outside of its evaporation and insulation sections have no fins. Its condensing section is 1.5-m long, thermal insulation section 3.0 m, evaporation section 2.5 m. 1.5-m condensing section is erected above the ground surface, the other part buried in the ground.

Convection measures adopted by the Chaimu Railway could be divided into two types: (1) crushed stone layer was only laid inside the embankment; (2) crushed stone layer was only laid inside and outside the embankment. Convection berm was arranged in the two sides of the embankment slope. Crushed stone layer was 1.2-m thick and the convection berm is 2.0-m wide. The convection layer was directly laid on the original ground surface. Schist and gneiss were the main types of crushed stone. The diameters of stone ranged from 5 cm to 30 cm.

## Results and Discussion

More than two years' observed data, from December, 2007 to May, 2010, were collected to be used to evaluate the cooling effect of heat pipe and crushed stone convection embankment in the Chaimu Railway.

### Cooling effect of heat pipe

For a subgrade with the strike of south-north, its both side slopes could receive equal amounts of solar radiation and the temperature regime is also symmetrical in the roadbed and its underlying frozen soil. Fewer damages would be resulted in by this strike. The Chaimu Railway,

however, has a southeast-northwestern strike, and inevitably faces the Yin-yang-slope-associated problems. In order to express the difference of the side slopes quantitatively, an index, Yin-yang Value, is introduced here. Yin-yang Value is defined as the difference in the angles between the strike of subgrade and south-north direction. For example,  $0^\circ$  represents that there's no difference between the both side slopes, and  $90^\circ$  means that the difference is the most serious. Since all the three observing sections extend  $325^\circ$ , all the Yin-yang Values are  $35^\circ$ . Slope orientation problems will occur in some extent if special measures are not adopted.

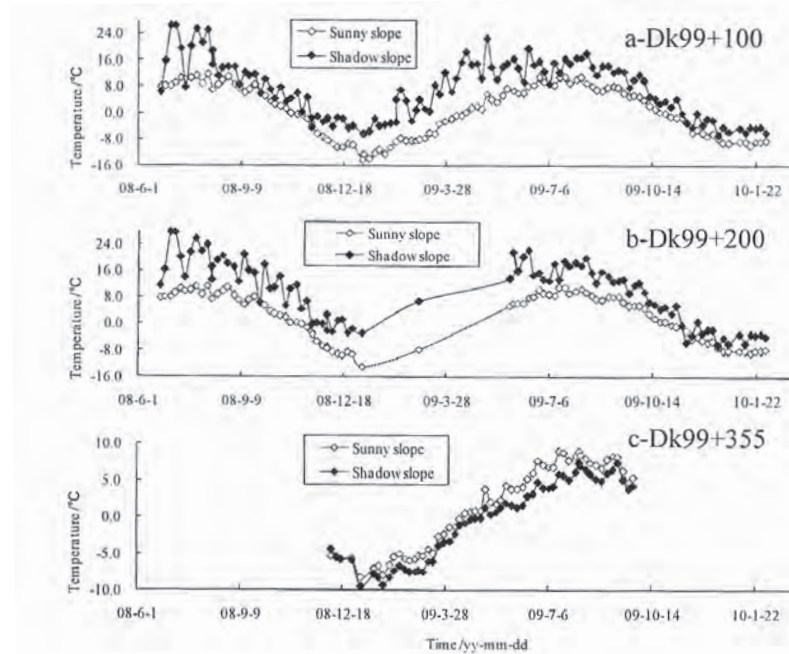


Fig. 2. Changes of slope surface temperature with the time.

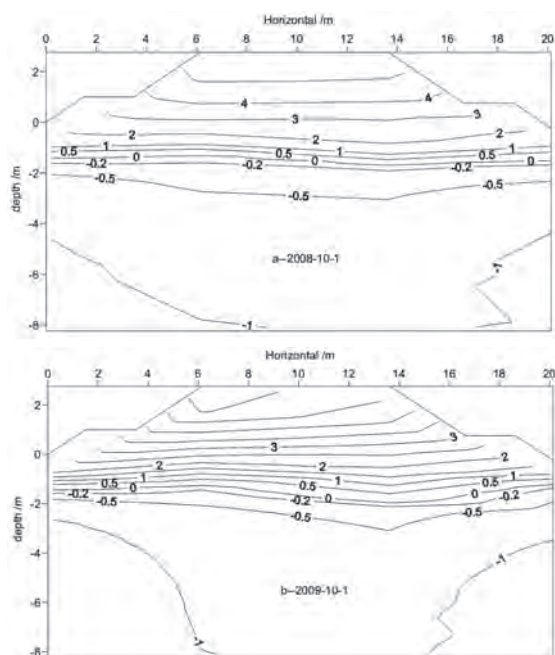


Fig. 3. Typical temperature regime in the section of Dk99+200.

Fig. 2 gives the temperature changes on the slope surface in the section of Dk99+100, Dk99+200 and Dk99+355. Except that the section of Dk99+355 without any measures agree with the common sense, observation result of the section of Dk99+100 and Dk99+200 contradicts the past conclusion that slope surface temperatures in the sunny side are almost always higher than those in the shadow side. Evidently, the anomalous phenomenon proved the cooling effect of the heat pipes as two rows of heat pipes in the sunny slope released more heat than the single row in the shadow side.

The maximum thawing depth occurred on around October 1st. Fig. 3 indicates the temperature regime of Dk99+200 on the same day, October 1st, in 2008 and 2009. Comparing the two temperature regime, some conclusions

can be drawn. (1) Temperature curves are flat in the subgrade, active layer and the area adjacent to the permafrost table. Adverse railway strike did not lead to the unsymmetrical thermal regime. (2) Compared with 2008, 0°C isotherm in 2009 rose in the left shoulder, declined in the right shoulder and remained stable in the other parts. (3) Permafrost table of two slope bottom bores and two shoulder bores are all shallower than the natural one (2.1 m). (4) The -1°C and -0.5°C isotherm rose a lot from 2008 to 2009, which means that the temperature of roadbed declined and the stability of subgrade was improved.

*Cooling effect of the convection embankment in the warm permafrost*

Owing to the failure of the should bores in the construction period of 2008, Fig.4 showed the freezing-thawing curves in the section of Dk39+800, Dk40+000 and Dk74+000 from 2007 to 2009. The section of Dk39+800 is a contrast section, and the other two sections are convection embankment. According the investigation of the subgrade problem in the Qinghai-Tibet Railway and Highway, decline of the permafrost table often result in the longitudinal cracks.

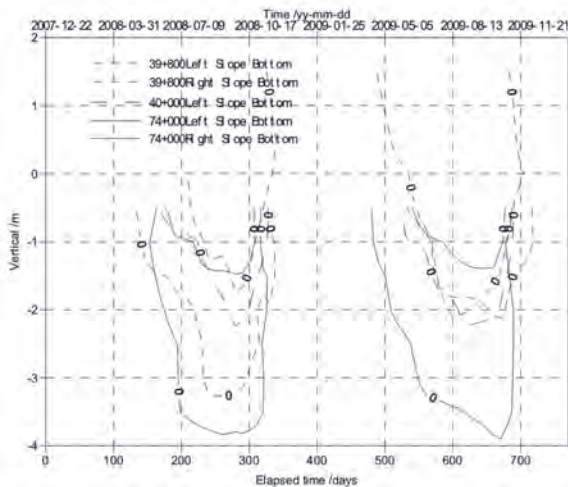


Fig. 4. Freezing-thawing curves of slope bottom in the warm permafrost.

From 2008 to 2009, the permafrost table of right slope bottom in the section of Dk74+000 is shallower than that in the contrast section. And there's a trend that the permafrost table was raised by 9cm from 2008 to 2009. In the contrast section, it declined by 30cm in the same period.

The changes of the permafrost table in

the left slope bottom were out of the previous estimation. In 2008, the permafrost table in the section of Dk39+800 was only shallower than that in the section of Dk74+000. But in 2009, it was the shallowest among the three sections. The phenomenon may be related with the following three factors. (1) In May, 2008, water accumulated by about 1.0 m deep in the left bottom of Dk39+800 because of an excavation. On the one hand, the pool increased the thawing depth in 2008. On the other hand, it reduced the thawing depth in 2009 because of the huge thermal capacity and higher thermal conductivity in the frozen state. (2) Left bottom temperature bore in the convection embankment were arranged in the outside of the berm. So the crushed stone exert less influence on this temperature bore. (3) The natural ground surface is more arid in the section of Dk74+000 than that in the contrast section. (4) There's a construction road in the left side of Dk74+000. The road would exert more thermal disturbance.

*Cooling effect of the convection embankment in the cold permafrost*

According to the "Temporary Regulations about the Permafrost Design of Qinghai-Tibet Railway", the temperature of cold permafrost is between -1.0~-2.0°C. The section of Dk94+900 was located in the cold permafrost. Fig.5 is the temperature field of the section at the end of the August in 2008 and 2009.

In this figure, the following conclusions can be drawn. (1) In the first and second year after the construction finished, the temperature field was symmetric. (2) 0°C isothermal displays a convex profile inside the embankment and the active layer. The permafrost table was raised much more in the center, should of the embankment than that in the slope bottom. In 2008, the level of 0°C isothermal in the center was 1.0m higher than that in the left bottom, 0.6m than that in the right bottom. In 2009, the differences were 1.0m and 0.2m. (3) Under the original permafrost table, 0°C isothermal displays a saucer-shape. The soil temperature had a trend of rise. Compared with 2009, -0.5°C and -1.0°C isothermal fall down a little.

The above analysis demonstrated that convection embankment could raise the artificial permafrost table remarkably, reduce effectively the slope orientation problem in the cold permafrost. However, the ground temperature rose a little under the active layer because of the disturbance of refilling soil and construction.



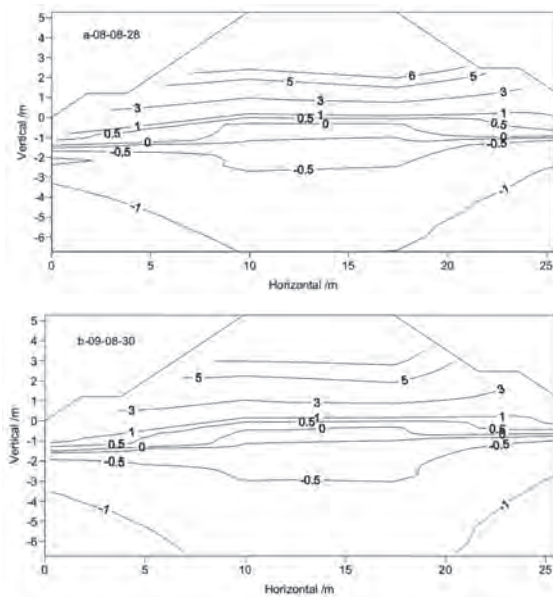


Fig. 5. Temperature regime on the typical day at the section of Dk94+900.

### Conclusions

Under the influence of local climate and the adverse engineering geologic conditions because of the swamp, warm permafrost and Yin-yang slope problems in mid-latitude area, cooling effect of the both measures in the Chaimu Railway were different in the different permafrost zone. In the cold permafrost, heat pipe and crushed stone convection embankment could effectively eliminate the temperature difference between its both side slopes, and promote a symmetric thermal regime. In the warm permafrost, cooling effect of heat pipe was satisfied. The crushed stone convection embankment only cooled down the shadow part. In the sunny part, the permafrost table descended a lot.

### References

1. Cao Yuanbing. 2008. Research on the Permafrost Structure of protection Measures along Qinghai-Tilbet Railway. *Journal of Railway Engineering Society* (8): 10-14. (in Chinese)
2. Cheng Guodong, Tong Boliang, Luo Xuebo. 1981. Two problems in the construction of embankment with thick ground ice. *Journal of Glaciology and Geocryology* 3(2): 6-12. (in Chinese)
3. Esch, D.C. 1988 Roadway embankments on warm permafrost problems and remedial treatments. *Proceedings of the 5th Inter. Conference on Permafrost, Trondheim, Norway, August 1988*: 1223-1228.

4. Goering, D.J., Instanes, A., Knudsen, S. 2000. Convective heat transfer in embankment ballast. *Ground Freezing 2000*, Rotterdam: Balkema.
5. Goering, D.J. 2003. Passively cooled railway embankments for use in permafrost area. *Journal of Cold Regions Engineering* 17(3):119 – 133.
6. Hayley, D.W., Roggensack, W.D., Jubien, W.E., and Johnson, P.V. 1983. Stabilization of sinkholes on the Hudson Bay Railway. *Proceedings of the 4th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, July 17-22*: 468-473.
7. Haynes, F.D. and Zarling, J.P. 1988. Heat transfer performance of commercial thermosyphons with inclined evaporator sections. *Proceedings of the Seventh International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 4: 275-280.
8. He Guisheng, Ding Jingfang, Li Yongqiang. 2000. Thermal properties of crushed stones and its application. *Journal of Glaciology and Geocryology* 22 (app): 33-37. (in Chinese)
9. Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qing-bai. 2002. Study on the methods of active cooling foundation in permafrost area. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24: 579. (in Chinese)
10. Pan Weidong, Zhao Suchang, Xu Weize et al. 2003. Application study of heat pipe adopted to stabilize the frozen soil roadbed. *Journal of Glaciology and Geocryology* 25: 433. (in Chinese)
11. Ran Li, Xue Xingong, Bao Liming. 2004. Application and technical characteristics of thermal pipe subgrade in Qinghai-Tibet Railway design. *Proceedings of the 6th International Symposium on Permafrost Engineering, Lanzhou, China, September 5-7, 2004*: 151. (in Chinese)
12. Wu Qingbai, Zhao Shiyun, Ma Wei, et al. 2005. Monitoring analysis on the cooling effect in the crushed stone embankment of Qinghai-Tibet Railway. *Journal of Geotechnical Engineering* 27(12): 1386-1390. (in Chinese)
13. Yang Hairong. 1985. Measures to prevent thawing settlement of embankment and improve its stability in the permafrost area. *Journal of Glaciology and Geocryology* 7(1): 83-88. (in Chinese)
14. Zarling, J.P., Haynes, F.D. and Gagnon, J.J. 1990. Thermal stabilization of permafrost with thermosyphons. *ASME 9th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, vol IV: 323-328.
15. Zhang Mingyi, La Yuanming, et al. 2005. Control test study on the cooling effect and mechanism between open and closed crushed stone embankment. *Journal of Rock Mechanics and Engineering* 24(15): 2671-2677. (in Chinese)



## Radiation effect analysis of the awning measure on the embankment slope field test in cold regions

Wenjief FENG, Wei MA, Zhizhong SUN, Guoyu LI, Wenbing YU, Jianfeng ZHENG

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China, 730000, e-mail: wenjief@lzb.ac.cn

**Abstract.** Because the higher elevation and better atmospheric transparency, the Qinghai-Tibet plateau have stronger radiation than other regions, which can make the ground surface temperature daily variation change into obvious on the plateau. As for the embankment mainly trend is northeast-southwest on the Qinghai-Tibet plateau, the sun radiation is not symmetrical on the embankment both side slope along the Qinghai-Tibet railway and highway. This asymmetry cause an evident yin-yang difference, which make the embankment into lose steady and be destroyed, at the same time, the lower temperature permafrost change into higher temperature frozen soil, even into thaw soil. The shading board (short for awning) measure is one of the active protected permafrost measures, was be adopted along the Qinghai-Tibet railway and highway. The field test results show the enter into embankment surface mean net radiation is 300~350 W/m<sup>2</sup>, but the value is 30~45 W/m<sup>2</sup> under the shading board, the reduce level is the nature net radiation 80~90%, even the reduce level can got to 95% in radiation violent season (in summer). The heat flow enter into embankment is 38 W/m<sup>2</sup>, 25 W/m<sup>2</sup> under the embankment side slope surface 5 cm, 10 cm below the shading board respectively. However, the heat flow is 95~100 W/m<sup>2</sup> and 40~52 W/m<sup>2</sup> at the same place on the nature embankment side slope. The shading board make the heat flow enter into embankment reduce 50~75%. At the same time, the ground surface under the shading board temperature is lower 6~8°C than nature embankment. All the test results show that the awning measure can reduce the net radiation and heat flow into embankment rapidly and effectively, delay the soil temperature raise rate effectively under the globe warm background, ensure the embankment stable and safety in cold and permafrost regions.

**Keywords:** cold regions; embankment; shading board (awning) measure; net radiation; heat flow.

### Анализ эффективности солнцезащитных навесов по стабилизации земляного полотна в холодных регионах по результатам натурных экспериментов

Вэньцзе ФЭН, Вэй МА, Чжичжун СУНЬ, Гоюй ЛИ, Вэньбин ЮЙ, Цзяньфэн ЧЖЭН

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР  
Китай, 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: wenjief@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Вследствие больших абсолютных высот и большей прозрачности воздуха количество поступающей солнечной радиации на Цинхай-Тибетском нагорье выше, чем в других регионах, что приводит к значительным суточным колебаниям температуры поверхности грунтов. Трасса Цинхай-Тибетской железной и автомобильной дорог в основном идет с северо-востока на юго-запад, поэтому поступление солнечной радиации на откосы насыпи асимметрично. Это приводит к неравномерному изменению температуры тела и основания насыпи и, как следствие, к снижению устойчивости сооружения. Одним из активных способов сохранения грунтов основания земляного полотна в многолетнемерзлом состоянии, используемых на Цинхай-Тибетской железной и автомобильной дорогах, является применение солнцезащитных навесов. Результаты натурных экспериментов показывают, что радиационный баланс поверхности насыпи в среднем составляет 300-350 Вт/м<sup>2</sup>, а под солнцезащитным навесом – 30-45 Вт/м<sup>2</sup>, т.е. навес способен снизить радиационный баланс на 80-90% процентов, а в летний сезон и до 95%. На участке с навесом тепловой поток в насыпь на глубине 5 и 10 см составляет соответственно 38 и 25 Вт/м<sup>2</sup>, в то время как на участке без навеса теплопотери на тех же глубинах составили соответственно 95-100 и 40-52 Вт/м<sup>2</sup>, т.е. солнцезащитный навес снижает теплопотери в насыпь на 50-75%. Температура поверхности грунтов под навесом на 6-8°C ниже, чем на участке без навеса. Результаты натурных экспериментов показывают, что использование солнцезащитных навесов позволяет быстро и эффективно снизить радиационный баланс и теплопотери в насыпь, замедлить повышение температуры грунтов при глобальном потеплении и обеспечить устойчивость земляного полотна дорог в районах с холодным климатом и распространением многолетнемерзлых грунтов.

**Ключевые слова:** холодные регионы; солнцезащитный навес; радиационный баланс; теплопоток.

# Radiation effect analysis of the awning measure on the embankment slope field test in cold regions

Wenjie FENG, Wei MA, Zhizhong SUN, Guoyu LI, Wenbing YU, Jianfeng ZHENG

## Introduction

The permafrost area and the seasonally frozen ground area in China are about 70% of the land, and the permafrost area is estimated at about  $2.15 \times 10^6 \text{ km}^2$ , accounting for 22.4% of the total Chinese land area ([1]-[3]), is the third on the earth, but the height altitude permafrost areas is the top on the earth [3]. The permafrost area on Qinghai-Tibet Plateau (QTP) is estimated at about  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ , accounting for 70% of the total permafrost area in China. In recently ten years, under the background of the global warming up, the climate of the QTP has obvious change, and the climate control the distributing and the growth of permafrost. With the background, the engineering stability is more significant in cold regions, and the methods and measures to protect permafrost are more important. The QTP is regard as the 'starter' and 'amplifier' of the global air temperature change, its warming range is exceed the global mean value [4]. So, the air temperature range will change into more higher and more faster. At the same time, because there is high altitude and have better atmospheric transmittance on the QTP, all of above reasons make the sun radiation more intensity on the QTP than other place in China, and make the ground surface temperature day variation change into special tremendous ([5], [6]). Because the Qinghai-Tibet railway and highway embankment trend are the northeast-southwest direction, lead to the sun radiation is not symmetrical on the both side slope, so, there have obvious yin-yang slope effect, and at last bring about the a lot of roadbed unstable and destroy, most of those damage occurred at the yang slope. We can found almost 70%~80% lie at the obvious yin-yang slope section from the Qinghai-Tibet railway and highway disease and place statistics results, and 85% destroy form is the longitudinal crack at yang side slope, then develop into nets destroy, up to the road surface change into wholly damage [7].

The cracks appear probability increase on the Yang side slope, the main reason is the embankment soil temperature field is asymmetric, the soil temperature on the Yang side slope is higher than the Yin side slope, lead to the permafrost under the roadbed on the Yang side slope thaw more obvious, the result show there appear the stretch cracks on the Yang side slope

embankment shoulder. The embankment soil temperature field asymmetrical is obvious with the slope direction asymmetrical, the Yang side slope shoulder and below the side slope soil temperature is higher than the Yin side slope, and the thaw sustain a longer time, so bring out more influence to the embankment stability, and under the other conditions same, the observed results showed that the side slope direction has more effect to embankment temperature in annual mean air temperature lower regions than higher regions [8]. Hu et al. had researched the influence of solar radiation on embankment surface thermal regime of the Qinghai-Xizang railway, pointed out when the embankment direction nearby the north-south, the embankment side slope absorbent more solar radiation day variation, but it change into less when the direction is east-west; when the railway direction is  $135^\circ$ , the radiation differences is maximum between the embankment both side slope, namely the Yin-Yang side slope effect is the most obvious [9]. Kondratjev put forward a new method to strengthen roadbed in rich-ice permafrost regions, and point out the advantage with adopted the sunshading (awning) measure protected side slope in permafrost region [10]. Because the awning prevent the solar radiation got to soil surface, decrease the embankment side slope surface temperature, and it will reduce the difference between the embankment both side slope when the awning measure was adopted on the Yang side slope, make the embankment temperature field more uniformity, so, ensure the embankment stability and traffic security smooth. The awning measure had been adopted on the Qinghai-Tibet railway, Qinghai-Tibet highway and Qingkang highway, obtained more achievement in awning application ([11]-[13]), but most are evaluate the awning measure effect in definition, the quantify result is less.

The awning measure on the embankment side slope is one of the effective engineering measures to protect permafrost in cold regions, but there have many lack in mechanism research, although we had do some study at the awning structure mechanics [14], the wind speed below the awning and the awning headroom [15], we do not known the awning cut off the solar radiation capability, and do not known how many solar net radiation and heat flow come into embankment soil. So, we want to make clear the reasons by

the field test, and discuss the awning measure advantage in quantitative angle.

### Field test presentation

#### Test yard introduction

The field test yard lies in the Beiluhe basin south part between the Kekexili and Fenghuoshan on the QTP, belong to the Beiluhe alluvial-proluvial high plain landform. The terrain open, have a little undulate, and the vegetation growth better on the ground surface, the rate of coverage is 10~50%. The test section is located the west side of the Qinghai-Tibet highway (QTH), the distance from the QTH is about 500 m. The test section lie in the QTP drought regions, cold and arid, the four seasons not clear, air is rarefied, air pressure lower, the frozen period is 7-8 months long, and the evaporation is bigger than rainfall capacity. Base on the Beiluhe automatic weather station datum, the annual mean air temperature is  $-3.8^{\circ}\text{C}$  at the Beiluhe region.

Based on the test section permafrost type and distribution characteristic, the permafrost table judge method is make out synthesize the drilling core, the place of the thick-layer subsurface ice and the frozen soil structure. According to the above method, the test section nature permafrost table is 1.6~2.4 m, the annual mean ground temperature is  $-1.41\sim-1.68^{\circ}\text{C}$  at the 15m deep, belong to the lower temperature basic stable permafrost regions.

The embankment trend is  $230^{\circ}$ , near by the northeast-southwest direction, the yang slope face to the  $140^{\circ}$ , and the embankment side slope gradient is  $31.5^{\circ}$ .

#### Shading board (awning) measure introduction

The test section embankment side slope shading board (awning) measure adopt two high quality block board combination, the block board thick 12 mm and the size is  $1.22\times 2.44\text{ m}^2$ , its sum up area is  $2.44\times 2.44=5.96\text{ m}^2$ . We had brushed 3 layers green paint on the board surface to prevent it uptake water and change moist. The block board was fixed on steel tube frame by screws, and the board is parallel with the side slope from embankment surface 40 cm far away. The whole awning measure was finished at the end of the July 2010, then began to observe and got data.

#### Monitor items and method

The monitor items include embankment side slope surface long and short wave radiation with the awning measure or not, compare with the net radiation to enter into soil, and compare with the air temperature nearby the soil surface, the heat flow to enter into soil and the superficial soil temperature. The temperature probes interval is 5 cm under the side slope surface, and the air temperature probes is lie in 20 cm and 40 cm distance to the surface. The net radiation set distance to the surface 20 cm, the heat flow plate is lie at the 5 cm and 10 cm under the soil surface, as for the Fig. 1 shown. All of the data were taken by the DT500 data-taker, and were automatic taken once per 20 min.

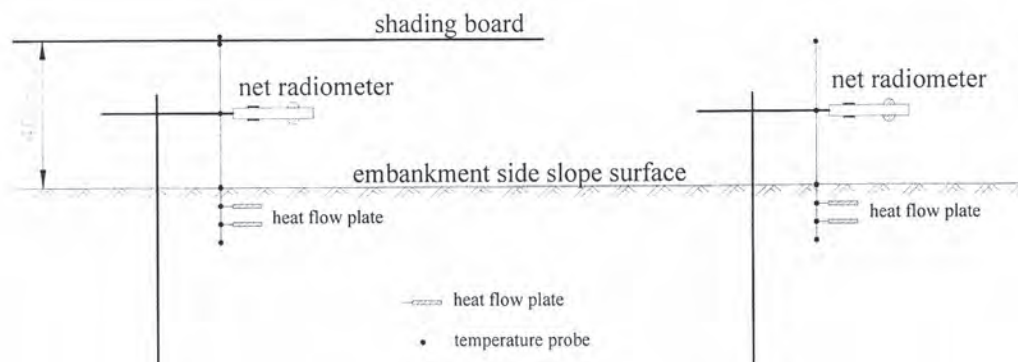


Fig. 1. Embankment side slope monitoring schemes.

The awning measure test section and the common embankment test section soil both adopt general sand-gravel, the temperature probe is thermistor manufactured by the state key laboratory of frozen soil engineering, CAS. The thermistor precision is  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ , when automatic taken, the temperature precision is  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  by calculation. The net radiometer is the CNR4 four components radiometer manufactured by

the Netherlands Kipp & Zonen company, its short wave detector sensitivity is  $7\sim 20\ \mu\text{V/W/m}^2$ , the long wave sensitivity is  $5\sim 10\ \mu\text{V/W/m}^2$ , its work temperature range is  $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ , and the temperature sensitivity is less than 5%. The heat flow monitor adopt the HFP01 thermal sensors manufactured by the Netherlands Hukseflux company, its sensitivity is  $\pm 0.02\ \text{W/m}^2$ , its work temperature range is  $-30\sim 70^{\circ}\text{C}$ , and the

temperature dependence is less than  $0.1\%/^{\circ}\text{C}$ , the heat flow monitor range is  $\pm 2000 \text{ W/m}^2$ . In the paper, the analysis data time range is from July 27, 2010 to December 1, 2010, together 4 months complete data.

### Results analysis of the test data

#### Comparative analysis of the temperature monitor

During the whole test section temperature monitor, the ground surface temperature monitor is the most important, it can direct reflect the side slope surface temperature descend effect after the awning cut off the solar radiation to come to ground surface. So, except comparative analysis the air temperature difference between the awning inner and outer when compare with the temperature difference, we should compare the ground surface temperature, and base on the results, we can evaluate the awning measure descend temperature effect.

#### Comparative analysis of the air temperature

Due to far from the ground surface 20 cm in the sky, though there have awning shadow affect, but the air ventilation is unobstructed, from the data results, we found the air temperature difference is not obvious between the awning inner and outer. We can found the air temperature has a little different at the 40 cm high place from the ground surface, and Fig.2 showed the air temperature curves.

From Fig.2, we can find the awning inner air temperature is lower than the outer and nature, the difference is more evident in the higher temperature season, the difference can get to  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  in July and August as shown in Fig.2. With the winter coming, the air temperature is down day by day, the temperature difference is reduce gradually among the three place, the difference only is about  $1.0\sim 1.5^{\circ}\text{C}$  in November. This shows the awning measure had reduced air temperature in summer signally, but the effect weakened distinctly in winter.

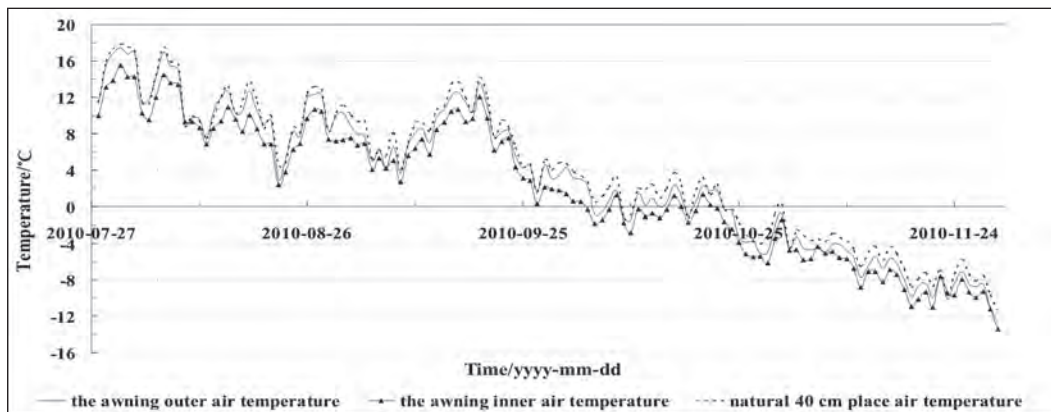


Fig. 2. The air temperature curves at the place distance surface 40 cm.

#### Comparative analysis of the embankment temperature

Ground temperature difference can reflect the cooling effect of the shade measure directly, especially the surface temperature difference, it is the best evidence of awning affect. Figure 3 shows the ground surface temperature comparison curves of the awning measure inner and outer.

In high temperature season, because the sun radiation relatively intense, and awning measures just cut off the solar direct radiation reached to the ground surface, make the awning inner and outer ground surface receive different radiation, thus causing a remarkable differences. From the figure 4 curves we found the awning inner ground surface temperature is lower  $6\sim 8^{\circ}\text{C}$  than the nature ground in high temperature season. With the change of seasons, enter autumn and winter season, the sun radiation abate gradually, the awning advantage of cut off solar radiation

decreases, and the ground surface temperature difference decreased gradually between the awning inner and outer, both almost at the same temperature when come into cold winter. As shown in Fig. 3, in November, the temperature curve gradually superposition, the awning inner and out surface temperature difference almost don't exist, which shows that the embankment side slope shading board (awning) measure cooling effect are mainly embodied in the sun radiation violent summer.

#### Effect analysis of the radiation influence

In summer, the main reason of the awning inner and outer ground surface temperature difference is the awning cut off the solar radiation reach to ground surface, so lead to the heat flow enter into embankment different, at last make the soil temperature different. Fig. 4 and Fig. 5 show the heat flow value under the side slope



surface 5 cm and 10 cm on the awning and nature embankment separately, Fig. 6 shows the enter embankment side slope net radiation (In figure: the positive value mean heat enter into embankment soil, the negative value mean heat diffuse from embankment soil ).

From figure 4 and figure 5 contrast curves, we can obviously find under the protection of the side slope awning measures, the heat flow value under the surface 5 cm and 10 cm below the awning measure is far less than the natural embankment. On the common embankment, the heat flow is mainly enter into soil, at both different depths entrance heat mean is 85~95 W/m<sup>2</sup> and 40~50 W/m<sup>2</sup>. As for the awning measure embankment, the heat flow is much smaller value than nature, the level only is the

50~60% of natural embankment, and at both different depths entrance heat mean is 40 w/m<sup>2</sup> and 25 W/m<sup>2</sup>. The phenomenon lies in the awning measure blocked the solar radiation reach to ground surface, and make the net radiation reached into surface have a large difference. The side slope surface every ten-days mean net radiation is 80~120 W/m<sup>2</sup> on natural embankment, but the mean net radiation only is 15~18 W/m<sup>2</sup>, the reduced level reach to natural radiation 80~90%. The results show the awning measure can effectively reduce embankment surface and soil temperature, ensure the stability of the embankment and road traffic unblocked, therefore shading board (Awning) measure often is looked as the one of the remedial measures on embankment engineering.

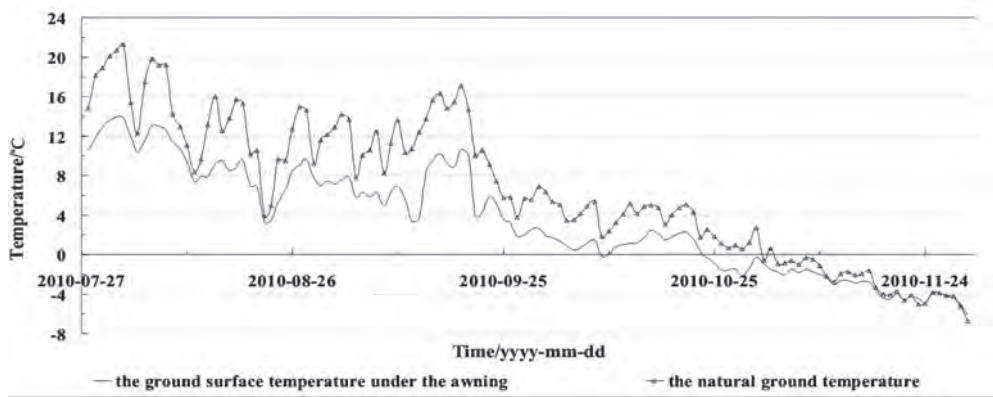


Fig. 3. The ground surface temperature curves.

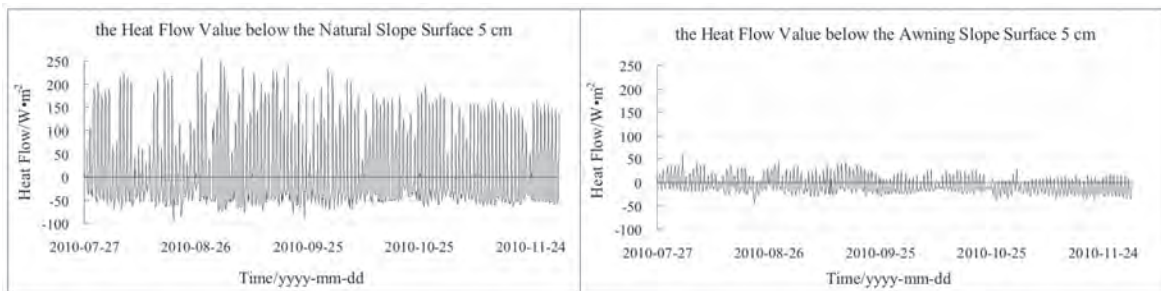


Fig. 4. The heat flow below the surface 5 cm.

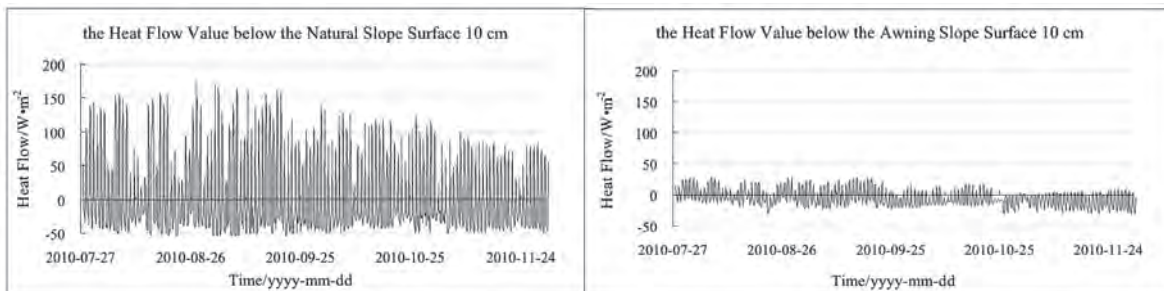


Fig. 5. The heat flow below the surface 10 cm.

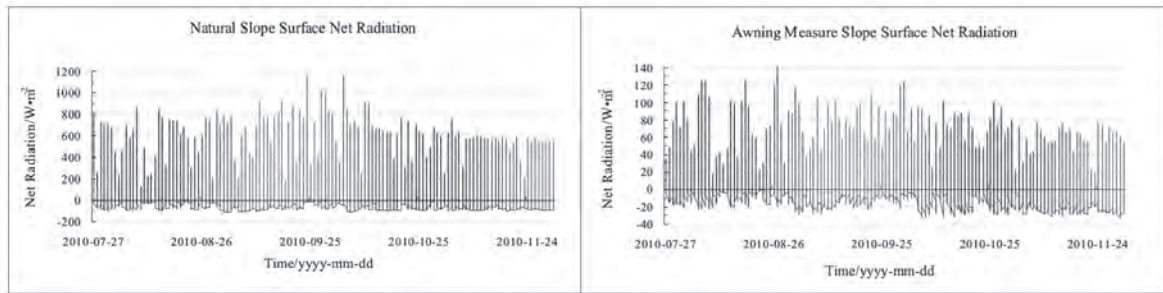


Fig. 6. The net radiation of the side slope surface.

### Conclusions and problems

Observation results shows that the shading board (awning) measure have mortal effect to cut off the solar radiation reach to embankment side slope surface, can reduce the net radiation enter into embankment soil significantly. The net radiation of enter into the embankment soil only is about 15% of natural level. The field test results show the entrance into embankment surface mean net radiation is 300~350 W/m<sup>2</sup>, but the value is 30~45 W/m<sup>2</sup> under the shading board, the reduce level is the nature net radiation 80~90%, even the reduced level can got to 95% in radiation violent season (in summer). The heat flow entrance into embankment is 38 W/m<sup>2</sup>, 25 W/m<sup>2</sup> under the embankment side slope surface 5 cm, 10 cm below the shading board respectively. However, the heat flow is 95~100 W/m<sup>2</sup> and 40~52 W/m<sup>2</sup> at the same place on the nature embankment side slope. The shading board make the heat flow enter into embankment reduce 50~75%. At the same time, the ground surface under the shading board temperature is lower 6~8°C than nature embankment. All the test results show that the awning measure can reduce the net radiation and heat flow into embankment rapidly and effectively, and descend the embankment surface and interior temperature, delay the soil temperature raise rate effectively under the globe warm background, ensure the embankment stable and safety, guarantee the road project unblocked in cold and permafrost regions.

But for the limited data, and only just enter into autumn and winter season four months observation results, to more accurate analysis and evaluation the awning measure cooling effect, we should analysis and evaluate the embankment side slope awning measure affect according to complete the freeze-thaw cycle process (at least one whole year) data. We should aim at the net radiating of enter into embankment soil and the heat flow quantitative angle to estimate the shading board measures advantages and applicability in cold regions, especially in permafrost regions.

### Acknowledgements

This project was supported by *the Funds of the State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, CAS*(Grant No. SKLFSE-ZY-03), *the National Key Natural Science Foundation of China*(Grant No. 50534040), *the National Natural Science Foundation of China*(Grant Nos. 40821001, 40801022, 40801026, 50976120 and 41001041), and *the Western Project Program of the Chinese Academy of Sciences* (Grant No. KZCX2-XB2-10).

### References

1. Jin Huijun, Li Shuxu, et al. 2000. Permafrost and climatic change in China. *Global and Planetary Change* 26:387-404.
2. Jin Huijun, Li Shuxun, et al. 2000. Impacts of climatic change on permafrost and cold regions environments in China. *Acta Geographica Sinica* 55(2): 161-173. (in Chinese)
3. Zhou Youwu, Guo Dongxin, Qiu Guoqing, et al. 2000. *Geocryology in China*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
4. Cheng Guodong. 2003. The impact of local factors on permafrost distribution and its inspiring for design Qinghai-Xizang Railway. *Science in China* (Series D 33) (6): 602-607. (in Chinese)
5. Gong Yuanfa, Duan Tingyang, Chen Longxun, et al. 1997. Outline of observational study of Sino-Japan Cooperative Program on Asian monsoon over Tibetan Plateau. *Journal of Chengdu Institute of Meteorology* (1): 18-27. (in Chinese)
6. Hu Zeyong, Cheng Guodong, Gu Lianglei et al. 2006. Calculating method of global radiation and temperature on the roadbed surface of Qinghai-Xizang Railway. *Advances in Earth Science* 21(12): 1304-1313. (in Chinese)
7. Chou Yaling. 2008. Study on shady-sunny effect and the forming mechanism of the longitudinal embankment crack in Permafrost. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Dissertation For Ph.D.*,.05. (in Chinese)
8. Zhang Luxin, Yuan Sicheng, Yang Yongping. 2003. Mechanism and prevention of deformation cracks of embankments in the permafrost region along

Qinghai-Xizang Railway. *Quaternary Sciences* 11, 23(6): 604-610. (in Chinese)

9. Hu Zeyong, Qian Zeyu, Cheng Guodong, Wang Jieming. 2002. Influence of solar radiation on embankment surface thermal regime of the Qinghai-Xizang Railway. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24(2): 121-128. (in Chinese)

10. Kondratjev, V.G. 1996. Strengthening railroad base constructed on icy permafrost soil. *Proceedings of the Eighth International Conference on Cold Region Engineering*. Fairbanks, 688-699.

11. Feng Wenjie, Ma Wei, Li Dongqing, Zhang Luxin. 2006. Application investigation of awning to roadway engineering on Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology* (45): 51-58.

12. Feng Wenjie, Wen Zhi, Sun Zhizhong, Wu Junjie. 2009. Application and effect analysis of the awning measure on cold regions. *Recent Development*

*of Research on Permafrost Engineering and Cold Region Environment, Proceedings of the Eighth International Symposium on Permafrost Engineering*, 15-17 October, 2009, Xi'an, China: 148-153.

13. Kömle Norbert I., Feng WenJie. 2009. Variation of the frost boundary below road and railway embankments in permafrost regions in response to solar irradiation and winds. *Comsol Conference 2009, Milan Italy, October 14-16*.

14. Shi Lei, Li Ning, Li Guoyu, Bi Guiquan. 2007. Stability analysis of the awning in road engineering in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 29(6): 986-991. (in Chinese)

15. Feng Wenjie, Ma Wei, Niu Yonghong. 2009. Simulate analysis of the wind speed variation under the awning. *Journal of Glaciology and Geocryology* 31(1): 106-112. (in Chinese)

## Evaluation of the oil pipeline in permafrost region using AHP method

Weinan MAO, Jiankun LIU, Yahu TIAN

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
Beijing, China, 100044

**Abstract.** The China-Russia Crude Oil Pipeline runs through the permafrost area for about five hundreds of kilometers across mountains, forests and wetlands with complicated engineering geological conditions. The fuzzy synthetic model is built by adopting AHP theory considering 17 factors which may affect the pipeline security in permafrost regions. A fuzzy synthetic evaluation method is developed based on the safety reliability analysis. That is realized in the Pipeline Monitoring System.

**Keywords:** permafrost; safety reliability, crude oil pipeline, analytic hierarchy process, fuzzy synthetic evaluation.

## Оценка надежности нефтепровода в криолитозоне с использованием метода анализа иерархий (МАИ)

Вэйнань МАО, Цзянькунь ЛЮ, Яху ТЯНЬ

Институт гражданского строительства Пекинского транспортного университета  
Китай, 100044, г. Пекин

**Аннотация.** Около 500 километров трассы российско-китайского нефтепровода проходит по гористой, залесенной и заболоченной местности со сложными инженерно-геокриологическими условиями. Нами построена нечетко-множественная модель на основе теории метода анализа иерархий (МАИ), учитывающая 17 факторов, которые могут влиять на безопасность трубопровода в криолитозоне. Разработан метод нечетко-множественной оценки на основе анализа надежности системы. Метод реализован в Системе мониторинга трубопровода.

**Ключевые слова:** криолитозона; надежность геотехнической системы; нефтепровод; метод анализа иерархий; анализ нечетких множеств.



# Evaluation of the oil pipeline in permafrost region using AHP method

Weinan Mao, Jiankun Liu, Yahu Tian

## Introduction

The engineering geological conditions have a close relationship with the safety of operation oil pipeline. For those located in the permafrost regions, the interaction between frozen soil and pipeline have a more important influence. It has been a challenge for a long time to evaluate the safety of pipeline when considering the oil temperature's influence to the frozen soil and the frozen soil-oil pipeline interaction. The China-Russia Crude Oil Pipeline runs through the permafrost area for about five hundreds of kilometers across mountains, forests and wetlands with complicated engineering geological conditions [1]. To make sure the safety of the pipeline, it would be necessary to give a security evaluation constantly. And for this security evaluation it should consider all the main influence factors.

The analytic hierarchy process and fuzzy mathematics theory [2]-[6] could provide an easy decision method for complex decision problem which has multiple targets, multi criteria and no structural characteristics on the base of essence, influence factors and the inner relationship analysis. There have been many effective applications of the analytic hierarchy process and fuzzy mathematics theory in various security evaluations [7]-[8]. This paper established a security evaluation model of oil pipeline lies in the permafrost regions on the considering of 17 factors which may affect the pipeline security in permafrost regions and process to evaluating the system reliability. At last we apply this model to the security evaluation of the China-Russia crude oil pipeline.

## Establishment of safety evaluation system

There are many factors that can influence the oil pipeline security [1]-[2], here we classify into 6 categories: Pipeline parameters, frozen soil types, temperature, thickness, geological environment, and engineering conditions. These 6 categories make up the first layer of the security evaluation model, and each category has some influence factors that have something in common. All these factors make up the second layer of

the security evaluation model and thus form the security evaluation model (Fig. 1).

## Safety evaluation

### Judgment matrix

The final evaluation result is calculated by the first layer's evaluation result which is calculated by the second layer's evaluation result [5]. In order to determine the influence proportion of each different factor embodied in the final evaluation result, establish the judgment matrix is the most basic steps of the whole system security evaluation process. Each element of the judgment matrix reflects the influence proportion of each different factor and thus the final evaluation results.

The method to filling in the judgment matrix: every category  $B_k$  that has factors belongs to it will be placed first, and the factors  $A_1, \dots, A_n$  belong to it will lie behind both in line and column, the value of each element  $a_{ij}$  of matrix  $A_k$  is the ratio of the importance of factor  $i$  and  $j$  (Eq. 1).

$$\begin{matrix}
 B_k & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\
 A_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\
 A_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 A_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn}
 \end{matrix} = A_k \quad (1)$$

The ratio can be got by comprehensive related materials of engineering, geology, environment etc. The value and it corresponding significance are shown in Table 1.

Table 1. Importance scale meaning table

value	implication
1	Etc importance
3	The former slightly important than the latter
5	The former obvious important than the latter
7	The former strongly important than the latter
9	The former extreme importance than the latter
2,4,6,8	Intermediate value of above

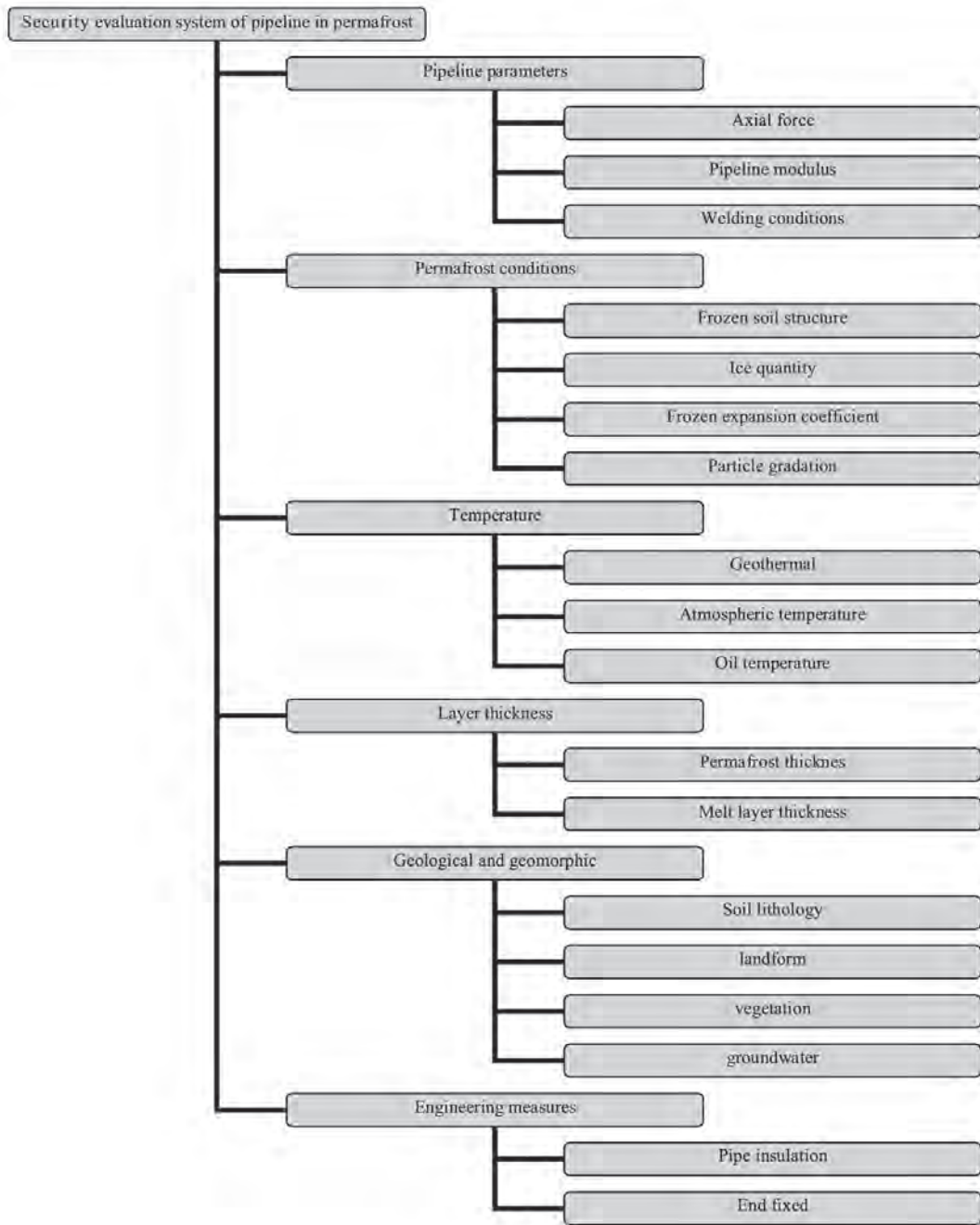


Fig. 1. The security evaluation system.

Obviously the judgment matrix  $A_k$  has the following properties:

- (1)  $a_{ij} > 0$
- (2)  $a_{ji} = 1/a_{ij}$
- (3)  $a_{ii} = 1$

*Weight vectors [9]-[11]*

The weight vectors of factors  $A_1 \cdots A_n$  can be got, the relationship of judgment matrix  $A_k$  and its maximum characteristic root  $\lambda_{\max}$ , eigenvector  $\omega$  is shown in Eq. 2.

$$A_k \omega = \lambda_{\max} \omega \quad (2)$$

Thus:

$$\omega_i = \frac{\left( \prod_{j=1}^n A_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left( \prod_{j=1}^n A_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

**Consistency inspection**

To check whether the judgment matrix is equitable, we lead in the Judgment matrix

consistency index  $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ , and the random average consistency index RI, when  $CR = \frac{CI}{RI} < 0.01$ , the judgment matrix is consistency, or the judgment matrix should be rewrite.

Table 2. Evaluation random consistency index

Order number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.96	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

**Evaluation sets and membership**

The weight vectors passed the consistency check reflect the proportion of each factor's influence takes in the final evaluation results. To evaluate what type influence the state of every factor right now takes, we lead in the evaluation sets and membership degree.

The evaluation sets consists of possible outcomes one factor can contribute to the pipeline security [8]-[9]. Here we make the evaluation sets  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$ ,  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  represent instability, less stable, general stability, stable and very stable of the pipeline respectively. Give each element a value, it can be written as  $E = \{20, 40, 60, 80, 100\}$ .

The membership degree is the happening possibility of the corresponding element in evaluation sets. The happen possibility of element  $k$  in evaluation sets due to the factor  $j$  of the

category  $B_j$  is  $I_{jk}, I_{jk} \in [0, 1]$ ,  $\sum_{k=1}^n I_{jk} = 1$ ,  $n$  is the numbers of element of the evaluation sets [9]-[10]. Then when consider the state of the factors at a certain time, each factor corresponds a membership degree vector. Put all the membership degree vector belongs to the category  $B_j$  together we can get the evaluation matrix  $L_j = (I_{jk})_{m \times n}$ . The number of rows is the number of the factors belongs to the category, the number of columns  $m$  is numbers of elements  $n$  in the evaluation sets.

**The calculation of security score**

Every element in the second layer of the evaluation system  $\omega_i$  multiply the corresponding evaluation matrix  $L_i$  is the first layer's evaluation matrix.

$$J_i = \omega_i \times L_i = \{j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{im}\} \tag{4}$$

All the  $J_i$  together makes up the final evaluation matrix

$$J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_6 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Like the second layer to the first layer, the final result can be got:

$$M = \omega \times J = \{m_1, m_2, \dots, m_n\} \tag{6}$$

The final  $M$  multiply the evaluation sets  $E$  can get the final security evaluation score. This score can be relatively close to actual for it makes a comprehensive consideration of all the factors [6]-[9].

**Dynamic evaluation in computer**

In all the factors that influence the pipeline safety, some factors (temperature etc.) are continuous changing. So the security evaluation score can not be constant. The evaluation matrix and the score can be written as a function of the changing factors:

$$L_i = (I_{jk})_{m \times n} \quad I_{jk} = f(A_1, A_2, \dots, A_n) \tag{7}$$

And the final result can be written as:

$$M = \omega \times J \quad J_i = \omega_i \times L_i \\ M = F(A_1, A_2, \dots, A_n) \tag{8}$$

Some of the functions can be section function, it determined by engineering experience before and all the evaluation system above is developed in a computer program. Thus we can use the pipeline monitoring data quickly come to a real-time conclusion of pipeline safety by the computer.

**Conclusion**

The fuzzy synthetic model was built by adopting AHP theory. It has a fully considering of all the important influence factors of pipeline safety and the interaction between frozen soil and pipeline.

Taking the evaluate matrix as function of the influence factors can reduce the human appraising. It can be done quickly by using the Pipeline Monitoring System.



The key issue in using this method is to establish evaluate matrix and the evaluation sets. This needs more research and Engineering experience to do more actually thus the method can evaluate the pipeline security more accurate.

### References

1. Ji Yanjun, Jin Huijun, and Wang Guoshang. 2010. Thaw-stability assessment of the permafrost foundation soil along the proposed China-Russia crude oil pipeline from Mohe to Daqing. *Journal of Engineering Geology* 18(2): 241-250. (in Chinese)
2. Shi Yongkui, and Zhao Weidong. 2004. Mine safety synthesizes evaluation system based on web. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* 8(2): 78-80. (in Chinese)
3. Guo Zhanglin, and Sun Yuli. 2010. Safety assessment of urban gas pipelines based on the risk analysis. *Journal of HeiBei University of Engineering* 6(2): 87-90. (in Chinese)
4. Yang Shuo, and Bao Zhengqing. 2010. Study on safety assessment of gas station based on fuzzy analytic hierarchy process. *Value Engineering*, 29(27): 217-217. (in Chinese)
5. Wang Junfang, and Yu Qianxiu. 2009. Uncertained measuring model applied to safety evaluation of oil and gas pipeline systems. *Oil and Gas Storage and Transportation* 28(5): 14-18. (in Chinese)
6. Qian Yongsheng, Zhoubo, and Guang Xiaoping. 2007. AHP-Fuzzy synthetic evaluation on traffic safety of highway on the basis of reliability. *Construction Management Modernization* 2: 5-8. (in Chinese)
7. Chen Xue-feng, and Yu Qian-xiu. 2006. Safety assessment method of oil or gas long pipeline, Kent method's Introduction. *Safety Health and Environment* 6(3): 27-29. (in Chinese)
8. Hao Guangbo, Xie Liyang, and He Xiuyun. 2009. Dependent failure reliability model of pipeline system based on statistics average algorithm. *Highlights of Science Paper on line* 2(6): 566-573. (in Chinese)
9. Ma Lifeng, and Liu Jiankun. 2009. Reliability based AHP-Fuzzy synthetic evaluation system for stability of roadbeds in permafrost regions. *Journal of Engineering Geology* 17(4): 522-527. (in Chinese)
10. Qian Yongsheng, and Zhou Bo. 2007. AHP-Fuzzy synthetic evaluation on traffic safety of highway on the basis of reliability. *Construction Management Modernization* 2: 5-8. (in Chinese)
11. Tong Changjiang, and Guo Dongxin. 2008. Recent advances in frozen ground engineering geology survey along the China-Russia crude oil pipeline route. *2(30): 170-175. (in Chinese)*



## Experimental study on the mechanism of thawing settlement under dynamic loading in 109th National Highway

Feng SHI<sup>1</sup>, Jianhong FANG<sup>2</sup>, Jiankun LIU<sup>1</sup>, Liyun PENG<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
Beijing, China 100044

<sup>2</sup>Qinghai Research Institute of Transportation, Qinghai, China 81000

<sup>3</sup>Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, China 100044

**Abstract.** The frost related problems in 109th national highway in Qinghai province were analyzed in this paper; laboratory tests were conducted to investigate the behavior of roadbed under dynamic load during thawing. The experiment was conducted respectively for two cases given different boundary conditions. Both the tested for two cases were analyzed and summarized.

**Keywords:** unconfined compression; thawing settlement; dynamic loading; sandy silt; seasonal frost area; permafrost.

## Экспериментальное изучение механизма осадки оттаивающих грунтов при динамических нагрузках на 109-й автомагистрали

Фэн ШИ<sup>1</sup>, Цзяньхун ФАН<sup>2</sup>, Цзянькунь ЛЮ<sup>1</sup>, Лиюнь ПЭН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт гражданского строительства Пекинского транспортного университета  
Китай, 100044, г. Пекин

<sup>2</sup>Цинхайский институт транспорта, г. Синин, Китай

<sup>3</sup>Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры, г. Пекин, Китай

**Аннотация.** Проанализированы геокриологические проблемы строительства и эксплуатации 109-й автомагистрали в провинции Цинхай. Представлены результаты лабораторных испытаний, проведенных с целью изучения поведения оттаивающих грунтов основания при динамических нагрузках. Обобщены и проанализированы результаты экспериментальных исследований, выполненных для двух случаев с разными граничными условиями.

**Ключевые слова:** компрессия при возможности бокового расширения; осадка при оттаивании; динамическая нагрузка; супесь; сезонномерзлые грунты; многолетнемерзлые грунты.

# Experimental study on the mechanism of thawing settlement under dynamic loading in 109th National Highway

Feng SHI, Jianhong FANG, Jiankun LIU, Liyun PENG

## Introduction

There are vast areas of seasonal frozen soil and permafrost in western China. In recent years, with the development of highway construction in permafrost regions, frost-boiling problems caused by thawing settlement are becoming common occurrences. Built highway subjected frost-boiling disease frequently for the sake of topography, geomorphology, climate and other factors, which seriously affected the normal road use and travel security. Thereby, much attention has been focused on its mechanism, factors and the development of law. As one of the most important aspects of the mechanics of frozen soil, unconfined compression tests of thawing soil have been conducted for many years.

As early as 30 years in the last century, Tsytoovich developed an effective compression test method for the consolidation of thawing, and made a special insulation compression apparatus [1]. Using the equipment, he studied the compaction process under loading of a certain kind of soil. After that, he made a research on calculation method aiming at total settlement of different kinds of soil. Ono designed a series of the triaxial test device of freezing and thawing with a laser sensor to monitor the lateral deformation, which can provide different lateral stress boundary conditions, on the basis of it, he studied the swelling and shrinkage deformation in the freezing process under different stress conditions. Using this device, artificially frozen deformation process can be clearly observed [2]. Numerous scientists and engineers have obtained useful results from unconfined compression tests of thawing soil (e.g., Morgenstern et al., 1973, Ping He et al. 2004, Jianping Wan et al 1999) [3]-[5], however, few studies have investigated thawing soil mechanical behavior under dynamic loading, despite their great importance in understanding thaw weakening and the reduced bearing capacity of subgrade during springtime thawing under dynamic loading.

To understand the problems arising from thawing settlement, an experimental study on the unconfined compression of thawing sandy silt was conducted using proprietary apparatus with a special temperature controlled system, which can

easily achieve unconfined dynamic compression tests at different given roof or bottom temperature and dynamic stress conditions.

## Testing materials, equipment and programs

### Physical parameters of soil samples

In this experiment, the soil sample was obtained at Qinghai Xiangpi Mountain sections of 109th National Highway. The physical parameters of soil are listed in Table 1.

Table 1. Basic physical parameters of soil

Natural water content	Optimum moisture content	$\rho_{dmax}$ , g/cm <sup>3</sup>	Plastic limit $\omega_p$	Liquid limit $\omega_l$	Plasticity index $I_p$	Specific gravity $\gamma$
11.6%	15.2%	1.83	19.7	28.6	8.9	2.71
Particle size content, %	0.075 mm - 5 mm, 32.57%; 0.005 mm - 0.075 mm, 43.28%; 0 mm - 0.005 mm, 24.15%					

The proportion of silt-sized grains in the sample (43.28%) makes it highly susceptibility to frost and boiling. Reference to "soil test method standard" (GB/T50123-1999) conducted tests for determining the freezing temperature; test result showed that the freezing temperature of the soil was -0.32°C.

We performed thawing experiments in which we packed four identical Plexiglas cylinders with sandy silt prepared with an optimum water content of 15.2% and a maximum dry density of 1.83 g/m<sup>3</sup> (corresponding to a compacting ratio of 0.9). Each cylinder was 10 cm long and had an internal diameter of 15 cm. The internal surface of the cylinder was separated from the sample surface by Vaseline and a membrane to reduce the frictional force. Before testing, the prepared samples were placed in a humidistat for about 12 h and then into a thermostat at 1°C for another 12 h to ensure a uniform water content and temperature profile throughout each sample. The samples were prepared for the thawing test by bringing them to the same initial state involving a uniform temperature of 1°C and a close to uniform volumetric water content of 15.2% throughout the cylinder. Three cylinders were used for the

thawing test under dynamic load with different amplitudes, while the fourth was used to precisely measure the initial conditions.

The sides and bottoms of cylinders were thermally insulated, and in the freezing phase their tops exposed to a circulating fluid with at a given temperature of  $-2^{\circ}\text{C}$  or  $-3.5^{\circ}\text{C}$ , at the same time, their bottoms exposed to a temperature of  $-1^{\circ}\text{C}$  or  $1^{\circ}\text{C}$ , after 24 h we change the top temperature to  $10^{\circ}\text{C}$ , and made the bottom temperature constant. Thus, soil samples were subjected to freezing and thawing from top-down. When the deformation began increasing dramatically, we finished the thawing test. During the experiment, we record the temperature and the deformation amount with accurate temperature and displacement sensors.

The test apparatus consisted of a loading system, deformation measurement system, temperature controlled and measurement system, insulation system and data-collection system (Fig.1).

Table 2. Testing program for case 1

Amp	$T_{\text{bottom}}$	$T_{\text{cooling}}$	$T_{\text{thawing}}$
20 kPa	$-1^{\circ}\text{C}$	$-2^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C}$
40 kPa			
60 kPa			

Table 3. Testing program for case 2

Amp	$T_{\text{bottom}}$	$T_{\text{cooling}}$	$T_{\text{thawing}}$
20 kPa	$1^{\circ}\text{C}$	$-3.5^{\circ}\text{C}$	$10^{\circ}\text{C}$
40 kPa			
60 kPa			

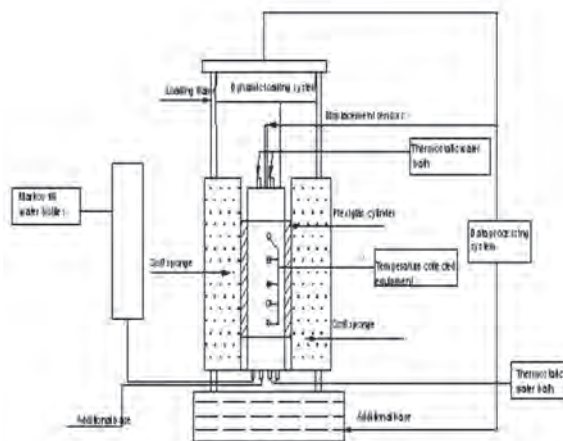


Fig. 1. Outline of the test apparatus.

### Loading system

A self-developed hydraulic servo loading system was used as the loading system, coupled with an automatic data-collection system.

### Temperature controlled system

Temperature collected system with an accuracy of  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  produced by United States was composed of NESLAB thermostatic water bath, which was connected to top and bottom plates respectively to control the sample temperature at the desired value during the experiment. A walk-in thermostatic chamber coupled with thermistor thermometer and temperature controller system was introduced to make ambient temperature at  $1 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  constant during the test. To ensure one-dimensional thawing, the sample was surrounded by soft sponge.

### Data-collection system

Data-collection system was consisted of thermistor sensors and DATATAKE automatic data acquisition instrument, of which the accuracy of sensor was  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .

### Replenishment system

A Markov fill water bottle with an accuracy of  $\pm 0.1$  mm was used as replenishment system, through which we can read the water level during the test.

### Deformation monitoring system

Deformation monitoring system consists of dynamic displacement sensors and displacement logger composition.

$T_{\text{cooling}}$ : Cooling temperature at the top of the sample during freezing,  $T_{\text{thawing}}$ : Thawing temperature at the top of the sample,  $T_{\text{bottom}}$ : Constant temperature at the bottom of the sample, Amp: Dynamic loading amplitude.

## Test results and analysis

### Test results and analysis for case 1

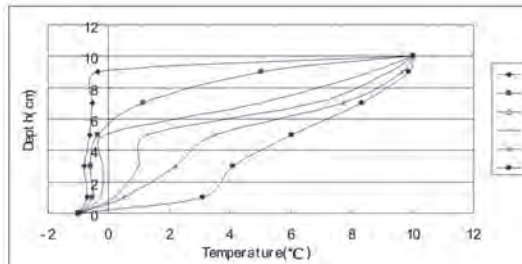
#### Soil temperature field analysis during dynamic melting course

Fig. 2 shows melting temperature distribution curve when subjected the same situation involving the same roof cooling temperature  $-2^{\circ}\text{C}$ , the same floor cooling temperature  $-1^{\circ}\text{C}$ , the same roof melting temperature  $10^{\circ}\text{C}$  and the same dynamic stress loading frequency (1 Hz), but applying dynamic stress with different amplitudes respectively (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa).

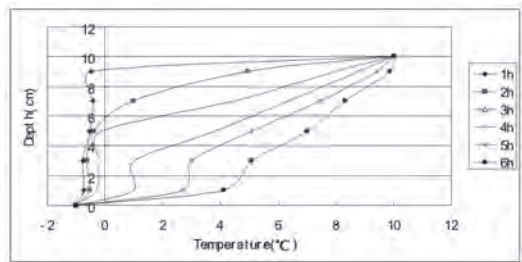
It can be seen from Fig. 2, when the other conditions are the same, melting temperature field distribution curve during the melting process under dynamic stress with different amplitudes showed similar changes, indicating that the

applied dynamic load amplitude had little effect on soil temperature field in the melting process. We can easily draw the conclusion that when subjected to the same roof cooling temperature and melting temperature under dynamic loading with the same frequency, the soil samples temperature distribution and melting curve did not move with the increase of stress amplitude as expected, all of which completed the melting course costing approximately equal time, indicating that the melting course did not affect by applied load conditions obviously under the same external temperature conditions.

(a) Amp = 20 kPa



(b) Amp = 40 kPa



(c) Amp = 60 kPa

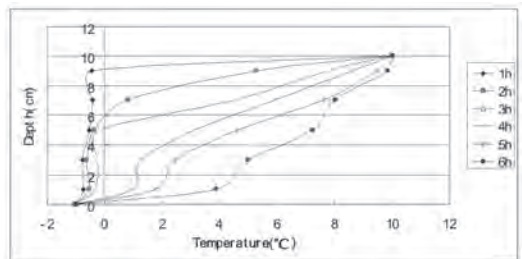


Fig. 2. Temperature distribution of soils under dynamic loading with different amplitudes.

*Soil sample deformation analysis during dynamic melting course*

Fig. 3 shows thawing deformation-time curve when subjected the same situation involving the same roof cooling temperature  $-2^{\circ}\text{C}$ , the same floor cooling temperature  $-1^{\circ}\text{C}$ , the same roof melting temperature  $10^{\circ}\text{C}$  and the same dynamic stress loading frequency ( $1\text{ Hz}$ ), but applying dynamic stress with different amplitudes respectively (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa).

It can be seen clearly from Fig. 3 that thawing deformation increased as loading time under dynamic loading with the same frequency and amplitude. When the melting course was completed, the settlement deformation reached a steady state. To compare with the test results under dynamic loading with different amplitudes, we can easily draw the conclusion that settlement deformation is positive correlation with loading amplitude. However, in terms of several conducted groups of test results, the strain of soil sample did not exceed 5%, that is, all above case subgrade soil was still in a safe working condition in accordance with the provision of conventional soil mechanics.

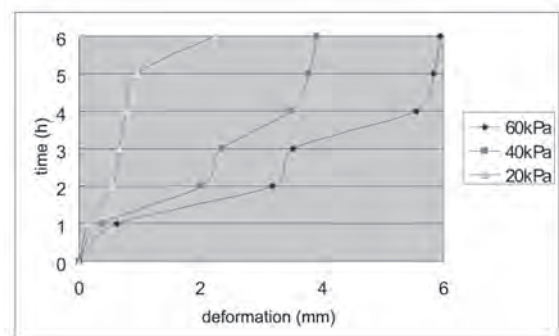


Fig. 3. The deformation of soil samples under dynamic loading with different amplitudes.

*Test results and analysis for case 2  
Soil temperature field analysis during dynamic melting course*

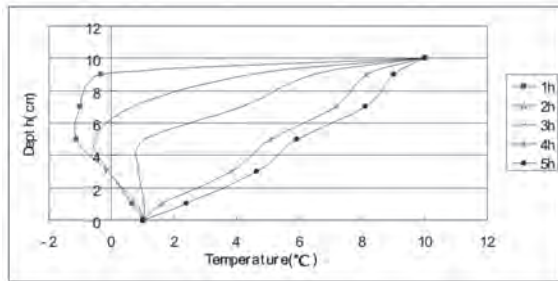
Fig. 4 shows melting temperature distribution curve when subjected the same situation involving the same roof cooling temperature  $-3.5^{\circ}\text{C}$ , the same floor melting temperature  $1^{\circ}\text{C}$ , the same roof melting temperature  $10^{\circ}\text{C}$  and the same dynamic stress loading frequency ( $1\text{ Hz}$ ), but applying different dynamic stress amplitudes respectively (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa). It means that the melting course is carried out from two directions simultaneously.

As was expected, the test result showed similar trend to the first case that simulation of permafrost frozen soil regions. It can be seen from Fig. 4, when the other conditions are the same, melting temperature field distribution curve during the melting process under different dynamic stress amplitudes showed similar changes. We can easily draw the similar conclusion that when subjected to the same roof cooling temperature and melting temperature under dynamic loading with the same frequency, the melting course did not affect by applied load conditions obviously under the same external temperature conditions. In other words, amplitude of dynamic loading

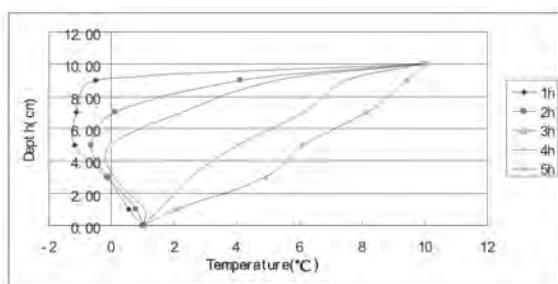


had no obvious effect on the temperature field, that is, vehicle loading will not play a role of speeding up or slowing down the melting process of subgrade.

(a) Amp = 20 kPa



(b) Amp = 40 kPa



(c) Amp = 60 kPa

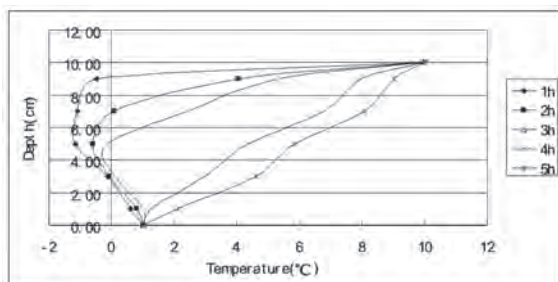


Fig. 4. Temperature distribution of soils under dynamic loading with different amplitudes.

#### Soil sample deformation analysis during dynamic melting course

Fig. 5 shows thawing deformation-time curve when subjected the same situation involving the same roof cooling temperature  $-3.5^{\circ}\text{C}$ , the same floor cooling temperature  $1^{\circ}\text{C}$ , the same roof melting temperature  $10^{\circ}\text{C}$  and the same dynamic stress loading frequency ( $1\text{ Hz}$ ), but applying different dynamic stress amplitudes respectively (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa).

It can be seen clearly from Fig. 5 that thawing deformation increased as loading time under dynamic loading with the same frequency and amplitude. When the melting process was completed, the settlement deformation reached

a steady state. However, the behaviors that soil samples performed were very different. When applied dynamic loading with amplitude of 20 kPa, deformation of soil samples showed a stable trend in the final, while when applied loading amplitude increased up to 40 kPa, deformation of soil samples increased rapidly with loading times, at the same time, the final deformation was rather large, which can be expected that when it increased up to 60 kPa, the deformation increased too dramatically to maintain its original state, the test results confirmed it.

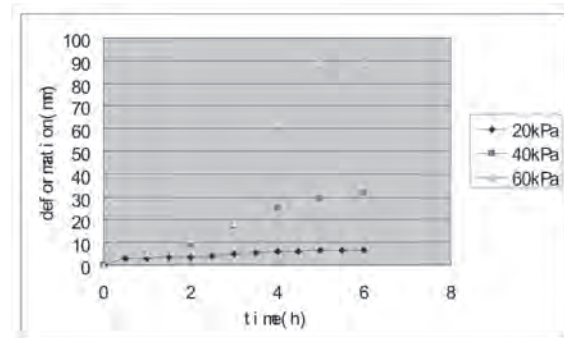


Fig. 5. The deformation of soil samples under dynamic loading with different amplitudes.

#### Conclusions

(1) In this paper, a series of unconfined dynamic compression test of thawing sandy silt were performed, Test results showed that dynamic loading pay little contribution on temperature field in a certain range.

(2) Test results showed that the dynamic loading amplitude has a great influence on the final thaw-settlement during thawing-consolidation process. The settlement gradually increased with the applied loading time for several hours, and reached a steady state finally.

(3) For the first case, in terms of several conducted groups of experiment results, the strain of soil samples did not exceed 5%, that is, all above case subgrade soil was still in a safe working condition in accordance with the provision of conventional soil mechanics.

(4) For the second case, when applied dynamic loading with amplitude of 20 kPa, deformation of soil samples showed a stable trend in the final, while when applied loading amplitude increased up to 40 kPa, deformation of soil samples increased rapidly with loading times, at the same time, the final deformation was rather large, which can be expected that when it increased up to 60 kPa, the deformation increased too dramatically to maintain its original state, the test results confirmed it.

### Acknowledgements

This research is supported by National Science Foundation of China (NSFC) under Grant No. 41001036.

### References

1. Tsytoich, N .A. 1975. *The Mechanics of Frozen Ground*. New-York: McGraw-Hill, 426 pp.
2. Chen Xiaobai, Liu Jiankun, Liu Hongxu et al., 2004. *Frost Action of Soil and Foundation Engineering*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
3. He Ping et al. 2004. Process of frost heave and characteristics of frozen fringe. *J of Glaciology and Geocryology* 26 (Supplement): 21-25.
4. Morgenstern, N.R., Smith, L.B. 1973. Thaw-consolidation tests on remoulded clays. *Canadian Geotechnical Journal* 10(1): 25-40.
5. Wan Jianping, Wan Wenshun et al. 1999. Model test of frost heaving and thawing settlement of frozen soil. *China University of Mining Technology* 28(4): 303-306. (in Chinese).

# The spatial distribution of ground ice and dry density in permafrost region along Qinghai-Tibet Railway

Chengsong YANG, Guodong CHENG, Tao CHE, Fujun NIU

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: ychsong@lzb.ac.cn

**Abstract.** Ground ice is an important element of frozen soil, and the study of ground ice distribution in permafrost is extremely important for geocryological research. Ice content variations in frozen soil influence engineering and constructions stability in permafrost. In this paper, the borehole gravimetric water content and density along permafrost region of Qinghai-Tibet Railway are used to determine ground ice distribution. The number of boreholes is 1167 to use for estimating mass water content which involves 11,387 sampling points, and the number of boreholes is 764 to use for estimating density which involves 4001 sampling data points. We transformed water content and density to volumetric ice content and dry density respectively and used spatial interpolation method (IDW) to determine ground ice distribution along the railway. We used an interval of 10 cm in the vertical scale and 1 km for horizontal interpolations. It turns out that the spatial distribution of ground ice and dry density along Qinghai-Tibet Railway is varied. The interpolation results provide excellent method to determine ground ice distribution along the railway.

**Keywords:** ground ice; dry density; Qinghai-Tibet Railway; spatial interpolation.

## Пространственное распределение льдистости и плотности скелета грунтов вдоль трассы Цинхай-Тибетской железной дороги в зоне распространения многолетней мерзлоты

Чэнсун ЯН, Годун ЧЭН, Тао ЧЭ, Фуцзюнь НЮ

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов  
АН КНР

Китай, 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: ychsong@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Лед является обязательным компонентом мерзлых грунтов, поэтому льдистость является важным показателем, необходимым в геофизиологических исследованиях. Неравномерное распределение льдистости оказывает влияние на устойчивость инженерных сооружений в криолитозоне. Для выяснения пространственного распределения льдистости вдоль трассы Цинхай-Тибетской железной дороги мы использовали данные буровых скважин по весовой влажности и плотности грунтов. Всего использовано 11387 определений весовой влажности с 1167 скважин и 4001 определения плотности с 764 скважин. По этим данным были получены величины объемной льдистости и плотности скелета грунтов, которые использованы для определения пространственного распределения льдистости вдоль трассы железной дороги методом пространственной интерполяции по обратным средневзвешенным расстояниям (IDW). Интерполяция выполнена с интервалом 10 см по вертикали и 1 км по горизонтали. Выявлена существенная изменчивость льдистости и плотности скелета грунтов вдоль Цинхай-Тибетской железной дороги. Результаты интерполяции являются хорошей основой для определения льдистости на трассе железной дороги.

**Ключевые слова:** льдистость; плотность скелета грунтов; Цинхай-Тибетская железная дорога; пространственная интерполяция.

# The spatial distribution of ground ice and dry density in permafrost region along Qinghai-Tibet Railway

Chengsong Yang, Guodong Cheng, Tao Che, Fujun Niu

## Introduction

It is well known that the freeze-thaw change cycle of ground ice is a key cause of altering the roadbed stability in frozen region. And ground ice is also a basic factor of frozen soil freeze-thaw change that leads to cold instructions destruction and other ill frozen ground questions. For the railway in permafrost region with high ice content, slight engineering may arose the roadbed stability change in frozen soil region, and may arose the great destroy of constructions, especially where the Mean Annual Ground Temperature (MAGT) of permafrost region is above  $-1.5^{\circ}\text{C}$  ([1]). For other constructions in cold regions, such as bridge, tunnel, road cutting, high slope, etc, the influence of great ice content frozen soil is also a very key question. For ground ice is imbedded under surface ground that is affected by many factors, its spatial distribution rule is very complicated. By now two main methods of investigating ground ice of permafrost region are borehole and ground penetrating radar (GPR). Borehole data is authentic; however, it need take time and use great effort. GPR is a good instrument of investigating ground ice; however, GPR decipher needs know the geologic condition under ground. In this paper, borehole data is analyzed by the method of spatial interpolation, and then the spatial distributions of ice content and dry density along Qinghai-Tibet Railway (QTR) are obtained.

## Borehole Data and Analysis

### *The introduction of borehole data*

Borehole data applied in this paper include: State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Science, finished 90 boreholes that are located on right-and-left sides and some centers of 53 sections of QTR from August 19 - October 30, 2004. The total depth of the 90 boreholes is 2672 m; Northwest Research Institute Co. Ltd China Railway Engineering Corporation finished 103 boreholes of 30 sections of QTR from June 7-August 14, 2004. The total depth of 103 boreholes is 1742.30 m; some boreholes data is obtained during the second-time service engineering of Qinghai-Tibet Highway (QTH), and the Permafrost Surveys Project on Tanggula-Xieshui River, and the borehole data accumulation of Qinghai-Tibet Plateau Integrative Observation Station.

### *Data analysis of ground ice*

Mass water content is a ratio of total water mass within soil to dry soil granule mass. Soil density is the ratio of total soil mass to total soil volume. The borehole data we use can offer ice mass content that is mass water content and soil density, while volumetric ice content is often required by engineering units and when calculating the distortion of frozen ground relative to ground ice. The paper uses volumetric ice content and dry density. The water or ice mass in frozen ground changes with season, so the concepts of ice content and water content are not differentiated in this paper and the unfrozen water in the frozen soil layer is also not taken into account. We use the following expressions (1) and (2) to transform water mass content  $\omega$  and density  $\rho$  to volumetric ice content  $c_i$  and dry density  $\gamma_d$ . The expressions are:

$$c_i = \frac{\rho\omega}{1+\omega} \quad (1)$$

$$\gamma_d = \frac{\rho}{1+\omega} \quad (2)$$

After transforming the data, we plot the spatial coordinates of borehole sampling spots data by borehole railway milepost and the depth of borehole sampling spot. Fig. 1 shows the points distributing of known borehole about ground ice information. Fig. 2 shows the points distributing of corresponding borehole about density information. In this paper, the borehole number along QTR (Qinghai-Tibet Railway) is 80, and the number along QTH (Qinghai-Tibet Highway) is 1087 that are used to calculate ice content distribution. The whole sampling point number used to calculate ice content distribution is 11387. The borehole number along QTR is 80, and the number along QTH is 684 that are used to calculate dry density, the whole sampling point number is 4001. QTR is a linear engineering, so it is easy to be displayed that the horizontal axis in Fig. 1 and Fig. 2 is borehole railway milepost, and the vertical axis is the depth of borehole sampling spot. The rectangle in Fig. 1 and Fig. 2 is the spatial extension analyzed in the paper, and this horizontal extent is just the permafrost region



of QTR crossing. Though much borehole data is short of deeper layer data of ground ice, we pay more attention to ground ice in the permafrost active layer that is mainly located the depth from

ground surface to 5 m deep. In the paper, the analyzed spatial depth is from ground surface to 10m deep, so the lack data hardly influences the interpolation results.

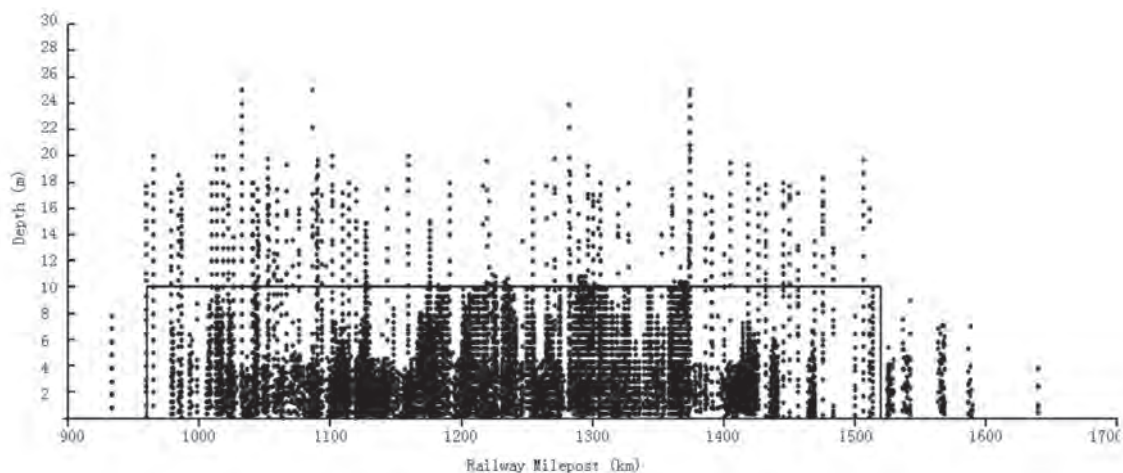


Fig. 1. The sampling point distribution of ground ice borehole.

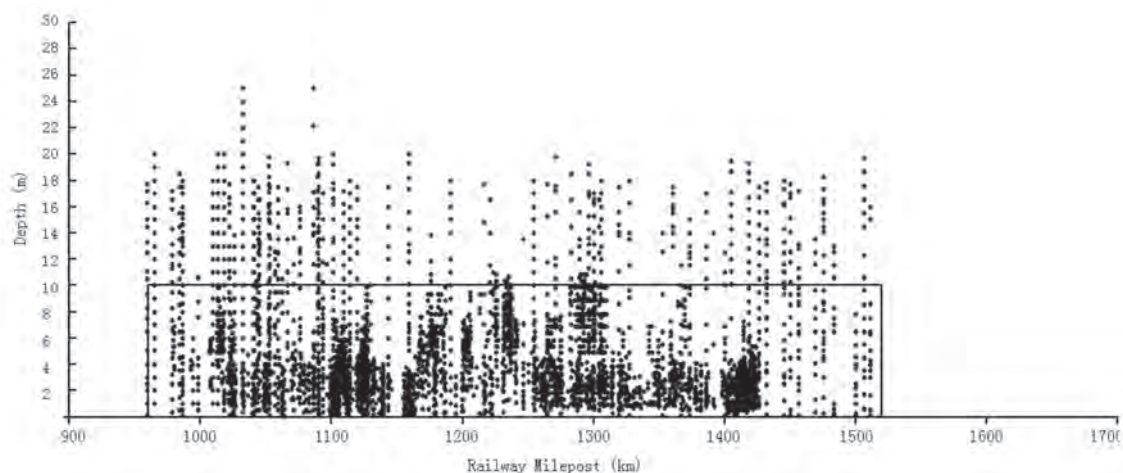


Fig. 2. The sampling point distribution of density borehole.

#### *Spatial interpolation method*

At first, it is necessary to introduce that the space in the paper is along QTR milepost from North to South and the deepness adown surface ground. Spatial interpolation is a mathematic method of estimating unknown spatial numerical value based on known spatial data. Interpolation can be sorted into some types, such as geometry method, statistical method, geo-statistical method, function method, stochastic simulation method, physical model and synthetical method, according to the basic assumption and mathematic method of interpolation method ([2], [3], [4], [5]). Through comparing these methods, the opinion has been accepted that there is not the best excellent interpolation method generally. It is sure to analyze spatial data thoroughly in order to choose the best method according to the characteristics of data ([3]).

Geometry method is comparatively simple. As long as gross known data is enough to begin estimation and known data points distribute equably, high quality estimate result can be obtained. Statistical method can offer the cycle and current of spatial data distribution. Because ground ice data doesn't accord with statistical spatial rules, statistical method is not compatible to estimate ground ice distributing in permafrost region. Geo-statistical method (Kriging) can work well on the basis of the correlativity of spatial data. Because we lack geology of deep layer along QTR, we can't use Cokriging interpolation. The compatible condition of function method is that spatial data is continuous and even, for example, ground altitude data, and so on. Whereas ground ice has strong characteristics of spatial heterogeneity, function method is unfitted to ground ice estimation. Stochastic model

and some certain models need to understand data information very profoundly as well as it is compatible to design models, so they are not adopted in the paper. Through analyzing contrastively these typical interpolation methods, the conventional inverse distance weighting interpolation method (IDW) that is included in geometry method and Kriging method that is geo-statistical method are chosen to interpolate ground ice distribution.

For borehole sampling data, the large unit differentia of the horizontal direction and vertical direction influences sampling point to be estimated. In order to obtain the results of spatial interpolation, two steps must be executed. The first step is the interpolation of depth direction, that is, it turns out the equidistance data distribution along deepness direction by interpolating every single borehole sampling data; the second step is the horizontal interpolation, that is, it turns out continuous isobathic interpolation result according to the all borehole data in horizontal equidistance. Above steps can solve the inconsistency of horizontal and vertical distance units.

Such data estimation is the result of linear interpolation in two directions (horizontal direction and upright direction respectively). Kriging method has not the advantage of linear interpolation as it obtains unknown point value by analyzing its spatial variability. So the result of using Kriging is not good. In this paper, IDW is adopted to carry out the two steps interpolation. The following is the explanation of Inverse Distance Weighting method (IDW):

IDW is a very common method of spatial interpolation. It is considered that the sampling spots nearest to the unknown point contribute to the unknown point value greatest. And contribution is inverse ratio to distance. It can be expressed by the following formula.

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p}} \quad (3)$$

$Z_0$  is the unknown ice content of the unknown estimated point,  $Z_i$  denotes known ice content of a borehole sampling  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $n$  denotes the total number of the known sampling variables within a certain round confine of the unknown value.  $D_i$  denotes the distance of sample  $i$  to the being estimated value.  $p$  denotes the power

of distance.  $p$  observably influences interpolation results, and the results has more even impression with  $p$  increasing. The paper chooses 2, which is inverse distance square interpolation.

### Results

Ice mass content offered by borehole information is mass percentage. For expedient analysis, ice mass content is transformed to volumetric ice content using soil density and mass percentage. The reason is, the mass of ice and soil together included in mass ice content affect each other, and the quality of ice and soil is not absolute. Such does not avail to interpolation analysis; on the other hand, the parameter of volumetric ice content is needed in many frozen ground models. The interpolation results of volumetric ice content can be the initialization of simulation and it is also easy to contrast simulation results.

Fig. 3 and Fig. 4 are the distribution plots of volumetric ice content and dry density respectively by IDW method. In the two plots, the isobathic depth of upright interpolation is 0.1 m, and the equidistance of horizontal interpolation is 1 km.

Fig. 3 shows that frozen soil with high ice content is concentrated on the 2-6 m depth layer in vertical space distribution if not considering deeper layer ground ice. There is thick ground ice within the depth 7-10 m in middle and high mountain areas of Kunlun Mountain and high plain of Chumaer River. After contradistinguishing estimation from landform and engineering geology characteristics in these areas, there are some favored factors that facilitate to form high ice content, such as, landform is level, surface vegetation is thickset relatively, many melting lakes exist and the permafrost table is relatively high. There is thick ground ice near 9 m depth in some areas of Zhajiazangbu Valley. Because the boring time and sampling time are in summer when the thawing depth is close to permafrost table, frozen ground with high ice content mainly focuses in near permafrost table which accords with known study conclusions. Comparing Fig. 3 with geology report (the General Geology Report of Qinghai-Tibet Railway-from Germu to Lasa), they are accordant.

Fig. 4 provides very good data foundation for the parameter of simulating models and soil density analysis in permafrost region of QTR. After data Stat., a conclusion is obtained that percent 93 of dry density value is distributed the range of 1.54~2.19 g/cm<sup>3</sup> in the depth of 10 m in QTR permafrost region.

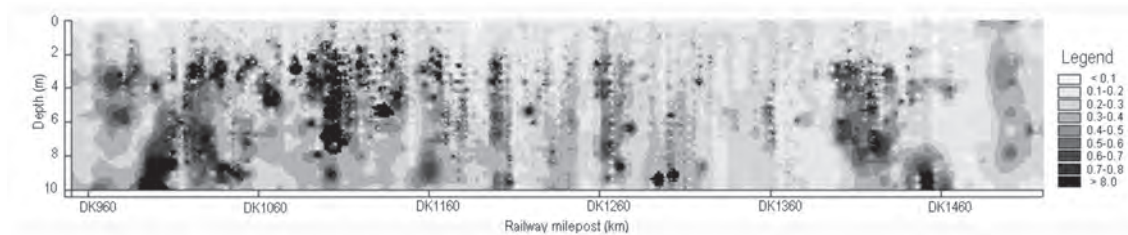


Fig. 3. The spatial interpolation distribution of ground ice along QTR.

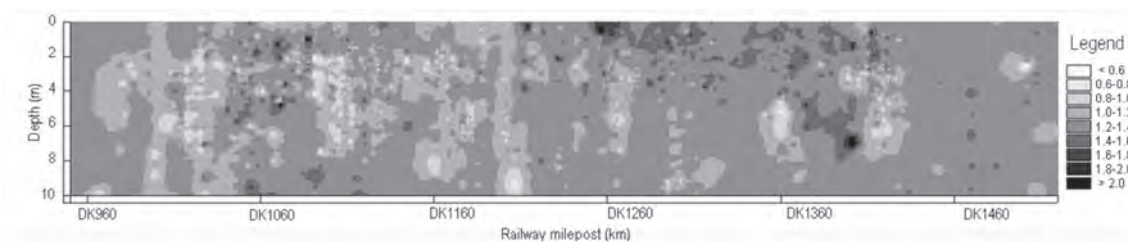


Fig. 4. The spatial interpolation distribution of dry density along QTR.

### Uncertainty Analysis

Spatial interpolation method uses the distance weighting between known points to unknown points to obtain continuous data distribution in whole space from the aspect of spatial statistics. As a matter of fact, accordingly, ground ice is influenced by many geographical elements. The top ground ice is nearly relevant to climate, landform, terrain and surface vegetation genre, and etc. the ground ice in lower ground layer is more relevant to the Mean Annual Ground Temperature (MAGT), geologic condition, ground water distribution, and etc. Consequently, the ground ice distribution estimated by spatial interpolation method must have some errors. Errors can't be reflected by spatial statistics. The errors estimation computed by Kriging can't reflect actual error distribution but only shows the amount and distribution of spatial data.

In order to overcome above questions, we need grasp the geologic constitution and synthetically take into account every factor affecting ground ice by making use of existing knowledge along QTR further. We can use composite interpolation methods to get the distribution of ground ice. If ground penetrating radar technique is advanced enough to be applied to reconnoiter along QTR, auto-decipher method of the distribution of ground ice can come out, the result is more authentic.

Furthermore, Fig. 1 and Fig. 2 show that ground ice data points analyzed are distributed fittingly. Though many borehole data is devoid of

deep layer information, the absent data influence interpolation results little because we concern the distribution of permafrost active layer much more, which is just the depth of surface to about 5 m depth. The interpolation results will be used to calculate roadbed settlement quantity. By reason of climate temperature rising along QTR, the increaser value of active layer thickness will lead more ground ice thaws. The roadbed settlement quantity of QTR for more thaw ice can be obtained.

### Conclusion

Ground ice is an important element of frozen soil, and studying ground ice of frozen soil is the pivotal direction for geocryological research. The content change of ground ice in frozen soil affects the engineering geological quality of frozen ground and the constructions stability in permafrost regions. In this paper, the borehole water content and density by Qinghai-Tibet Railway are collected. After transforming borehole water mass content and density to volumetric ice content and dry density respectively, spatial interpolation method (IDW) is applied in horizontal direction and upright direction respectively of QTR. It turns out to be the spatial distribution of ice volume content and dry density along QTR. The depth interval of upright interpolation is 10 cm, and the distant interval of horizontal interpolation is 1 km. The interpolation results provide all-sided, systemic, intuitionistic data foundation and method for appraising ground ice in permafrost region.

### Acknowledgements

This work was supported by Research Funding from the Important Orientation Projects of the CAS (KZCX2-YW-Q03-04), the China State Key basic Research Project (2007CB411506), and the Project of National Natural Science Foundation of China (40701030), the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No. 41030741).

### References

1. Guodong C., Boliang T., Xuobo L. 1981. Two important problems of embankment construction in the section of massive ground ice. *Journal of Glaciology and Geocryology* 2: 6-12. (In Chinese)
2. Jarvis, C.H., Stuart N.A. 2001. Comparison

among strategies for interpolating maximum and minimum daily air temperatures. Part II: The interaction between number of guiding variables and the type of interpolation method. *J Appl Meteor* 40 (6): 1075-1084.

3. Xin L., Guodong C., Ling L. 2000. Comparison of spatial interpolation methods. *Advance in Earth Sciences* 15 (3): 260-265. (in Chinese)

4. Price D.T., McKenney D.W., Nalder I.A. et al. 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agri Forest Meteor* 101(2 - 3): 81 – 94.

5. Zimmerman D., Pavlik C., Ruggles A. et al. 1999. An experimental comparison of ordinary and universal Kriging and inverse distance weighting. *Math Geo* 31 (4): 375 – 390.



## Vehicles loading effects on thawing embankment

Xiaoliang YAO, Jinlin QI

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: yaoxl@lzb.ac.cn

**Abstract.** Vehicle loading is always a serious threat to embankment engineering stability, especially to the thawing ice rich embankment. A new numerical simulation method was proposed by combining large strain thaw consolidation theory and Mohr-Coulomb model to reveal the vehicle loading effects on thawing ice rich embankment. Simulating platform was developed based on FLAC3D. According to simulating results, for ice rich embankment with thaw bubble, the embankment destruction caused by vehicles loading mainly occurred in the first month after embankment beginning thawing. Pavement displacement near tire/pavement contacting position is much larger than other locations, which means that pavement local destructions were mainly caused by vehicle loading. Plastic yielding first took place in the area near tire/pavement contacting position, and then near the embankment slope toe. Special measurements must be taken into consideration to prevent embankment damages in cold regions engineering.

**Keywords:** vehicles loading; ice rich embankment; local destructions.

## Влияние транспортной нагрузки на насыпь при оттаивании льдистых грунтов основания

Сяолян ЯО, Цзиньлинь ЦИ

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов  
АН КНР  
Китай, 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: yaoxl@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Нагрузки от движущегося транспорта представляют серьезную угрозу для устойчивости земляного полотна дорог, особенно при оттаивании льдистых грунтов основания. Для оценки влияния транспортных нагрузок на насыпь при оттаивании льдистых грунтов основания предложен новый метод численного моделирования, основанный на совместном использовании теории консолидации при оттаивании, сопровождающейся большими деформациями, и зависимости Мора-Кулона. Моделирование выполнено на платформе FLAC3D. Результаты показывают, что в случае развития чаши оттаивания в льдистом основании разрушающие деформации в насыпи от транспортных нагрузок в основном происходят в течение первого месяца после начала оттаивания. Деформации дорожного покрытия в местах контакта с колесами значительно больше, чем на других участках. Это свидетельствует о том, что локальные разрушающие напряжения вызваны в основном транспортными нагрузками. Пластическая деформация сначала происходит у мест контакта покрытия с колесами, затем у подошвы откоса насыпи. Для обеспечения устойчивости насыпей на льдистых грунтах необходимо предусматривать специальные мероприятия.

**Ключевые слова:** транспортные нагрузки; насыпь на льдистых грунтах; локальные деформации.

# Vehicles loading effects on thawing embankment

Xiaoliang Yao, Jinlin Qi

## 1. Introduction

During thaw consolidation of ice-rich frozen soil, large amount of pore water is drained out and soil volume decreases subsequently, resulting in large settlements of various constructions. This is a typical large strain problem in cold regions engineering. Investigation on Trans-Alaska pipeline indicated that most of the thaw settlement occurred in the sections with ice-rich permafrost [1]. Various investigations on Qinghai-Tibet high way and railway have indicated that continuous thawing of underlain frozen soil is also one of the main causes of the embankment settlements [2]-[5]. The embankment sections damaged from thaw settlement usually lie in the sites underlain by permafrost with high ice content [6], especially under long term vehicle tires rolling, some pavement local damages occur, such as pavement low-lying and boiling [7]. With the development in permafrost regions, there will be more and more infrastructures constructed, special care must be taken in ice rich embankment destructions caused by vehicles long term rolling.

In recent decades, attentions have been paid to large strain behavior of consolidation for conventional soils, i.e., unfrozen soils. The one dimensional large strain consolidation theories in convective coordinates were proposed by Mikasa [8] and Gibson et al. [9], [10]. Based on Gibson's work, large amount of experimental and theoretical work has been carried out to study the 1-D large strain behavior and theory of soft soil consolidation [11]-[14]. To deal with engineering problems with complex boundary conditions, two main kinds of three dimensional large strain consolidation theories were proposed based on Continuum mechanics: one of the theories was based on Eulerian description [15] and the other one was based on Lagrangian description [16].

When consolidation theory and frozen soil thawing boundary were combined together, it was the so-called thaw consolidation theory. According to Gibson's 1-D large strain consolidation theory and thawing boundary, Foriero and Ladanyi [17] set up large strain thaw consolidation theory for frozen soils. Correspondingly, the theory is only limited to 1-D. Based on the consideration, Yao proposed a 3-D large strain thaw consolidation theory [18], in which the large strain consolidation based on Eulerian description and thermal conductive equations

were employed. However, the theories mentioned above are all only focused on the deformation. When the destruction occurred for the local stress concentration, there would be some limitations for the large thaw consolidation theory.

This paper will deduce a new theory based on 3-D large strain thaw consolidation theory and Mohr-Coulomb model to study local destruction of the thawing ice rich embankment caused by vehicle tires rolling. The corresponding numerical simulation will be implemented based on FLAC3D platform.

## 2. Governing equations and numerical implementation

### 2.1 Governing equations

Suppose that the frozen domain is impermeable and incompressible, consolidation only occurs in the post-thawed domain. In Eulerian description

the symmetric deformation rate tensor  $\overset{\square}{\varepsilon}_{ij}$  and skew-symmetric spin tensor  $\overset{\square}{\omega}_{ij}$  are given as,

$$\overset{\square}{\varepsilon}_{ij} = \left( \frac{\delta v_i}{\delta x_j} + \frac{\delta v_j}{\delta x_i} \right) / 2 \quad \overset{\square}{\omega}_{ij} = \left( \frac{\delta v_j}{\delta x_i} - \frac{\delta v_i}{\delta x_j} \right) / 2 \quad (1)$$

where  $v_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) is the instantaneous rate of deformation of the material point. In order to offset the rotational effect due to large strain, the stress rate  $d\sigma_{ij}/dt$  is corrected as

$$\overset{\vee}{\sigma}_{ij} = \frac{d\sigma_{ij}}{dt} - \sigma_{ik} \overset{\square}{\omega}_{kl} - \sigma_{jk} \overset{\square}{\omega}_{kj} \quad (2)$$

The constitutive equation can be written as

$$\overset{\vee}{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \overset{\square}{\varepsilon}_{kl} - \delta_{ij} p \quad (3)$$

where  $p$  is pore pressure. The Darcy's law is used to describe the fluid behavior,

$$q_i = -k(p - \rho_w x_j g_j)_i \quad (4)$$

where  $q_i$  (m/s) is the superficial velocity of the fluid relative to the soil skeleton,  $k$  (m/s) is the hydraulic permeability of soil,  $\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>) is the fluid density and  $g_j$  (N/kg) is the gravity.

It is assumed that the volumetric change of skeleton is equal to the volumetric difference of the fluid flow into and out of a specified physical element. Taking into consideration the fluid and solid particle compressibility, the conservation equation can be written as [19]

$$-q_{i1} + q_v = \frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}, \varepsilon_v = \varepsilon_n (i=1,2,3) \quad (5)$$

where  $q_v$  (1/s) is the volumetric fluid source intensity,  $\alpha$  is the Biot coefficient,  $M$  (N/m<sup>2</sup>) is the Biot modulus. If  $\alpha$  is equal to unity, the grains are considered to be incompressible and the Biot modulus  $M$  is equal to  $K_w/n$ , where  $K_w$  (N/m<sup>2</sup>) is fluid bulk modulus and  $n$  is porosity.

The medium motion behavior can be described by motion equation as follows:

$$\sigma_{ij} + \rho g_i = \rho \frac{av_j}{dt} \quad (6)$$

where  $\rho$  is the medium density.

Equations 1-6 describe the consolidation behavior in an unfrozen domain, considering large strain effects.

With regard to thaw consolidation of permafrost, the unfrozen domain is only the post-thawed domain, which must be determined by examining the thermal status of the whole soil body after employing thermal conductive laws as follows

$$-h_{v1} + h_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} (h_i = -\lambda T_i) \quad (7)$$

where

$$c = \begin{cases} c_u & (T > T_p) \\ c_f + \frac{c_u - c_f}{T_p - T_b} (T - T_b) + \frac{L}{1+W} \frac{\delta W_i}{\delta T} & (T_b \leq T \leq T_p) \\ c_f & (T \leq T_b) \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_u & (T > T_p) \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{T_p - T_b} (T - T_b) & (T_b \leq T \leq T_p) \\ \lambda_f & (T \leq T_b) \end{cases} \quad (9)$$

where

$h_v$  (W/m<sup>3</sup>) is the volumetric heat source intensity;

$c$  (J/kg·K) is the specific heat considering ice-water phase change,  $c_u$  and  $c_f$  are the specific heat of post-thawed and frozen soil, respectively;

$L$  (J/kg) is the water latent heat;

$\gamma$  (W/m·K) is the thermal conductivity,  $\gamma_u$  and  $\gamma_f$  are the thermal conductivity of post-thawed and frozen soil;  $W$  and  $W_i$  (%) are the water and ice content;

$T_p$  and  $T_b$  (°C) are the upper and lower temperature limits of phase change.

The Mohr-Coulomb yield function is employed to describe the local destructions caused by vehicles loading as follows:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} = 0 \quad (10)$$

in which  $C$  is cohesion,  $\phi$  is friction angle,

$$N_\phi = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$$

## 2.2 Numerical implementation

The numerical simulation was implemented with geotechnical soft FLAC3D [20]. Thermal calculation was performed at first with the consolidation calculation being temporarily suppressed; then simulation on consolidation was carried out within the post-thawed domain, in which the Mohr-Coulomb yield function was used to examine the shear plastic area, while the thermal calculation mode was temporarily suppressed. Therefore, a cycle of coupled thermal-consolidation analysis consisted of two stages:

1. Thermal stage: based on the initial temperature field at time  $t_0$ , thermal calculation was implemented for a time step  $\Delta t$ . Then the post-thawed domain was detected at time  $t_0 + \Delta t$ .

2. Consolidation stage: in the post-thawed domain, consolidation calculation and Mohr-Coulomb model was performed for the time step  $\Delta t$ .

The calculation cycle will not stop until the target time was achieved.

## 3. Engineering example

### 3.1 Engineering parameters and numerical model

Fig. 1 is the engineering geological conditions and numerical model of the studied cross section. The pavement width is 7.5 m (3.75 m for one half). Embankment height is 3 m. In this calculating model dimension, there are four soil classifications, i.e. Artificial Soil, Silty Clay, Clay and Mud Rock. The thermal and mechanical parameters needed for calculation are listed in Table 1.

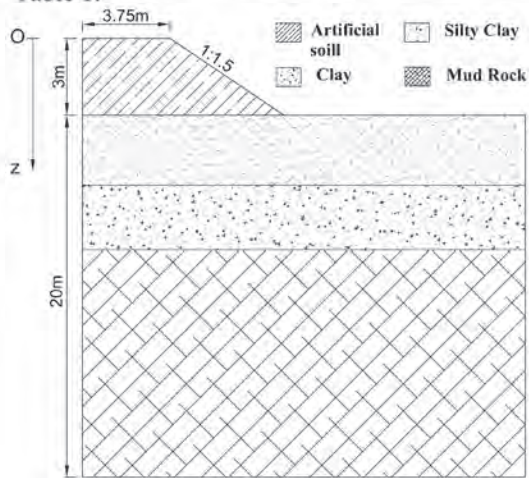


Fig. 1. Calculating model.



Table 1. The parameters for calculation

Soil Classification	Artificial Soil	Silty Clay	Clay	Mud Rock
Depth range (m)	0-3	3-5	5-10	10-20
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2000	1800	1600	2000
Water content (%)	10	20	50	15
Specific heat (J/kg·C)	Post-thawed	2250	2400	1650
	Frozen	1750	1750	1250
Thermal conductivity (W/m·C)	Post-thawed	1.7	1.3	0.86
	Frozen	1.2	1.5	1.45
Es (MPa)	1.5	1	0.4	5
Poisson's ratio	0.25	0.25	0.3	0.25
Hydraulic permeability (m/s)	5.0e-7	5.0e-7	5.0e-8	1.0e-9
Cohesion (kPa)	80	50	5	80
Friction angle (°)	30	25	10	20

### 3.2 Boundary conditions

#### (a) Thermal boundary

According to the observation file, the change of temperature in pavement middle, shoulder and earth's surface obeys the law of sines, i.e.

$$T = T_0 + \alpha t + l \sin(2\pi \frac{t}{365} + n\pi) \quad (11)$$

where  $T_0$  is annually average temperature,  $l$  is temperature swing,  $\alpha$  is the annually temperature increment rate (0.02°C/a), see Table 2. Fig. 2 is the initial temperature. It can be found that there existing a thaw bubble in the embankment.

Table 2. Temperature swing and annually average temperature

Position	Temperature swing (°C)	Annually average temperature (°C)
Pavement middle	14	4
Pavement shoulder	9	3
Earth's surface	5	-0.5

#### (b) Mechanical boundary

The self-weight and vehicle loading are both taken into consideration. Vehicle loading was applied as line loading (500 kPa) on pavement in the range of 0.5-1.0m and 3-3.5m from middle pavement. On model left and right boundary, displacement was fixed in horizontal direction. The vertical displacement was fixed when soil

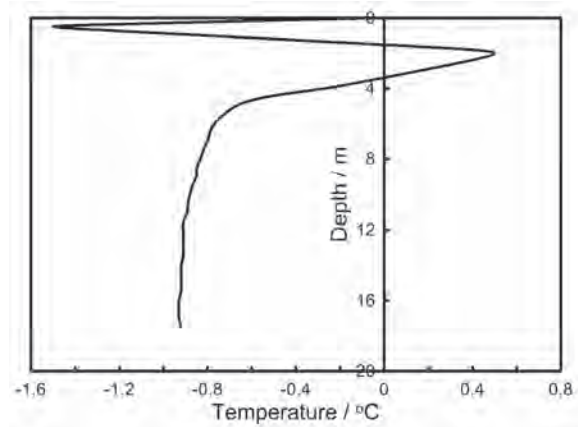


Fig. 2. Initial temperature.

was frost, and free when soil was post thawed. It was impermeable for the asphalt pavement and frozen soil. When the pavement shoulder and earth's surface were post-thawed, the pore water was free for drainage.

### 4. Calculating results and analysis

Fig. 3 and Fig.4 are the developments of pavement displacement, thaw depth and shear plastic area after the embankment post-thawed. It can be found that after a short time of 5 days of the embankment beginning thawing, the pavement displacement and shear plastic area increase greatly. The reason leading to such a suddenly changing is that there exists a layer of post-thawed soil (thaw bubble) in the embankment (Fig.2). After the embankment top layer post-thawed, a large area with high compressibility and low strength exposed. Under self-weight and concentrated vehicles loading, deformation and shear plastic area developed rapidly.

According to Fig.3 and Fig.4, pavement displacement, thaw depth and shear plastic area developed considerably in 30 days after the embankment began thawing. From 30 to 50 days, all those changed slowly. During a short period after embankment beginning thawing, the frozen layer between pavement and thaw bubble was post-thawed quickly and a large unfrozen area was formed, the pore water was drained out quickly, deformation and shear plastic area greatly developed correspondingly. After 30 days, the thaw depth changed slowly, and the changing rate of pavement displacement and shear plastic area began to slow down, for most of the pore water was drained out before. It is can be concluded that, for the ice rich embankment with thaw bubble, the embankment destruction caused by vehicles loading mainly occurs in the first month after embankment begins thawing.



It is also can be found that the largest displacement occurred near tire/pavement contacting position (Fig.3) and shear plastic area developed near the same position, which means that the vehicles loading is the main reason leading to pavement local destruction for ice rich embankment. In addition, the slope toe can also be destructed by self-weight and vehicles loading (Fig. 4). The shear plastic area occurred in slope toe area later than in the area near pavement, it is about 15 days after embankment post-thawed. Special measurements must be taken to keep embankment slope stable.

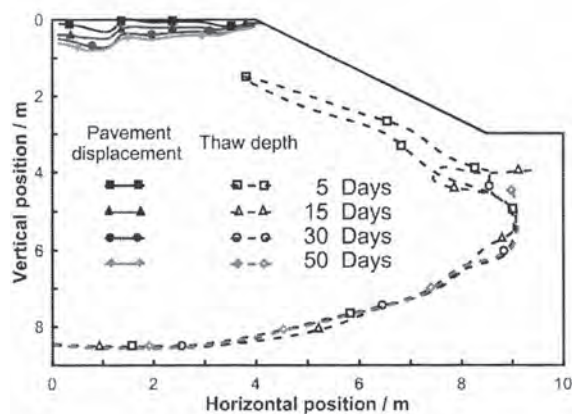


Fig. 3. The development of pavement displacement and thaw depth after embankment post-thawed.

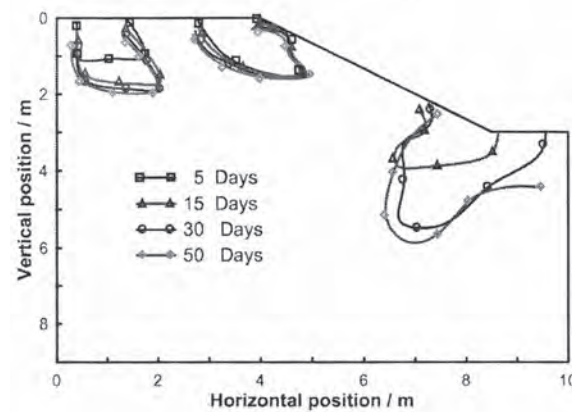


Fig. 4. The development of shear plastic area after embankment post-thawed.

## 5. Conclusion

This paper proposed a new method by combining the 3-D large strain thaw consolidation theory and Mohr-Coulomb model together and developed the corresponding simulation platform based on FLAC3D. The vehicle loading effects on thawing ice rich embankment with thaw bubble were studied. It can be concluded that:

(1) Vehicles loading is the main reason leading to pavement local destruction for ice rich embankment.

(2) The area destructed by vehicles loading also includes slope toe. The shear plastic area in slope toe developed continuously after embankment post-thawed.

(3) The embankment destruction caused by vehicles loading mainly occurred in the first month after the embankment beginning thawing.

## Acknowledgments

This work was supported in part by Foundation for Excellent Youth Scholars of CAREERI, CAS granted to Dr. Xiaoliang Yao, and the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Self-determinating Projects (No. YOSF105001 and No. 09SF102005).

## References

1. Waters, E. 1974. Heat pipes to stabilize piles on elevated Alaska Pipeline sections. *Pipeline Oil and Gas Journal*, August: 46-58.
2. Cheng, G.D. 2005. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology* 42(2): 169-176.
3. Ma, W., Cheng, G.D., and Wu Q.B. 2009. Construction on permafrost foundations: Lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad. *Cold Regions Science and Technology* 59(1): 3-11.
4. Wu, Q.B., Lu Z.J., Zhang T.J., Ma, W., and Liu Y.Z. 2008. Analysis of cooling effect of crushed rockbased embankment of the Qinghai-Xizang Railway. *Cold Regions Science and Technology* 53(3): 271-282.
5. Wu, Q. B., Liu, Y. Z. and Zhang, J.M. 2002. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, China. *Permafrost and Periglacial Processes* 13(3): 199-205.
6. Liu, Y.Z., Wu, Q.B., Zhang, J.M., and Sheng, Y. 2002. Deformation of highway roadbed on permafrost regions of the Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24(1): 10-15.
7. Wu, Z.W., and Liu, Y.Z. 2005. *Frozen Ground Engineering*. Beijing: Haiyang Press. (in Chinese)
8. Mikasa, M. 1965. Consolidation of soft clay. *Japan Society of Civil Engineers*, 1965: 21-26.
9. Gibson, R.E., Schiffman, R.L., and Cargill, K.W. 1981. The theory of onedimensional consolidation of saturated clays: II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. *Canadian Geotechnical Journal* 18(2): 280-293.

10. Gibson, R.E., England, G.L., and Hussey, M.J.L. 1967. The theory of one dimensional consolidation of saturated clays: I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. *Geotechnique* 17(2): 261–273.
11. Morris, P.H. 2003. Compressibility and permeability correlations for fine-grained dredged materials. Int. J. Surf. Min. Rec. Environ. Technical Note. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 129(4): 188-191.
12. Olson, R.E. 1977. Consolidation under time dependent loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* GT1: 55-60.
13. Schiffman, R.L., and Cargill, K.W. 1981. Finite consolidation of sedimenting clay deposits. In: *Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, Rotterdam: Balkema, 239-242.
14. Xie, K.H., and Leo, C.J. 2004. Analytical solutions of one-dimensional large strain consolidation of saturated and homogeneous clays. *Computers and Geotechnics* 31: 301-314.
15. Carter, J.P., Small, J.C., and Booker, J.R. 1977. A theory of finite elastic consolidation. *International Journal of Solids and Structures* 13: 467–78.
16. Chopra, M.B., and Dargush, G.F. 1992. Finite element analysis of time-dependent large-deformation problems. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 16(2): 101-130.
17. Foriero, A., and Ladanyi, B. 1995. FEM assessment of large-strain thaw consolidation. *Journal of Geotechnical Engineering* 121(2): 126-138.
18. Yao X.L. 2010. Theoretical and Application Study on Thaw Settlement of Frozen Soils. Chinese Academy of Sciences Dissertation for Ph.D.
19. Biot, M.A. 1973. Non-linear and semi-linear theory of porous solids. *Journal of Geophysical Research* 78: 4924-4937.
20. Itasca. 1999. *FLAC Manual: Theoretical Background*. Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN.

# Analysis on the potential problems of constructing high-grade highway in permafrost regions

Qihao YU, Jun HU, Jin QIAN, Yanhui YOU

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: yuqh@lzb.ac.cn

**Abstract.** The countermeasures for some possible problems which may arise in the construction of highways or in the application of some typical engineering measures in permafrost regions are analyzed, within the context of high grade highway construction and development in China. Previous research results found the essential difference of heat source, heat transfer process, and heat transfer intensity between railway and highway or high grade highway existing. So, it is predictable that scientific research achievements acquired from Qinghai-Tibet Railway will be difficult come up to the requirements of high grade highway construction. At the same time, more severe challenge in the construction and security operations of high grade highway in permafrost regions would be faced, due to stronger heat absorption, heat collection of high grade highway and higher road construction standards, which also come up with higher standard of the validity of embankment temperature regulated measures. The experimental results and observed data of embankment temperature-regulated measures in convection, conduction and radiation indicated that problems may be solved by development, improvement or combination of engineering measures based upon thermal characteristics of high grade highway, besides, the improved way of the construction measures also be discussed. Those discussion and research results will make an available effect for research and design of high grade highway in permafrost regions.

**Keywords:** permafrost; high grade highway; construction; problems analysis.

## Анализ потенциальных проблем при строительстве высокоскоростных автодорог в криолитозоне

Цихао ЮЙ, Цзюнь ХУ, Цзинь ЦЯНЬ, Яньхуэй Ю

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов  
АН КНР

Китай, 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: yuqh@lzb.ac.cn

**Аннотация.** В рамках долгосрочной программы по созданию системы скоростных автомобильных дорог в Китае предусмотрено строительство автомагистралей в районах распространения многолетнемерзлых пород. В докладе дан анализ возможных проблем при строительстве автодорог в криолитозоне, а также используемых в настоящее время способов обеспечения их устойчивости. Проведенные ранее исследования показали, что количество теплоты, поступающей на элементы насыпи железнодорожных и автомобильных магистралей, существенно отличаются. Поэтому опыт строительства Цинхай-Тибетской железной дороги может оказаться недостаточным применительно к высокоскоростным автодорогам. Строительство автомагистралей в криолитозоне будет сопряжено с более существенными трудностями в связи с большим поступлением тепла в насыпь, а также более высокими требованиями к устойчивости поверхности, и соответственно к терморегулированию грунтов. Результаты экспериментальных исследований с использованием различных способов терморегуляции насыпей (уменьшение поступления солнечной радиации, регулирование кондуктивного и конвективного теплопереноса) показывают, что проблему можно решить путем разработки новых и усовершенствования существующих способов или совместного их использования с учетом особенностей теплообмена на поверхности насыпи автодорог. Изложенный анализ предшествующего опыта и наших экспериментов будет полезным при проектировании высокоскоростных автомагистралей в криолитозоне.

**Ключевые слова:** криолитозона; высокоскоростная автомагистраль; строительство; проблемный анализ.

# Analysis on the potential problems of constructing high-grade highway in permafrost regions

Qihao YU, Jun HU, Jin QIAN, Yanhui YOU

## Introduction

Balancing the vulnerable permafrost, ecological environment and human activities always puzzles the engineering construction in permafrost regions. Due to the stronger heat absorption of the black asphalt pavement in permafrost regions, it accelerates the permafrost degradation under the ground. Taken Qinghai-Tibet highway (QTH) as an example, the average temperature under asphalt road in summer is higher than the natural ground [1], and the black asphalt road can absorb about 18% more energy, and its thawing period is also relative longer than natural ground [2]. Permafrost thawing was endangering the stability of the roadbed and caused serious thawing-settlement problems, which account for 83.4% of the total damages of roadbed in permafrost regions [3]. Up to date, it is still not totally solved yet [4]. Along with gradually proceeding of state high-grade highway planning [5], about 30% of high-grade highway will cut through seasonal frozen-soil regions and about 2% through permafrost regions, particularly the Qinghai-Tibet high-grade highway will cut through the largest permafrost regions. For higher technical requirements of the high-grade highway and its stronger heat absorption than normal highway, which make frozen-soil engineering problems more prominent, and cause more difficulties for engineering construction.

A great variety of experiences were acquired from the successful Qinghai-Tibet railway (QTR) construction, which was based on the strategy of active cooling roadbed [6] and can provide some important references for future engineering construction in permafrost regions. However, due to the essential difference of heat transfer process in the embankments between highway and railway, the feasibility of previous successful experiences directly applied to high-grade highway, and how to give full scope to the cooling effects, and incoming new problems have always been being one of the important problems to be solved. So existing problems at present, the nature and reasons of the potential problems in high-grade highway construction, and the potential problems of some engineering measures and solutions which in their application will be analyzed in the paper, besides, some recent preliminary experimental advances in

Qinghai-Tibet Plateau were introduced. By these analyses, it may give some helpful instructions to the Qinghai-Tibet high-grade highway construction.

## Embankment heat transfer process analysis

The heat transfer process and characteristics in the embankment are basic reason for temperature variation in embankment in different way. Understanding the heat transfer process in different engineering condition can radically comprehend the cooling effect of engineering measures in permafrost regions. Besides, geography environments, frozen soil, engineering geological conditions and so on, the heat transfer process is primarily influenced by engineering types.

In thermal boundary of roadbed, according the boundary layer theory [7], the gravel surface temperature of the embankment is 1.5-4.0°C higher than the natural ground surface, which causes higher temperature field in the embankment than the natural ground. Therefore, the heat transfer process of embankment can transfer more heat down to frozen soil than natural ground. For the common highway, the temperature under the asphalt surface is 10 to 15°C higher than that of the natural ground in summer, and the temperature difference in winter is nearly same at that in warm permafrost region; while in cold permafrost regions the difference of them in summer is 5 to 10°C [8]. Following with the asphalt surface cover on Qinghai-Tibet highway in Qingshuihe, where in the middle of and belong to the warm permafrost, the measure date shows that the input heat at the road surface is 4 times of the output, and thaw bulb of frozen-soil roadbed come out after three year, and increase year by year [2]. For different engineering, when comparing the surface temperature of QTH and QTR, the former can be 3-4 times higher than the latter, even reaches about 6 times at extreme conditions. Therefore, the heat absorption of road surface, namely the temperature boundary is the main difference of heat transfer process between highway and railway. With help of numerical simulation of the heat transfer in these two kinds of roads, it shows that the different road surface can cause obvious distinction of heat absorption paths and intensity [9]. It is mainly summarized as



following: Firstly, the heat resources are different. The main heat resource of railway is from embankment slopes and total heat absorption from road surface is close zero; while the heat absorption of highway embankment slopes is almost the same as railway, and the main heat resource is from road surface, the heat absorption in road surface is about three times of the embankment slope. Secondly, the characteristics of the intensity of heat absorption are different in the two kinds of embankments. The total heat absorption flux in the highway embankment is 3.1 times of the railway embankment. The distribution of the heat flux at the bottom of the railway embankment is different from highway embankment. It mainly distribute at the side of railway embankment, while it concentrates at the center of the highway embankment. Therefore, the impacts of these two characteristics on engineering diseases are different. For instance, thawing settlement and concave surfaces mainly occur in asphalt surface of highway (Fig. 1a), and less creep at the embankment slopes, while it is reverse in the railway, and which can easily cause lengthwise cracks [10] (Fig. 1b). For the high-grade highway with the similar heat transfer characteristics of common highway, mean annual heat flux at the bottom increases by 60% than the normal highway, when the width of the road surface increases from 7 m to 13 m. Furthermore, increased heat flux mainly concentrates at the center of embankment, which strengthens the heat absorption in the embankment center and speeds up the permafrost degradation by 1.6 times.



(a)



(b)

Fig. 1. Embankment lengthwise cracks in different engineering.

From above discussions, same conclusions can be arrived at as following. On the one hand, compared highway embankment with railway embankment, the heat transfer process, intensity

of heat flux and its distribution are essentially different. For the high-grade highway, the heat concentration is further strengthened and permafrost degradation is also speed up. For this reasons, many research results from the Qinghai-Tibet railway are probably difficult to be directly applied in highway engineering. For example, the successful experience of thermosyphon pipe in Qinghai-Tibet railway was applied in the experimental section of Qinghai-Tibet highway at Qingshuihe in 2005, but in 2007 there are some damages, such as uneven settlement, embankment shoulder cracks and so on. Thus, combining with the heat transfer characteristics of highway and successful experiences, it needs some improvements or innovations. On the other hand, due to the higher engineering standards of high-grade highway than common highway, the engineering damages should be more prominent and common. If these problems can't be known and handled, it will cause a big challenge to its construction and maintain. Therefore, the key engineering problems should be paid enough attention at the beginning of high-grade highway construction.

#### Analysis on the application of engineering measures

The research results from Qinghai-Tibet railway and highway can provide some important references for the construction of the high-grade highway. Analysis on the applicability of engineering measures applied in previous engineering is very important for high-grade highway design. Thereinafter, the applicability of existing measures will be analyzed from the different heat transfer process in radiation, conduction and convection.

#### *The measures in radiation control*

To control the solar radiation, some measures, such as white colored road surface, light colored asphalt or concrete road surface applied in previous highway experiments, were used to decrease the heat absorption through lightening the color of road surface and increasing light reflection [11]. Some measures like sun-shading board, sun-shed, crushed-rock slope were tested in the highway and railway, and sun-shading board, crushed-rock slope were the prior measures studied [12], [13].

The cooling mechanisms of them are discussed as following. The cooling mechanisms of sun-shading board lie on three aspects [14]. First of all, shading radiation from the sun is the main function of the sun-shading board. Secondly, air convection under the board can remove the heat from board and its secondary radiation.

Thirdly, the chimney effect can strengthen the air natural convection. So, the sun-shading board can make the soil temperature under the board lower than normal ground surface temperature. The cooling mechanism of crushed-rock slope mainly include natural convection and thermal isolation in the crushed-rock layer, which can alternately take place in the crushed-rock layer within large pore space during day and night and seasons change [15]. Because the main medium of the crushed-rock layer is stone and its thickness is limit, it has thermal isolation effects, but thermal isolation is very small, and the main cooling mechanism is natural convection in the crushed-rock layer. From above comparison, the main difference between sun-shading board and crushed-rock slope is from the air movement. The liquidity of the air under sun-shading board is much better than that in the crushed-rock slope, thus their cooling effects are distinct.

The experiment, with the road embankment slope being covered with crushed rock, was conducted in the region with mean annual ground temperature  $-0.7\sim-1.1^{\circ}\text{C}$ . The measuring date show that, with the crashed rock layer being 80 cm in thickness and the radius of the crushed rock being 6~8 cm, the mean annual ground temperature in the depth of 30 cm under the slope is  $3.2^{\circ}\text{C}$  at sunny slope, and  $2.6^{\circ}\text{C}$  at shady slope, while they are  $4.6^{\circ}\text{C}$  and  $0.69^{\circ}\text{C}$  in the contrastive test section without crushed-rock slope respectively [16]. The above results verified that the crushed-rock slope can weaken the shady-sunny effect and decrease the magnitude of slope temperature, which can delay the warming effect, but it cannot effectively cooling the embankment temperature. For this reason, this kind of measures or structures are nor suitable for highway. The similar experiment was conducted in Qinghai-Tibet railway in the region with mean annual ground temperature  $-1.4\sim-1.6^{\circ}\text{C}$ . In the test sections of small crushed-rock protected slope and large crushed-rock protected slope, where the radius being 5~8 cm in small crushed-rock and 40~50 cm in large crushed-rock respectively, and the thickness of the crushed-rock slope all are 80 cm, its results showed that the mean annual temperature at the depth 20 cm under the slope surface was  $0.11^{\circ}\text{C}$  in small crushed rock section and  $-0.4^{\circ}\text{C}$  in large crushed rock section [17]. Due to the unsatisfactory cooling effect, the weak cooling effect of crushed-rock slope measure can not counteract the future climate warming in the unstable warm permafrost region, where the mean annual ground temperature is not lower than  $-0.5^{\circ}\text{C}$ , and in stable warm permafrost

region where the mean annual ground temperature is higher or equal  $-1^{\circ}\text{C}$  but lower than  $-0.5^{\circ}\text{C}$  [18].

In contrast, the cooling effect of sun-shading board is more obvious. In the experimental section of Qinghai-Tibet railway, the cooling effect of sun-shading board came out just after one year of the construction. The average temperature of the embankment is lower than the normal embankment, and particularly at the sunny-side road shoulder it is lower  $3\sim 5^{\circ}\text{C}$  [19], the similar result also appeared in the section with sun-shading board at Beiluhe. In general, the sun-shading board can lower  $3.2^{\circ}\text{C}$  in the slope, and lower about  $1.5^{\circ}\text{C}$  in average than the natural ground, and even can reach  $4.5^{\circ}\text{C}$  at maximum [20].

To sum up, the crushed-rock slope can prevent the slope from being eroded by the rain, but its cooling effect can not meet the engineering requirements. Besides, along with the climate warming its cooling effect in the railway with gravel road surface can not meet requirements, so it should be more difficult for the highway with stronger heat absorption to take effects. Although the test results of sun-shading board verified its obvious cooling effect, its stability and applicability still challenge the engineering application. For example, the experimental section with sun-shading board of Qinghai-Tibet railway in Beiluhe was forced to give up after 3 year because of the wind-protected board destroyed in extreme weather, such as low temperature, strong wind and so on (Fig. 2). Therefore, new measures with better cooling effect and good engineering stability are still been demanding in radiation control. The ventilated hollow concrete blocks showed a good indication [20], which should be paid more attention to high-grade highway application in future.



Fig. 2. Scene after sun-shading board destroyed in winter in Qinghai-Tibet railway.

### *Heat conduction control*

The main cooling measures, such as crushed-rock bottom embankment, crushed-rock slope, thermosyphon pipe, thermal isolated material, or their combination, were applied in Qinghai-Tibet railway [21]. The measure of thermal isolated material is used to decrease heat absorption of the embankment through increasing its thermal resistance. This measure can slow the warming of embankment, but it can not change warming trend of embankment [22]. It is not widely used in practice, because this negative measure can not effectively control the temperature of the embankment although it was studied very early. However, in practice, it could take effect if combining with other measures.

The lower temperature was found in the embankment with big crushed rock than that in the soil embankment in Soviet Union in 1969-1977 [23]. In 1973, the experiment at Reshui coal mine in Qinghai province in China verified that the mean annual temperature of the ground temperature under the embankment with crushed rock was lower  $-3.0\sim-3.5^{\circ}\text{C}$  than the nearby natural ground temperature, in which the 2.7-m-high embankment was built with crushed rock of radius 0.3m in the section with thick ground-ice [24]. The similar experiments verified that it can lower over  $5^{\circ}\text{C}$  in U.S.A [25]. Furthermore, the experiment in lab showed that this measure can lower about  $4.5^{\circ}\text{C}$  and attenuate the magnitude to  $9.1^{\circ}\text{C}$  in the bottom of 1.3-m-thick crushed-rock layer, in which the temperature of upper boundary was set a mean value of about  $0^{\circ}\text{C}$  and magnitude of  $15^{\circ}\text{C}$  [26].

During the alternation of seasons, the crushed-rock layer can take effect as a thermal semi-conductor, namely strengthening convection heat transfer in cold seasons and weakening the heat transfer in warm seasons, under the condition that if it exists classic Rayleigh—Bènard (R-B) convection [27]. However, the results were not as good as the expected in the crushed-rock bottom embankment in Qinghai-Tibet railway. In cold permafrost region, it is taking good effects, while it can not cool the embankment in the warm permafrost regions [28].

Through comparison on the structures of the embankment, it can be found that the crushed-rock bottom structure of Qinghai-Tibet railway is different from other embankments used before, because there is a soil layer over it, its thickness is usually more than 3 m. The fluctuation of soil temperature is strongly attenuated by thermal resistance of the upper soil layer, which can threaten the working conditions of thermal semi-conductor. The numerical simulation also showed

that the increasing thickness of upper soil layer can weaken the cooling effect of the crushed-rock bottom embankment, and the crushed-rock bottom embankment almost doesn't work in the center of the embankment when it is over certain thickness [29]. Furthermore, the radius of the rocks and thickness of the crushed-rock layer also influence its cooling effect. The experiments and numerical simulation showed that in the railway engineering the optimal radius range is 20-30 cm [30], and within the range of 0.6-2.0 m of the thickness its cooling effect increase with thickness [31].

With the result of heat conduction analysis of the embankment, copying the crushed-rock bottom measure in railway to the construction of highway could fail, particularly for high-grade highway, because of the strong heat absorption from surface and concentration of heat in the center of the embankment in highway. However, its excellent cooling effect could take into effect if the upper thermal boundary condition of the crushed-rock layer could be improved. For example, a compound embankment, with the ventilation ducts are put in the upper boundary of the crushed-rock layer, may effectively meet engineering requirements.

Besides, the thermosyphon pipe is one kind of measures to cooling embankment, which is impacted by several factors such as air temperature, wind speed, frozen period, and also the volume weight and soil water content. In the application of thermosyphon pipe, its freezing radius is one important design parameter [32]. The experimental results from Qingshuihe in Qinghai-Tibet railway have shown that the effective radius of the thermosyphon pipe is 1.4-1.6 m, and effective radius is no larger than 1.8 m, which were calculated from the relationship between the relative position of the borehole, and the relationship between ground temperature and depth [33], [34]. The similar results were found in experimental section of Qinghai-Tibet highway in Qingshuihe [35], and the effective radius of pipe estimated by numerical simulation is 2.25 m [36].

According to the design regulation [37], the pavement width of one side of the high-grade highway should be 13 m, and total width is more than 26 m, and the bottom width of one side of the embankment with 3-m-high should be 22 m. Previous design of pipes position such as inserting them in the embankment shoulders or vertically inserting at the foot of the embankment may not take effects in the high-grade highway because of the heat concentration in the center of the embankment [38]. Therefore, in consideration



of the characteristics of heat transfer in the high-grade highway, some suggestions are given as following. Firstly, the heat absorption from pavement should be weakened by measures like thermal isolated materials. Secondly, cooling area of the pipes should be in the center of the embankment with an oblique angle or L-shaped structure, which can effectively cool the ground temperature of the high-grade highway. Thirdly, the visual influence of the pipes along the high-grade highway can threaten the driving, which can be weakened or eliminated by changing the pipe shape or inserting the pipe in the middle of the slope.

#### *Heat convection control*

Heat convection control measures like crushed-rock bottom layer embankment, duct-ventilated embankment were used in Qinghai-Tibet railway [11]. Due to the double functions as natural convection and semi-conductor effect mentioned before, the main discussions here are about the duct-ventilated embankment with forced convection. The duct-ventilated embankment is designed as one embankment with parallel ventilated pipes at certain position in embankment. The experiments in lab [39], [40] and the application in the section of Qinghai-Tibet railway at Beiluhe showed that this measure is feasible and effective in engineering application for cooling roadbed. The field research results also showed that the net heat absorption became to heat release from the second freezing-thawing cycle, and then increased year by year after the construction of the duct-ventilated embankment [41]. The permafrost table increased by 2m and the temperature at the original ground surface was lower more 1°C than before at the third year after construction in 2004 [42].

From the analysis on the influence factors of ventilated pipe embankment, it showed that the larger radius of the pipes and the lower position, the better cooling effect were, besides the pipe interval can also impact its effect [43]. However, the wind in summer can strongly impact on its cooling effect. To weaken this impact, an automatically temperature controlled duct-ventilated embankment was applied in Qinghai-Tibet railway [44]. Its experimental results showed that this measure can effectively prevent the heat absorption in summer and strengthen the cooling effect. Compared with ventilated pipe embankment, it can prolong the heat release time about 40 days and improve the output heat flux and cooling effect more two times [45]. Furthermore, the soil between pipes have important impacts on its cooling effect, and the

shady-sunny effect can also appear in this kind of embankment. It was found that the temperature at depth 0.5 m in shady slope is higher 3.5-5.5°C than that in the sunny slope. When there is strong heat absorption from surface, the effect of ventilated pipe embankment would be influenced strongly. The numerical simulation showed that with the same structure of the embankment, the mean annual heat release at the bottom of the embankment with gravel surface is 469 J/h, while it is only about 96 J/h in the embankment with asphalt surface [46]. It is easy to weaken cooling effects when climate is warming or it is not proper design of the embankment.

Some further researches have been done for these problems. A new wide ventilated embankment was suggested, and its numerical simulation had showed that it can quickly and effectively cool the embankment [47]. The results also showed the ground temperature at depth 3 m is lower than that in the same depth of the natural ground after three year, and keeps lower 0.5°C after the fifth year, and man-made permafrost table quickly increases to the depth about 0.5 m and keeps stable. Besides, this measure successfully avoids the asymmetry problem of temperature field and strengthens the stability of the embankment in long term.

#### **New experimental engineering researches**

Under the requirements of state high-grade highway advance, the state key laboratory of frozen soils engineering did some experiments of the demonstration engineering of Qinghai-Tibet high-grade highway in Beiluhe in Qinghai-Tibet plateau (Fig. 3). Combining of the characteristics of the high-grade highway and engineering project, new control methods of frozen-soil ground temperature were studied thoroughly from the aspects of heat conduction, heat convection and radiation. It was the newest experiment including the newest measures. Considering the different heat transfer characteristics of different measures, the measures chosen in the experiment were designed to full take their cooling effects. One kind of measures with heat conduction control include the embankment combining L-shaped thermosyphon pipe and isolated thermal materials, the embankment combining ventilated pipes and closed crushed-rock bottom layer, the embankment combining ventilated pipes and open crushed-rock bottom layer, and the embankment combining crushed-rock bottom layer and slope of void concrete blocks. The second measures with heat convection controlling include the embankment with ventilated pipes, the embankment combining ventilated pipes



and thermal isolated materials, the embankment combining ventilated pipes and crushed-rock layers, and the wide embankment with ventilated pipes. The third kind of measures with heat radiation control include the embankment combining crushed-rock layer and slope with void concrete blocks and the void concrete blocks embankment. Along with the proceeding of this experiment, its coming results must provide scientific base and key technologies for the construction of the Qinghai-Tibet express highway.



Fig. 3. Experimental engineering of high-grade highway in Beiluhe of Qinghai-Tibet Plateau.

### Conclusions

Through above comparison of heat transfer process in the embankments of highway and railway, some conclusions can be summarized as following.

1) The research results received in Qinghai-Tibet railway can not directly applied to the highway engineering. Especially, the wide high-grade highway because of their essential distinction in heat transfer process. In application, chosen measures used in highway must accord with heat transfer characteristics of the highway. More challenges would be faced to build the high-grade highway, and solving the key problems must be paid more attention.

2) The choice and design of the engineering measures should be suitable to the heat transfer process of the high-grade highway. For the design discipline of engineering measures, firstly, preventing the heat absorption from the asphalt pavement should be emphasized, then effectively controlling the center heat absorption in the embankment is synchronous. Secondly, due to the comparative heat absorption from the slopes, it also should be applied some measures for controlling temperature of slope.

3) For radiation control, effective measures with good engineering stability should be chosen to certain engineering situations.

4) For the heat conduction control, the embankment with a crushed rock layer is still a perfect measure for high-grade highway, but its structure have to be modified to meet the working condition of the crushed-rock layer. Combination of different measures is good solution. The measure of thermosyphon pipe also should be adapted according the heat transfer characteristics of the highway, its main working position should be in the center of the embankment.

5) For the heat convection control, the forced convection mechanism in the wider embankment would fail, such as high-grade highway, while the embankment with ventilated pipes should be a perfect choice, because of small changes of working conditions. However, due to the important influence from the soil between pipes, the structure of ventilated embankment have to be improved, and some effective measures like automatically temperature controlled ventilated embankment should be noted.

### Acknowledgements

The research was supported by the West Plan of Action of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX2-XB2-10).

### References

1. Sheng Y., Liu Y.Z., Zhang J.M. et al. 2002. Thermal conditions of frozen-soil roadbed of Qinghai-Tibet Highway. *Progress in Nature Science* 12(8): 839-844. (in Chinese)
2. Wang S.L., Zhao L., Li S.X. et al. 2001. Study on thermal balance of asphalt pavement and roadbed stability in permafrost regions of the Qinghai-Tibetan highway. *Journal of Glaciology and Geocryology* 23(1): 111-118. (in Chinese)
3. Wu Q.B., Liu Y.Z., Zu Y.L. 2001. Thermal state of active layer under asphalt pavement of Qinghai-Tibet highway. *Jouranal of Xi'an Highway University* 21(1): 23-25. (in Chinese)
4. Liu Y.Z., Wu Q.B., Zhang J.M. et al. 2002. Deformation of highway roadbed in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24(1): 10-15. (in Chinese).
5. The National Development and Reform Commission Transportation Division. *National Highway Network Planning*, 2005-09-16. [http://www.gov.cn/ztl/2005-09/16/content\\_64418.htm](http://www.gov.cn/ztl/2005-09/16/content_64418.htm)
6. Cheng Guodong. 2005. Constructing of the Qinghai--Tibet Railroad using the principle of cooling the roadbed. *Journal of Glaciology and Geocryology* 27(1): 1-7.

7. Wu Z.W., Cheng G.D., Zu L.N., et al. 1988. *Roadbed Engineering in Permafrost Region*. Lanzhou: Lanzhou University Press, pp.56-57. (in Chinese)
8. Wu Q.B., Shi B., Liu Y.Z., 2002. Study on interaction between permafrost and highway along the Qinghai-Tibet highway. *Science in China (Series D)* 32 (6): 514-520. (in Chinese)
9. Yu Q.H., Pan X.C., Cheng G.D. et al. 2007. Study on main influential factors on ventilated embankment and corresponding measures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 26(Supp.1): 3045-3051. (in Chinese)
10. Esch D.C. 1983. Evaluation of experimental design features for roadway construction over permafrost. *Permafrost, Fourth International Conference Proceedings*, July 17-22, 1983, Fairbanks, Alaska, 283-252.
11. Li Z.L., Wu J.M., Zhang J.Z., 2000. Calorific effect of the steel fiber cement concrete pavement on the Qinghai-Tibet highway. *Journal of Building Materials* 3(3): 264-269. (in Chinese)
12. Cheng G.D., Sun Z.Z., Niu F.J. 2006. Application of roadbed cooling methods in the Qinghai-Tibet railway construction. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(6): 797-808. (in Chinese)
13. Fan K., Zhang J.Z., Qu Q. 2008. Application study on embankment with shading board in permafrost regions. *Journal of Subgrade Engineering* (140): 24-25. (in Chinese)
14. Yu Qihao, Pan Xicai, Cheng Guodong et al. 2007. Heat transfer process of roadway embankments with different type and width of road surface in permafrost regions. *Progress in Natural Science* 17 (3): 314-319.
15. Wu Q.B., Yu H., Jiang G.L. et al. 2008. Analysis of temperature features within crushed rock revetment and cooling mechanism of embankment for the Qinghai-Tibet railway. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 30(7): 1011-1016. (in Chinese)
16. Wen Z., Sheng Y., Ma W. et al. 2009. Study on in-situ monitoring of effect of degenerative permafrost protected by crushed rock revetment. *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 26(11): 26-30. (in Chinese)
17. Sun Z.Z., Ma W., Li D.Q. 2004. Experimental study on cooling effect of air convection embankment with crushed rock slope protection in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 26(4): 435-439. (in Chinese)
18. Ma W., Wu Q.B., Cheng G.D., 2006. Analyses of the temperature fields within an air convective embankment of crushed rock structure along the Qinghai - Tibet Railway. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(4): 586-594. (in Chinese)
19. Feng W.J., Ma W. 2006. An experimental study of the effect of awning along the Qinghai-Tibet railway. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(1): 108-115. (in Chinese)
20. Yu Q.H., Cheng G.D., He N.W., 2008. *Concrete hollow block preventing embankment slope in permafrost regions*. China, 200510065341.8, 2008-02-13.
21. Cheng G.D., Sun Z.Z., Niu F.J., 2006. Application of roadbed cooling methods in the Qinghai-Tibet railway construction. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(6): 797-808. (in Chinese)
22. Sheng Y., Zhang L.X., Yang C.S. et al. 2002. Application of thermal-insulation treatment to roadway engineering in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 21(5): 618-622. (in Chinese)
23. Mikhailov G P.1971. Temperature regime of embankment consisting of coarse rock on permafrost. *Transportation Construction* 12: 32-33. (in Russian)
24. Cheng G. D., Tong B. L., 1978. Experimental research on an embankment in an area with massive ground ice at the lower limit of alpine permafrost. *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, July 10-13, 1978, Edmonton, Alberta, Canada*, vol. 2, 199-222.
25. Goering D.J., Kumar P. 1996. Winter-time convection in open-graded embankments. *Cold Regions Science and Technology* 24(1): 57-74.
26. Yu W.B., Lai Y.M., Niu F.J. et al. 2002. Laboratory experiment study on the railway ventilated embankment in permafrost regions. *Journal of the China Railway Society* 24(6): 78-83. (in Chinese)
27. Cheng G.D., Lai Y.M., Sun Z.Z. et al. 2007. On the "thermal diode" function of crushed rock layer. *Journal of Glaciology and Geocryology* 29(1): 1-7. (in Chinese)
28. Wu Q.B., Zhao, S.Y., Ma, W. et al. 2005. Monitoring and analysis of cooling effect of block-stone embankment for Qinghai-Tibet railway. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 27(12): 1386-1390. (in Chinese)
29. Wang A.G., Ma W., Wang D.Y. 2006. Comparison study on cooling effect of frozen-soil foundation on block-stone railway embankment with different thickness of block-stone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 25(supp.1): 3283-3288. (in Chinese)
30. Lai Y.M., Zhang M.Y., Yu W.B. et al. 2006. Laboratory study of particle size for optimal cooling effect of closed crushed-rock layers. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(5): 755-759.
31. Wang A.G., Ma W., Wu Z.J. 2005. Study on influence of sand-and-gravel layer thickness up blockstone railway embankment of cooling effect

- of frozen-soil foundation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 24(13): 2333-2341. (in Chinese)
32. Ma W., Cheng G.D., Wu Q.B. 2002. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24(5): 579-587. (in Chinese)
33. Yang Y.P., Wei Q.C., Zhou S.H. et al. 2005. Thermosyphon technology and its application in permafrost. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 27(6): 698-706. (in Chinese)
34. Pan W.D., Zhao S.C., Xu W.Z. et al. 2003. Application of thermal probe to enhance thermal stability of roadbed in plateau permafrost areas. *Journal of Glaciology and Geocryology* 25(4): 433-438. (in Chinese)
35. Liu G., Zhang J.Z., Fu J. 2007. Defending roadbed diseases in warm frozen-soil regions by thermal pipe. *Journal of Subgrade Engineering* (132): 153-154. (in Chinese).
36. Wang S.J., Cheng J.B., Huang X.M. 2005. Numerical simulation of cooling effect for heat pipe subgrade. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 5(3): 41-46. (in Chinese)
37. Ministry of Communications of the People's Republic of China. 2004. *JTGB01-2003 Technical Standard of Highway Engineering*.
38. Y. Lai, H. Guo, Y. Dong, 2009. Laboratory investigation on the cooling effect of the embankment with L-shaped thermosyphon and crushed-rock revetment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology* 58: 143-150.
39. Lai Y., Wang Q., Niu F. et al. 2004. Three dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in cold permafrost region. *Cold Regions Science and Technology* 38(2): 165-184.
40. Yu W.B., Lai Y.M., Zhang X.F. et al. 2003. Experimental study on the cooling effect of block stone and crushed stone. *Journal of Glaciology and Geocryology* 25(6): 638-643 (in Chinese).
41. Niu F.J., Cheng G.D., Yu Q.H. 2003. Study on control-temperature of ductventilated embankment in permafrost regions. *Science in China (Series D)* 33: 145-152. (in Chinese)
42. Niu F.J., Cheng G.D., Li J.J. et al. 2006. Experimental study on the thermal boundary conditions and temperature fields of ductventilated embankment in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(3): 380-389. (in Chinese)
43. Li N., Su D., Quan X.J. et al. 2005. Approach on temperature field analysis and design principle of bed for ventilating pipeline in frozen soil. *Chinese Civil Engineering Journal* 38(2): 81-86. (in Chinese)
44. Yu Qihao, Cheng Guodong, Niu Fujun. 2004. The application of auto-temperature-controlled ventilation embankment in Qinghai-Tibet railway. *Science in China (Ser. D)* 47(Supp. I): 168-176.
45. Yu Qihao, Niu Fujun, Pan Xicai et al. 2008. Investigation of embankment with temperature controlled ventilation along the Qinghai-Tibet Railway. *Cold Regions Science and Technology* 53(2): 193-199.
46. Yu Q.H., Pan X.C., Cheng G.D. et al. 2007. Experimental study on the cooling progress of shading board put on an embankment slope in permafrost regions. *Journal of Glaciology and Geocryology* 29(2): 299-305. (in Chinese)
47. Yu Q.H., Cheng G.D., Pan X.C. et al. 2007. *Empty space applied to cooling temperature field of embankment in permafrost regions*. China, 200510096073.6, 2007-09-16.

# Field study on reinforcement effects of soil treatment with dynamically formed gravel pier composite foundation in saline soils

Yu ZHANG<sup>1,2</sup>, Jianhong FANG<sup>3</sup>, Jiankun LIU<sup>1</sup>, Anhua XU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
Beijing, China, 100044, e-mail: 09115268@bjtu.edu.cn

<sup>2</sup>School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu, China

<sup>3</sup>Qinghai Research Institute of Transportation, Xining Qinghai, China

**Abstract.** The highway from Chaerhan to Gulmut passes through saline soils area, located in cold regions and rock-salt lake regions in Qinghai-Tibet plateau; the mechanical property of saline soils varies with moisture and climate, which will influence the project construction. Gravel piles, dynamic compaction replacement (DCR) were applied in composite foundation of saline soils and after the field experimental in this region. The strength of saline soils foundation, working mechanism of pile-soil and deformation modulus of the composite foundation was analyzed after reinforcement. Methods were presented for determining the related coefficient of the capacity and deformation modulus of composite foundation with gravel pile and DCR, its calculated values were found close to experimental values. Field tests of gravel pile and DCR had shown good reinforcement effects in saline soils of cold regions and salt lake regions.

**Keywords:** saline soils; gravel piles; dynamic compaction replacement formed gravel pier; composite foundation; field experiment; foundation treatment.

## Натурное исследование по укреплению засоленных грунтов основания методом динамического замещения

Юй ЧЖАН<sup>1,2</sup>, Цзяньхун ФАН<sup>3</sup>, Цзянькунь ЛЮ<sup>1</sup>, Аньхуа СЮЙ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт гражданского строительства Пекинского транспортного университета  
Китай, 100044, г. Пекин, e-mail: 09115268@bjtu.edu.cn

<sup>2</sup>Дорожно-транспортный институт Ланьчжоуского транспортного университета, г. Ланьчжоу,  
Китай

<sup>3</sup>Цинхайский институт транспорта, г. Синин, Китай

**Аннотация.** Автомобильная дорога Чархан – Голмо на Цинхай-Тибетском нагорье проходит по территории с холодным климатом, солеными озерами и засоленными грунтами. Механические свойства засоленных грунтов варьируют в зависимости от влажности и климатических условий, что оказывает существенное влияние на строительство сооружений. Для укрепления засоленных грунтов были проведены натурные эксперименты по использованию метода гравийных свай и динамического уплотнения замещением. Проведен анализ прочности засоленных грунтов основания, механизма работы свай и грунта и модуля деформации композитного основания после уплотнения. Представлены методы расчета коэффициента несущей способности и модуля деформации композитного основания, уплотненного методом возведения гравийных свай и методом динамического уплотнения замещением. Полученные значения близки к результатам, полученным экспериментальным путем. Натурные исследования показали, что гравийные сваи и динамическое уплотнение замещением являются эффективным методом укрепления засоленных грунтов в районах с холодным климатом и распространением соленых озер.

**Ключевые слова:** засоленные грунты; гравийные сваи; динамическое уплотнение замещением; композитное основание; натурный эксперимент; улучшение свойств грунтов основания.



# Field study on reinforcement effects of soil treatment with dynamically formed gravel pier composite foundation in saline soils

Yu ZHANG, Jianhong FANG, Jiankun LIU, Anhua XU

## Introduction

Saline soil in the highway engineering generally points the soil which the average content of the soluble salt is over 0.3% under 1.0 m of earth. The effect of the saline soils to the highway engineering most depends on the composition of the soluble salt, properties, the contents of the salt in saline soils, the connection of the salt and water sate and the influence from the nature condition to the stabilization of it.

With the faster developing and constructing of the most area of the northwest China, the higher demands to saline soils foundation engineering was needed. As saline soils itself, is different from the general soil. Even when it compares with frozen soils, expensive soils and damp subsiding loess, it presents more particularity and complexity. Apart from melt sinking features, it also has salt bulge and corrosiveness. All that properties do harm to engineering and make huge financial losses. Choosing different reinforcement methods also based on lots of factors such as salt content, groundwater levels, meteorology and so on.

In recent years, the DCR is widely used to reinforce soft soil foundation for its short period and simple construction and so on. Numerous scientists and engineers have obtained useful results and experience from DCR foundation treatment of soft soil (e.g., A. G. Phear, S. J. Harris, 2008; Dong and Yan, 2009; Huang, Zhou and He, 2006; Liu, 2006; [1]-[4]); But the reinforcement mechanism of DCR hasn't been well researched; theoretical study is far behind engineering practice; so it is hard to build up the design theory and method. Moreover, before this, gravel pile in the construction had no success experience in saline soils of salt lake regions in China, the DCR construction in salt lake heavy saline soils area also wasn't applied in China. Based on the Cha-Ge highway project in saline soils and by combining with theory about working mechanism of pile (pier)-soil, the mechanism of DCR reinforcing highway saline soils roadbed is studied and prove this two foundation treatment methods can not only improve soil strength, but also help the upward migration of salt water, so as to give some reference to designers.

## Outline of project

Cha-Ge highway locates on saline soils region of Cha erhan saline lake in Qinghai province. There is more solar radiation, longer duration of sunshine, day-night temperature dramatic changes and the ground water level is so high. Under the arid climate, both dry and little wet saline soils have melt sinking features, which will be melt sinking deformation and got strength reduction under the soils' weight pressure or supplementary pressure of the earth surface [4]. The soil of this highway's stratum is low liquid limit clay and soft plastic state; the main ingredient is clay with minor powder and portion thin layer of salt crystals; it named Chloride salt type over saline soil-strongly saline soil. Thickness ranges of 2-10 m and bearing capacity of basic allowable values ( $\sigma$ ) is 130-200 kPa. The salt crystals in saline soil have dissolved corrosive and strong melt sinking features, engineering geological properties of lower and unfavorable natural foundation. Therefore, reinforcement method of DCR was applied, in order to meet the design requirements. To determine DCR composite foundation bearing capacity easily and effectively, at the same time, the reinforcement method of the gravel pile reinforcement was adopted. Table 1 shows the two main design parameters of reinforcement methods:

Table 1. Reinforcement method of the main design parameters

Reinforcement method	The main design parameters
Gravel pile	By vibration pile, pile length 5.0 m, the bottom of the pile supported on the lower layer of dense clay; average pile diameter 500 mm, pile spacing of 1.5 m (m: area replacement ratio of about 10%); single pile bearing capacity is greater than the design value 300 kPa; single pile composite foundation design value greater than 150 kPa
DCR formed gravel pier	Replacement pier diameter of 2.3 m, pier spacing of 5 m, replacement pier depth of about 2 m (m: area replacement ratio of about 19.2%), tamping energy for 3000 kN, single pier design capacity greater than 300 kPa; DCR Composite Foundation Design value is greater than 150 kPa

### Field test

The plate loading test had conducted on the single replacement pier and the soil between the piers. Parallel test groups are in the following table 2. The test start time, the loading and unloading during the test standards and test procedures, curves of loading tests and the load determine the outcome are “geotechnical engineering survey standards” (GB50021-2001, 2002) [5] as the reference standard.

In this plate loading test, load bearing plate adopted rigid circular plate. Single gravel replacement pier and the between the piers bearing plate area was 0.785 m<sup>2</sup>. Bearing plate area of single pier composite foundation was determined by the area replacement rate [6].

The bearing capacity is determined by loading to the failure loads. Former level load of failure loads is ultimate load, and allowable bearing capacity is equal to the ultimate load divided by safety factor; also P-S curve can be drawn, and set  $P_0$  when a clear inflection point on the curve as foundation bearing capacity. However, most of the experimental curve inflection point is not obvious, relative sedimentation method is adopted. The piles (piers) between the soil and composite foundation bearing capacity were determined by taking the relative deformation ( $S / D = 0.015$ ), single gravel replacement pier bearing capacity was determined by taking the relative deformation ( $S / D = 0.04$ ). Calculated data is in the following table 2.

### Composite foundation test data analysis

#### Gravel pile composite foundation bearing capacity analysis

For the construction technology of vibration sinking pile, though several groups of the above tests determine the correction factor of composite foundation bearing capacity, bearing capacity of

composite foundation can be determined for the future through bearing capacity of the single pile and the soil between the piles.

In accordance with the single pile and the soil between the piles bear the principles of the upper

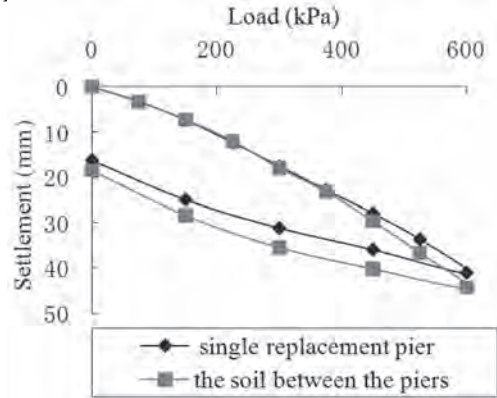


Fig. 1. Curves of loading tests to single replacement and the soil between the piers.

load, gravel pile composite foundation bearing capacity can be estimated the following equation [7]:

$$R_{cf} = R_1 \lambda_1 m R_{pf} + R_2 \lambda_2 (1 - m) R_{sf} \quad (1)$$

$R_{cf}$ ,  $R_{pf}$  and  $R_{sf}$  respectively represent the composite foundation, single piles (piers) and the soil between piles (piers) standard value of bearing capacity;  $R_1$  and  $R_2$  respectively representatives reflect the piles (piers) and the soil between piles (piers) the actual bearing capacity of soil correction factor, relate to the foundation soil conditions and other factors. This also can be seen the single pile and the soil between the piles bear the upper load [8]-[10]. Calculation, taked  $R_1 \lambda_1$  and  $R_2 \lambda_2$  equal 1.5 and substituted into the test value of bearing capacity of the single pile

Table 2. Data of loading tests

Treatment method	Test category	Number of test group	Plate area (m <sup>2</sup> )	Final settlement (mm)	Final load (kPa)	Determined by the relative deformation		Deformation modulus (MPa)
						Allowed settlement (mm)	Bearing capacity (kPa)	
DCR	Single replacement pier	2	0.785	41.05	600	40	539.21	23.38
	The soil between the piers	2	0.785	44.30	600	15	262.63	11.39

and the soil between the piles, bearing capacity of single pile composite foundation is close to corresponding experimental value. (The error is only 4.6%). The calculation shows choice of coefficients is reasonable.

#### *DCR composite foundation bearing capacity analysis*

Curves of loading tests to single replacement pier and the soil between the piers as Fig.1, for the DCR composite foundation load test, single gravel pier bearing capacity is the 539.21 kPa; the soil between the piers bearing capacity is the 262.63 kPa. As can be seen from Fig.1, single gravel replacement pier and the soil between the piers displacement difference corresponding to the same load is small. It shows that gravel replacement pier and the soil between the piers can better play the bearing and the ability to resist deformation. The field test did not conduct on the plate loading tests of DCR composite foundation. The reason is quite difficult to test. According to the area replacement rate, bearing plate area of single pier composite foundation equivalent to 21.63 m<sup>2</sup> round, and loading weight more than one thousand tons, which are very difficult test. But bearing capacity of DCR composite foundation can be obtained through bearing capacity of single gravel replacement pier and the soil between the piers, and above single pile composite foundation bearing capacity correction factor. The bearing capacity of single gravel replacement pier and the soil between the piers, the area replacement rate and the capacity correction factor  $R_1\lambda_1$  and  $R_2\lambda_2$  were substituted into the formula (1), bearing capacity of DCR composite foundation was 476.56 kPa.

#### *Piles (piers)-soil stress ratio $\eta$ and load share ratio $\delta$*

Stress ratio refers to on the piles (piers) and the soil between the piles (piers) the stress ratio. It responses important indicator of composite foundation both the piles (pier) and the soil between the piles (piers) bear load [11]. The main factors of influence the stress ratio is pile(pier) and the soil between the piles (piers) stress-strain relationship, construction quality, soil properties, pile (pier) diameter, graded gravel and so on. It can be calculated the following equation:

$$\eta = \frac{R_{pf}}{R_{sf}} = \frac{E_p}{E_s} \quad (2)$$

$E_p$  and  $E_s$  were piles (piers) and the soil between the piles (piers) deformation modulus.

According to the data in table 2, DCR composite foundation pier-soil stress ratio is 2.05.

The pile (piers)-soil load share ratio refers to piles (piers) and the composite foundation assumed the ratio of the load in the composite foundation. It can be calculated the following equation:

$$\delta = \frac{R_{pf}A_p}{R_{pf}A_p + R_{sf}A_s} \quad (3)$$

The formula (2) is taken into the above equation can get:

$$\delta = \frac{m\eta}{m(\eta-1)+1} \quad (4)$$

By the formula (4) shows, piles (piers)-soil load share ratio concerned only with the piles (piers) soil stress ratio  $\eta$  and replacement rate  $m$ . In the case of constant  $m$ ,  $\delta$  value will increase with the increase of  $\eta$  value; In the case of constant  $\eta$ ,  $\delta$  value will increase with the increase of  $m$  value. Through calculation, the piers-soil load share ratio  $\delta$  is 32.8% in the DCR composite foundation. Thus, most of the load borne by the soil between the piles (piers). This also shows that compaction effect of the soil between the piles (piers) is the main reason for improving of the bearing capacity of composite foundation. The piles (piers) on the stress concentration are the secondary cause for improving of the bearing capacity of composite foundation.

#### *Composite foundation deformation modulus analysis and comparison*

Deformation calculation of composite foundation is mainly to calculate value of the deformation modulus  $E$ . According to results of loading test, it can be calculated the following equation:

$$E = \omega(1 - \mu^2) \frac{P_0 D}{S} \quad (5)$$

where  $P_0$ —linear deformation stage the load of bearing board (kPa)

$S$ —bearing plate settlement corresponding with the load  $P_0$  (mm)

$D$ —diameter of bearing plate (mm)

$\mu$  is the Poisson's ratio of composite foundation.  $\mu$  is 0.3 for sand;  $\mu$  is 0.35 for powder soil;  $\mu$  is 0.42 for clay;  $\mu$  is 0.5 for mud soil;  $\mu$  is 0.1-0.2 for gravel; When the gravel pile accounted for 1 / 10- 1 / 5 (area replacement ratio),  $\mu$  is 0.3-0.4 for composite foundation;  $D$  is the side length or diameter of the bearing plate;  $\omega$  is the plate shape factor; square plate to take 0.88; circular plate to take 0.79.



According to equation (5), the soil between the replacement piers for deformation modulus was 11.39 MPa. In addition, deformation modulus of composite foundation is determined by deformation modulus of pile (piers) and the soil between the piles (piers) as follows:

$$E_{cf} = R_1 \lambda_1 m E_p + R_2 \lambda_2 (1 - m) E_s \quad (6)$$

The  $R_1 \lambda_1$  and  $R_2 \lambda_2$  values the same as before, it were taken into the formula (6) can get:

$$E_{cf} = R \lambda [1 + m(\eta - 1)] E_s \quad (7)$$

$E_{cs}$ ,  $E_p$  and  $E_s$  are deformation modulus of composite foundation, pile (piers) deformation modulus and deformation modulus of the soil between the piles (piers). The  $R_1 \lambda_1$  and  $R_2 \lambda_2$  values the same as before, the DCR reinforcement treatment replacement ratio  $m$  and pier-soil stress ratio were taken into the formula (7) and calculated. The deformation modulus of DCR composite foundation is 20.53 MPa.

Due to locating on salt lake regions, and distribution of groundwater under the earth surface, although DCR method and gravel pile composite foundation was beneficial to have formed the gravel piles (piers) of drainage, DCR to the foundation can be provided by tamping energy, so after DCR reinforcement, composite foundation bearing capacity and deformation modulus are also large.

#### Comparison of composite foundation settlement reduction factor

Settlement reduction factor refers to the settlement after treatment in the natural clay soil and the ratio of the natural foundation original settlement. It response to the effect of reducing the settlement after reinforcement in the natural clay soil, it can be calculated the following equation:

$$\beta = \frac{1}{1 + m(\eta - 1)} \quad (8)$$

After calculation, DCR composite foundation settlement reduction factor is 0.83. The settlement of reduction is 17% after reinforcement of DCR. Settlement reduction factor concerned only with the replacement rate and piles (piers)-soil stress ratio, coordination of the two will determine the size of settlement reduction factor. Construction quality is guaranteed as long as, the settlement has been reduced after the foundation of reinforcement [12]-[13].

## Conclusions

In the high temperature and dry environment, surface of saline soil is easy to solidify. The soil is very easy to form so-called "hard shell layer", which has high strength but extremely unstable. Therefore, it should first remove surface coverage of salt shell before ground treatment.

DCR composite foundation and gravel pile composite foundation can form a good drainage channel in containing groundwater saline soil region, which can reduce the groundwater level in the soil and help the upward migration of salt water, at the same time, improve soil strength and reduce the impact of salt expansion, and have good reinforcement effect. Due to the role of the tamping energy, DCR composite foundation bearing capacity and deformation modulus are relatively larger than gravel pile composite foundation.

Gravel piles (piers) are flexible piles (piers), both piles (piers) and the soil between the piles (piers) bear upper load. DCR composite foundation pier-soil stress ratio is 2.05.

Gravel pile composite foundation bearing capacity and deformation modulus formula after determining factor, calculated and experimental values are close, and through the coefficient can determine the bearing capacity and deformation modulus of DCR composite foundation. DCR can effectively reduce the settlement of the natural saline soil foundation.

## Acknowledgements

This research is supported by Qinghai Traffic Construction Technology Projects Foundation of China (QTCTFC) under Grant No. 2009-02.

## References

1. Phear, A. G., and Harris, S. J. 2008. Contributions to Géotechnique 1948–2008. Ground improvement. *Géotechnique* 58(5): 399-404.
2. Dong Wei, Yan Shuwang, Feng Shouzhong, and Yan, Fusheng. 2009. Study on dynamic compaction replacement for reinforcing freeway roadbed in wetlands. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 28, n SUPPL. (1): 2966-2972. (in Chinese)
3. Huang, Xiao-Bo, Zhou, Li-Xin, He Shu-Jun, and Zhou Hu-Xin. 2006. Study on test of saline soil ground treatment with the soaking and dissolving combined dynamic compaction method *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 27(n 11): 2080-2084. (in Chinese)



4. Liu Jiankun, Zeng Qiaoling, and Hou Yongfeng. 2006. *Subgrade Engineering*. Beijing: China Building Industry Press. (in Chinese)
5. (GB50021-2001) *Code for Geotechnical Engineering Investigation*. 2002. Beijing: The People's Republic of China Ministry of Construction. (in Chinese)
6. Gong Xiaonan. 2008. *Foundation Treatment Manual (Third Edition)*. Beijing: China Building Industry Press. (in Chinese)
7. Editorial Committee of the Foundation Treatment Manual. 2000. *Foundation Treatment Manual (Second Edition)*. Beijing: China Building Industry Press. (in Chinese)
8. Zheng Junjie, and Peng Xiaorong. 2003. Study on design theory of pile—soil cooperative work. *Rock and Soil Mechanics* 24(2):242-245. (in Chinese)
9. Yan Shuwang, and Cui Wei. 2005. FEA of elastic-plastic consolidation of high embankment in mountainous area under complex conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 24(3):474-479. (in Chinese)
10. LI Guo wei, and Yang Tao. 2005. Field experimental study on pile-soil stress ratio of composite ground under flexible foundation. *Rock and Soil Mechanics* 26(2):265-269. (in Chinese)
11. Zhang Yanmei, Zhang Hongru, and Zhang Xudong. Advance in researches of the stone column composite foundation and its analysis. *Journal of Engineering Geology* 13(1): 100-106. (in Chinese)
12. Liu Jie, and Zhang Keneng. 2003. Theoretical analysis of some problems about the composite foundation of gravel piles. *Mechanics in Engineering* 25(5): 44-47. (in Chinese)
13. Niu Zhirong. 2005. *Foundation Treatment Technology and Engineering Application*. Beijing: China Building Materials Industry Press. (in Chinese)

## Experimental study on bearing capacity of pile foundation in permafrost area

Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG

Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080

**Abstract.** The compressive capacity, pull resistance and horizontal bearing capacity of pile foundation were measured before and after the refreezing of the permafrost. It shows that the ground around the piles was heated because of the cement hydration, and the frost ground thaws. The freezing strength of the frost ground decreases markedly. After refreezing, the freezing strength of frost ground increases remarkably. This result is meaningful for the construction of pile foundation in permafrost area.

**Keywords:** permafrost; bearing capacity of pile foundation; temperature field; temperature changing rate.

## Экспериментальное исследование несущей способности свайного фундамента на многолетнемерзлых грунтах

Цзилян ВАН, Чэньси ЧЖАН

Хэйлунцзянский НИИ по строительству в холодных регионах  
Китай, 150080, г. Харбин, район Нанан, ул. Цинбинь, д. 60

**Аннотация.** В ходе экспериментального исследования измерялись сжимаемость, сопротивление выдергиванию и горизонтальная несущая способность свайного фундамента до и после промерзания оттаявшего грунта. Результаты исследования показали, что при гидратации цемента температура грунтов вокруг свай повышается, и мерзлый грунт оттаивает. Прочность смерзания мерзлого грунта существенно снижается. После промерзания прочность смерзания мерзлого грунта существенно повышается. Полученные результаты будут полезны при строительстве свайных фундаментах в районах развития многолетнемерзлых пород.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты; несущая способность свайного фундамента; температурное поле; скорость изменения температуры

# Experimental study on bearing capacity of pile foundation in permafrost area

Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG

## Introduction

Permafrost in China is distributed chiefly in Da Hinggan Mountains, Xiao Hinggan Mountains, north part of Song-nen plain, and Qinghai-Tibet Plateau. With the development of economy, more and more buildings were built in permafrost areas. In the process of construction, the temperature field around the piles changes with the release of hydration heat, so as to the physical and mechanical performance of the frost earth around the pile. The thermal dynamic balance is disturbed, especially in the process of concrete placement. So, the freezing strength of the frost earth decreases greatly, and the bearing capacity of the piles decreases, which affects the reliability of the buildings.

In this experiment, the bearing capacity of piles in permafrost area was tested in an actual engineering. The feasibility of piles construction in permafrost area was validated, and the experiment provides the evidence for the construction in permafrost area.

## Experiment

The structure of the field is as follows: Quaternary System Holocene Series plant layer (Q4pd), talus accumulation (Q4dl) and Eluvium (Q4el). The lithology includes humus soil, muddy silty clay and agmatite, silty clay and agmatite, gravel and clay.

To inspect the influence of hydration heat on the temperature of earth around the pile, a couple of piles were constructed. The depth of embedment is 11.5 m, and 0.5 m extrude out of the ground. The diameter of the piles is 1000 mm. Antifreezing admixtures and accelerating admixture were admixed in the concrete. The holes were excavated manually to the designed depth. After the holes were cleaned, reinforcement cages were put in, and the water, sand and stone were heated before the concrete was made.

## Experimental scheme

In this experiment, vertical steady compression, vertical steady pulling and horizontal steady load were added on separate pile. The compressed piles were anchored to adjacent 2 or 4 piles; the pulled piles were anchored to another 2 piles; the horizontal force was applied by adjacent piles. In the compression and pulling experiment, 630T and 200T jacks were used, and in the horizontal forcing experiment, 100T jacks were used, as shown in Fig. 1, Fig. 2 and Fig. 3.



Fig. 1. Vertical steady compression of separate pile (one pile anchored to four).



Fig. 2. Vertical steady compression of separate pile (one pile anchored two).



Fig. 3. Vertical steady pulling of separate pile.



Fig. 4. Apparatus for horizontal steady forcing.

### Experiment process

In the field, pile holes were excavated after survey and orientation. The pile holes were excavated manually by air pick. The construction field lies in swampland, so, in the process of excavating, water seeps out into the holes. The seepage increases with the deepening of the hole. Pumps were used to take the water out of the holes, and pile casings were used to protect the hole wall. After excavating the holes, putting in the reinforcement cages, concrete was placed up to the top of the pile. The experiments were conducted after the strength of the concrete reaches the designed value.

In this experiment, vertical steady compression, vertical steady pulling and horizontal forcing were carried out at the same time. These three experiments were carried out on No.5, No.7 and No.10 piles separately. The standard values of vertical compressive force, vertical pulling force and horizontal force are 1000 kN, 400 kN and 250 kN. After adjusting the apparatus, read and record the initial values of strain gauges, reinforcement gauges and thermometers. Read and record the value again before increasing the force step by step. The experiment lasts from Nov. 23 to Nov. 27, 2010.

The next year, similar experiments were carried out on the same project. This time, vertical steady compression, vertical steady pulling and horizontal forcing were carried out on No.16, No.2 and No.3 piles separately. The standard values of vertical compressive force, vertical pulling force and horizontal force are 2100 kN, 675 kN and 350 kN. The experimental process is similar with the last year. The experiment lasts from Feb. 27 to Mar. 6, 2011.

## Results and discussion

The figures for the first time in 2010 are shown as follows.

Table 1. Vertical steady compression of separate pile (Q-s, s-lgt)

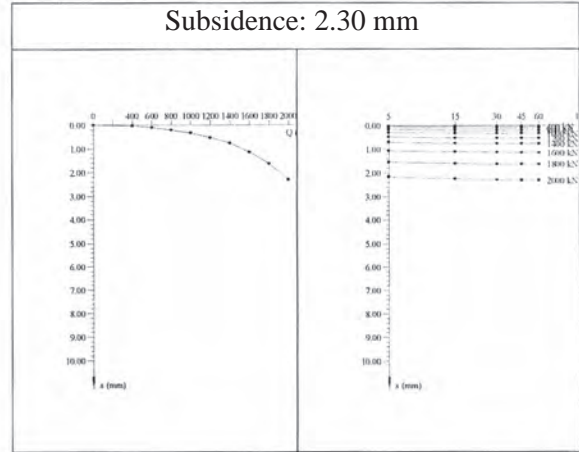


Table 2. Vertical steady pulling of separate pile (U-δ, δ-lgt)

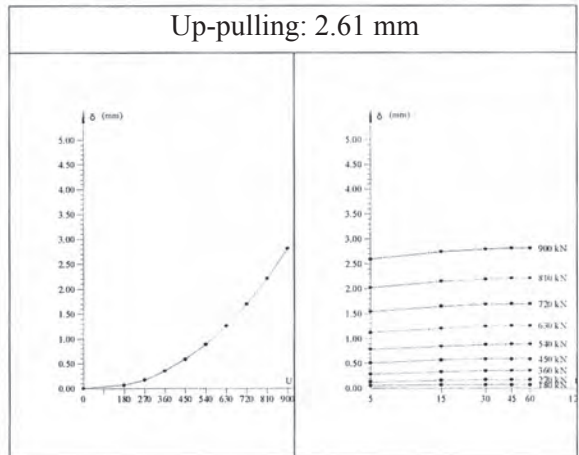
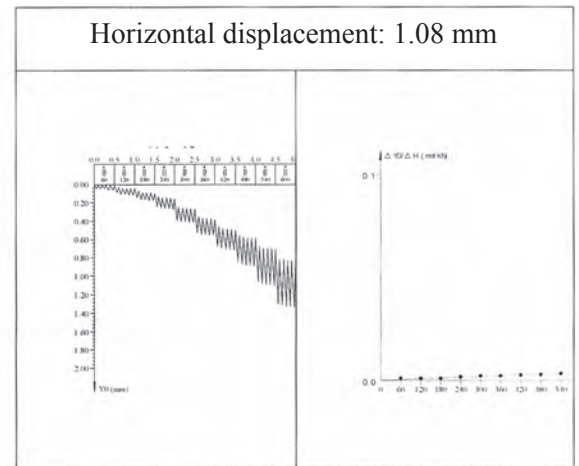


Table 3. Result of horizontal forcing experiment





The figures for the second time in 2011 are shown as follows.

Table 4. Vertical steady compression of separate pile (Q-s, s-lgt)

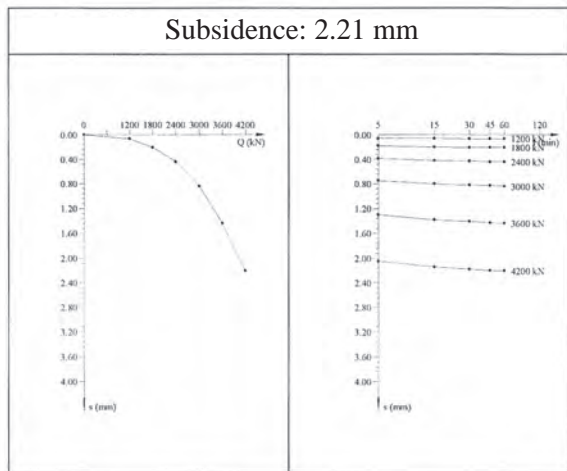


Table 5. Vertical steady pulling of separate pile (U-δ, δ-lgt)

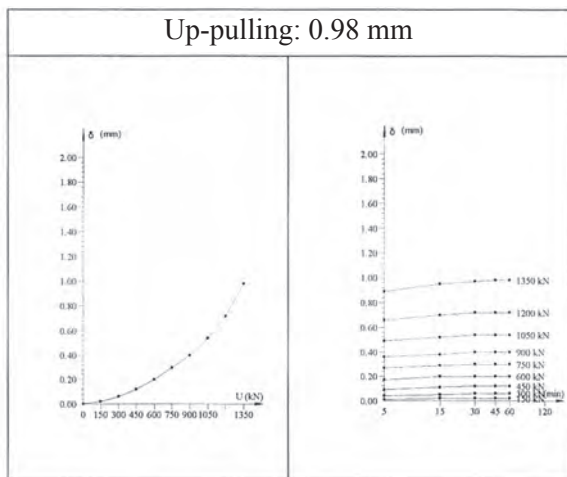
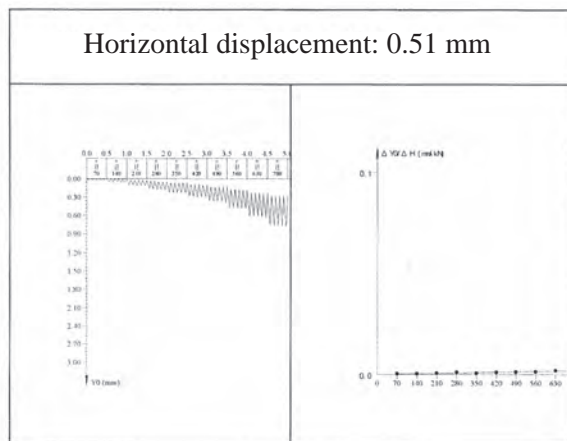


Table 6. Result of horizontal forcing experiment



Comparing Table 1 and Table 4, it indicates that before and after being refrozen of the earth, the standard value of vertical compressions are 1000 kN and 2100 kN. The standard value of vertical compressions is twice as much as that before being refrozen, but the subsidence of the piles are 2.30 mm and 2.21 mm, which is almost the same. It indicates that after being refrozen, the freezing strength of the earth around the pile increases remarkably. In construction, the earth around the piles thaws, the freezing strength is comparatively lower, the freezing strength can not recover until the earth is refrozen.

Comparison of Table 2 and Table 5 shows that the standard value of vertical up-pulling are 400 kN and 675 kN before and after being refrozen of the earth. The standard value of vertical up-pulling after being refrozen is approximately 70 percent higher than that before being refrozen, but the subsidence of the piles are 2.60 mm and 2.21 mm, which is almost the same. It shows that the freezing strength of the earth around the pile increases remarkably after being refrozen. In construction, the earth around the piles thaws, the freezing strength is comparatively lower, refreezing can increase the freezing strength.

From Table 3 and Table 6, it can be seen that the standard value of horizontal forces are 250 kN and 350 kN before and after being refrozen, and the up-pulling values are 1.08 mm and 0.51 mm. The force is 40 percents higher than that before being refrozen, but the displacement is only a half of that before. The reason is the same as that of vertical compression and vertical up-pulling.

### Conclusion

Bearing capacity of pile foundation in permafrost field was examined. By comparing the bearing capacity of piles before and after being refrozen, it is concluded that bearing capacities of vertical compression, vertical up-pulling and horizontal displacement are comparatively lower before being refrozen. After the earth around the piles is refrozen, the freezing strength between the piles and earth increase remarkably, so does the bearing capacity.

Reinforcement gauges were embedded in the concrete to inspect the internal force. It is calculated from the inspection results that the extreme bearing capacity of the pile foundation is 30000 kN, the extreme up-pulling resistance is 7000 kN, horizontal forcing resistance is 3500 kN, which is valuable for the construction of civil engineering in permafrost area.

So, after finishing the construction of pile foundation in permafrost area, the upside

structure should be built after the piles have been refrozen. This can avoid affection upon the upside structure, and the deformation of the pile foundation in the process of refreezing could be avoided. The security of the building could be ensured.

### References

1. Chen Ruijie. 2000. Progress and prospect on applying freezing method to artificial stratum. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 22(1): 29-32 (in Chinese)

2. Yu Zhankui, Huang Hongwei, Wang Ruilu, et al. 2005. Application of the artificially ground freezing method to Shanghai metro engineering. *Journal*

*of Glaciology and Geocryology* 27(4): 550-556. (in Chinese)

3. Yue Fengtian, Zhang Shuibin, Qiu Peiyun, et al. 2006. Study on artificial ground freezing method applied to connected aisle construction in metro tunnel. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* 2(8): 1341-1345. (in Chinese)

4. Jessberger, H.L. 1980. Theory and application of ground freezing in civil engineering. *Cold Regions Science and Technology* 3: 9-21.

5. Ma Wei, Cheng Guodiong, Zhu Yuanlin, et al. 1999. The State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering: Review and Prospect. *Journal of Glaciology and Geocryology* 21(4): 317-325. (in Chinese)

## Inspection of hydration heat of concrete on permafrost temperature

Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG

Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080

**Abstract.** In this paper, according to the analysis of temperature variation of permafrost with different distances around piles, the refreezing times and the trends of temperature changes along with time is obtained. On the base of the study, it is concluded that the temperature change of earth around the piles is the hybrid results of heat evolution of concrete and cooling effect of frozen earth. These experimental results provided with great theoretical and practice significance for the study of industrial and civil architecture construction in permafrost earth.

**Keywords:** hydration heat of concrete; geothermal temperature of permafrost; refrozen time of permafrost; diffusion radius.

## Изучение влияния тепловыделения при гидратации бетона на температуру многолетнемерзлых грунтов

Цзилян ВАН, Чэньси ЧЖАН

Хэйлунцзянский НИИ по строительству в холодных регионах  
Китай, 150080, г. Харбин, район Нанан, ул. Цинбинь, д. 60

**Аннотация.** На основе анализа температур многолетнемерзлых грунтов на разных расстояниях от свай определены время восстановления мерзлого грунта, а также закономерности изменения температуры грунтов во времени. Сделан вывод о том, что изменение температуры грунтов вокруг свай является комплексным результатом хода тепловыделения при твердении бетона heat evolution of concrete и охлаждающего влияния мерзлого грунта. Выявленные закономерности теплообмена имеют большое теоретическое и практическое значение для промышленного и гражданского строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

**Ключевые слова:** тепловыделение при гидратации бетона; температурный режим многолетнемерзлых грунтов; время восстановления исходного температурного режима многолетней мерзлоты; радиус теплового влияния.

# Inspection of hydration heat of concrete on permafrost temperature

Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG

## Introduction

Permafrost in China is distributed chiefly in Da Hinggan Mountains, Xiao Hinggan Mountains, north part of Song-nen plain, and Qinghai-Tibet Plateau. With the development of economy, more and more buildings were built in permafrost areas. In the process of construction, the temperature field around the piles changes with the release of hydration heat, so as to the physical and mechanical performance of the frost earth around the pile. The thermal dynamic balance is disturbed.

At present, there is no experiment on how hydration heat of concrete affects the geothermal temperature of permafrost and no actual engineering monitoring on it, so it has great significance to monitor it and analyze the law of temperature field changes during the process of construction.

## Sketch of experiment

This experimental site is Quaternary System Holocene Series plant layer (Q4pd), talus accumulation (Q4dl) and Eluvium (Q4el). The objection of the experiment was to inspect the hydration heat of concrete on geothermal temperature of permafrost around piles. The depth and diameter of the pile were designed to be 11.5 m and 1000 mm respectively. As to the pile, the height above the ground surface was 500 mm. The pile foundation was artificial excavated to the designed depth and poured by concrete of high early strength which was mixed with heated gravel and water.

## Preparation of experiment

The data acquisition equipment of temperature was the thermal resistor (type MF51—3000), which was produced by Northwest China Railway Academic of Science Co, and data collector (FLUKE289 ) produced by Fuluke Measuring Instrument Co. Ltd. was used in measuring and displaying data.

Before excavation, four groups of temperature measuring tubes which were made by  $\Phi$  50 seamless steel were embedded around the piles. The length of tubes was 10 m. The top of tubes should be higher than the ground surface. In order to avoid the irregular influence of geothermal temperature, the orifices needed to be sealed by thermal insulation material. The distances from tubes to piles center were 500 mm,

800 mm, 1000 mm, and 1200 mm respectively. And the corresponding tubes orifices were labeled as No.1, No.2, No.3, No.4. Thermistor lines were placed in the tubes to collect the data of temperature. Measuring points were evenly distributed. If the length of line was longer than 10 m, the interval of measuring point was 500 mm. If not, the interval was 1000 mm. Total numbers of measuring points was 21. At the site of 20 m away from piles center there is another temperature tube with length of 20 m. A thermistor line was placed in the tube also and the distribution of measuring points was the same to the others. On this line, there were 31 measuring points to monitor permafrost geothermal. The allocations of the temperature tubes around the piles were shown in Fig. 1.

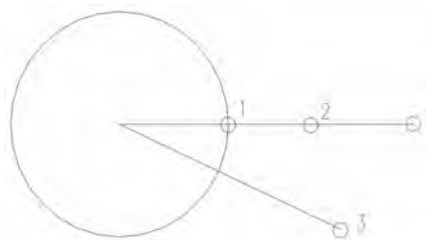


Fig. 1. Allocations of temperature tubes.

## Process of experiment

In this experiment, the period of permafrost geothermal temperature monitoring lasted 320 days from April, 2010 to February, 2011. The times of geothermal temperature observation were once a day. In terms of permafrost around the piles, the times of monitoring were three times a day at early stage and reduced to once a day as time went by. There have been abundantly data obtained. The monitoring point of temperature was shown in Fig.2.



Fig. 2. Monitoring point of temperature.



### Analysis of experimental results

#### *The regularity of geothermal temperature along with variation of time and depth*

The site geothermal temperature was obtained as a reference to the temperature around piles. The curve of site geothermal temperature was shown in Fig. 3.

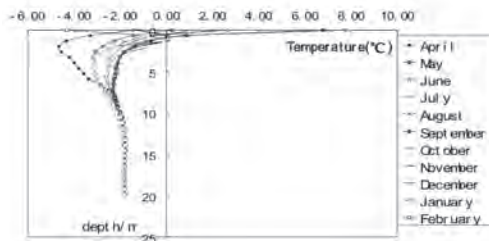


Fig. 3. Curve of site geothermal temperature.

As was shown in Fig. 3, the site geothermal temperature became higher gradually with the depth growing. When the depth exceeds 10 m, the temperature keeps stable at  $-1.8^{\circ}\text{C}$ . Due to the influence of atmosphere temperature, the geothermal temperature had great variation from April to November at the depth above 8 m. After December, as the atmosphere temperature dropped below zero rapidly, that geothermal temperature also had great variation. However, the atmosphere temperature almost had no influence to the site geothermal temperature at the depth below 10 m.

#### *Analysis of temperature variation of permafrost around piles*

As can be seen from the curve of site geothermal temperature, the geothermal were stable at the depth below 10 m. In view of this, the depth of 10 m permafrost was chosen as the analysis object in order to have a clearer show about the influence to the temperature of permafrost around piles of hydration heat. After concrete placement, the curves of temperature changes were respectively depicted in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7.

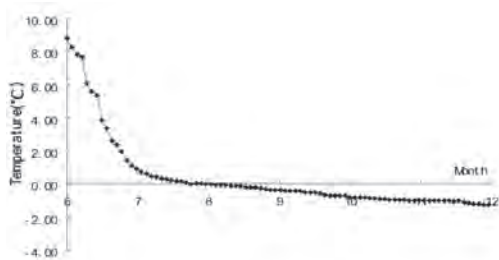


Fig. 4. Curve of temperature variation at No. 1 tube orifice.

According to Fig. 4, the permafrost temperature obtained from No.1 tube orifice rose instantaneously to  $9^{\circ}\text{C}$  because of the hydration heat at the time of concrete placement, and permafrost thaws at this place. As time went by, the temperature fell slowly and came stable after 150 days. Furthermore it could be seen that this permafrost became refrozen after 50 days.

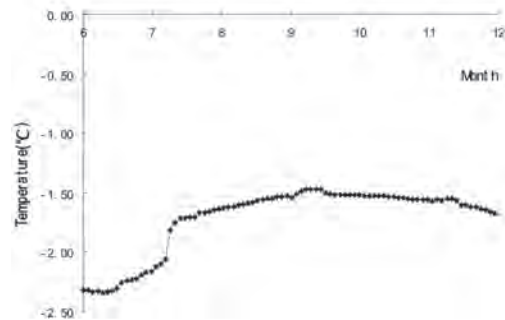


Fig. 5. Curve of temperature variation at No. 2 tube orifice.

According to Fig. 5, the permafrost temperature at No. 2 tube orifice went up slowly and the process lasted 90 days. Ultimately the temperature slowed down to the original temperature.

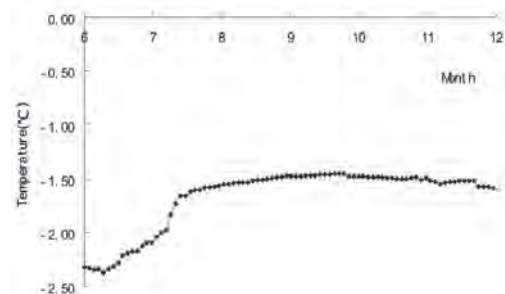


Fig. 6. Curve of temperature variation at No. 3 tube orifice.

According to Fig. 6, the permafrost temperature at No. 3 tube orifice also went up gradually and the process lasted 105 days until the temperature reaching at a peak. After then the temperature slowed down and in the end to the original temperature.

According to Fig. 7, the permafrost temperature at No. 4 tube orifice also went up gradually and the process lasted 150 days until the temperature reaching at a peak. After then the temperature slowed down and ultimately down to the original temperature.

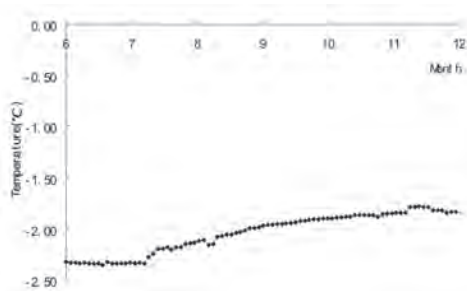


Fig. 7. Curve of temperature variation at No. 4 tube orifice.

In Fig. 4~7, the influence on regularity of the geothermal temperature curves is crossed by the hydration heat and the surrounding permafrost which sited outside the monitoring zone. The permafrost temperature was rising when the hydration heat diffused. After the diffusion, temperature of permafrost and piles foundation remained the same to outside ultimately. From the, it could be seen in the curve of No.1 tube orifice that its refreezing time was 50 days.

#### Diffusion radius of hydration heat

The hydration heat of piles foundation made the permafrost around thaw. The definition of diffusion radius is the distance from the maximum boundary of thawed permafrost to the center of piles. Due to the stability of the temperature at the depth below 10 m, the depth of 10m permafrost was also analyzed as reference. The curve of temperature variation with distance from the monitoring point to the pile boundary was obtained by means of the experiment data. It is shown in Fig. 8.

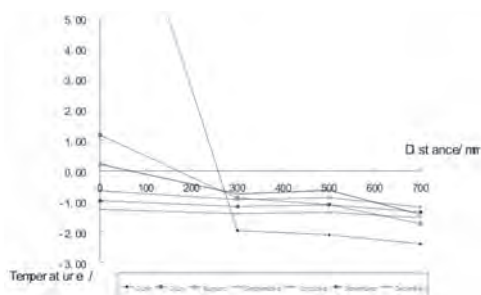


Fig. 8. Curve of temperature variation with distance.

As can be seen from Fig. 8, the hydration heat of concrete made the permafrost around piles thaw. As time goes by, the thawed permafrost refrozen and its temperature ultimately fell to the original level. It is obvious that the boundary of thawed permafrost was maximum at preliminary stage. From Fig. 8, the distance of the maximum thawing boundary was 260 mm. Therefore the diffusion radius was 760 mm.

## Conclusion

Regarding the diffusion radius, from the pile center, the diffusion radius of hydration heat could be up to 760 mm. The temperature of permafrost which sited closer to piles center was obviously more affected by the hydration heat. Especially the permafrost next to piles, its temperature variation curve approximated to the hydration heat curve of cement. The earth around the piles stays thawing in the first 50 days after concrete placement and then gets refrozen. The permafrost 300 mm away from the piles does not thaw at all, though its temperature rose in some extent.

From the aspect of depth, the effect of atmosphere temperature was lessening with the depth. Since shallow permafrost, whose depth was shorter than 2m, is exposed to direct sunshine, its temperature is affected by atmosphere temperature change. Furthermore, as construction takes place after May when the atmosphere temperature increases day by day, the shallow permafrost temperature rises with the atmosphere temperature. However, when the depth of permafrost was deeper than 10 m, permafrost temperature was almost a constant without the influence of outside temperature.

Above all, the permafrost which is closer to the piles and the ground surface was more vulnerably interfered by the hydration heat and the atmosphere temperature. Since the construction season was in spring and summer, the refreezing time was longer. In conclusion, in order to reduce the disturbance to shallow permafrost and short the refreezing time, the construction season, when build concrete piles in permafrost zone, need to evade the high temperature seasons.

## References

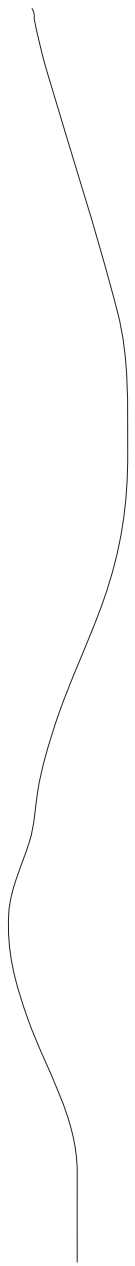
1. Jessberger, H.L. 1980. Theory and application of ground freezing in civil engineering. *Cold Regions Science and Technology* 3: 9-21.
2. Ma Wei, Cheng Guodong, Zhu Yuanlin et al. 1999. The State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering: Review and prospect. *Journal of Glaciology and Geocryology* 21(4): 317-325. (in Chinese)
3. Jin Huijun, Yu Wenbing, Chen Youchang et al. 2005. Differential frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipelines in permafrost regions: A review. *Journal of Glaciology and Geocryology* 27(3): 454-464. (in Chinese)
4. Jin Huijun and Brewer, Max C. 2005. Experience and lessons learned in the engineering design and construction in the Alaska Arctic. *Journal of Glaciology and Geocryology* 27(1): 140-146.
5. Yang Ping and Zhang Ting. 2002. The physical and the mechanical properties of original and frozen-thawed soil. *Journal of Glaciology and Geocryology* 24(5): 665-667. (in Chinese)

**Session 3**

**Thermal, Geophysical, Hydrogeological  
and Geocological Aspects  
of Cold Regions Development in a Changing Climate**

**Секция 3**

**Теплофизические, геофизические, гидрогеологические  
и геоэкологические аспекты освоения криолитозоны  
в условиях меняющегося климата**





## Problems of Technogenic Safety in the Republic of Sakha (Yakutia)

T.A. Kapitonova, O.I. Sleptsov, M.P. Lebedev, G.P. Struchkova

V.P. Larionov's Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS  
677890, 1, Oktyabrskaya Str., Yakutsk, Russia, IPTPN SB RAS, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

**Abstract.** Scientific and technical developments in the field of industrial and economic facilities safety have necessitated the further development of research into the processes occurring in metals during welding, the creation of new materials and technologies for permanent joints, ensuring cold-resistance and reliability of the technique of the North. Particular attention is paid to the formulation of new systematic research on major fundamental issues of mechanics, physics and chemistry of the processes occurring in metal constructions during the installation, maintenance and repair, interaction of design and the environment, including the permafrost, leading eventually to accidents and disasters. To minimize the risk of emergency situations that can lead to unpredictable consequences it is necessary to find optimal solutions and create models based on fracture mechanics, reliability and risk theory, and GIS technologies.

**Key words:** technogenic safety; accidents, risk assessment; modeling of natural and technogenic hazards; cold resistance; and reliability.

## Проблемы техногенной безопасности Республики Саха (Якутия)

Т. А. Капитонова, О. И. Слепцов, М. П. Лебедев, Г. П. Стручкова

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН  
Россия 677890, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, ИФТПС СО РАН,  
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

**Аннотация.** Научно-технические разработки в области безопасности промышленных и народнохозяйственных объектов обусловили необходимость дальнейшего развития исследований процессов, происходящих в металлах при сварке, создание новых материалов и технологий для получения неразъемных соединений, обеспечивающих хладостойкость и надежность техники Севера. При этом особое внимание уделяется постановке новых систематических исследований по важнейшим фундаментальным проблемам механики, физики и химии процессов, происходящих в металлоконструкциях во время монтажа, эксплуатации и ремонта, взаимовлияние конструкции и окружающей среды, в том числе многолетнемерзлых грунтов, приводящие в дальнейшем к авариям и катастрофам. Для минимизации риска возникновения аварийных ситуаций, способных привести к непредсказуемым последствиям, необходимы поиски оптимальных путей решения и создание моделей на основе механики разрушения, теории надежности, риска и ГИС-технологий.

**Ключевые слова:** техногенная безопасность; аварии; оценка риска; моделирование природно-техногенных рисков; хладостойкость и надежность.

# Проблемы техногенной безопасности Республики Саха (Якутия)

Т. А. Капитонова, О. И. Слепцов, М. П. Лебедев, Г. П. Стручкова

## Введение

Современный период развития человечества характеризуется все более обостряющимися противоречиями между человеком, техногенными угрозами и окружающей средой.

Уровень риска и негативные последствия от техногенных природных аварий и катастроф в последние 3-5 лет становятся неприемлемыми для дальнейшего социально-экономического и экологического развития республики. Такое положение обусловило постановку новых систематических исследований по важнейшим фундаментальным проблемам механики, физики и химии процессов, происходящих в металлоконструкциях во время монтажа, эксплуатации и ремонта, взаимовлияния конструкции и окружающей среды, в том числе многолетнемерзлых грунтов, приводящие в дальнейшем к авариям и катастрофам. В исследованиях ИФТПС по природно-техногенной безопасности Республики Саха (Якутия) основное внимание уделяется влиянию низкой температуры и геологических факторов на характер возникновения и протекания аварийных ситуаций. При этом, исходя из реальных возможностей Республики, разработки по проблемам безопасности должны осуществляться с учетом принципиально новых требований к определению и продлению ресурса безопасной эксплуатации объектов.

## Научно-технические разработки в области природно-техногенной безопасности

Научно-технические разработки в области безопасности промышленных и народнохозяйственных объектов обусловили необходимость дальнейшего развития исследований процессов, происходящих в металлах при сварке, создания новых материалов и технологий для получения неразъемных соединений, обеспечивающих хладостойкость и надежность техники Севера.

Необходимо уделять особое внимание разработке научных основ техногенной безопасности промышленных объектов и сооружений; развитию общих критериев и методов оценки и моделированию природно-техногенных рисков. Многообразие применя-

емых методов моделирования катастрофических процессов и различие их теоретических основ затрудняет сопоставление оценок риска и выявление наиболее опасных антропогенных воздействий и определение рискоопасных территорий. Кроме того, имеет место незавершенность теории риска техногенных и особенно природно-техногенных катастроф с учетом особенностей природно-климатических условий различных регионов. Таким образом, исследования в указанном направлении требуют междисциплинарного подхода, рассматривающего во взаимосвязи природные и антропогенные явления и процессы.

Полученные результаты исследований позволят разработать научные и, в конечном итоге, нормативные основы техногенной безопасности народнохозяйственных объектов, что позволит диагностировать и прогнозировать риск возникновения, избежать техногенных аварий и катастроф или смягчить их последствия, что снизит убытки и человеческие потери. В частности, разработка технологии сварки низколегированных высокопрочных сталей, позволяет избежать образования холодных трещин в сварных соединениях и значительно повысить продолжительность работы конструкций после их ремонта.

В этих условиях возникает вопрос повышения надежности конструкций при низких эксплуатационных температурах.

Антропогенная деятельность технических систем со всей очевидностью показывает, что полностью исключить их отрицательные последствия объективно невозможно; поэтому политика безопасности вынуждена исходить из постулата необходимости нахождения оптимума между полезностью развития антропогенной деятельности и ее отрицательного воздействия.

Как известно, минерально-сырьевые ресурсы Якутии позволяют развить на ее территории, кроме имеющихся добывающих отраслей промышленности (угле- и газо- нефтесырьевых, добычи драгоценных металлов, алмазно-бриллиантового комплекса, и т.д.), также и нефтеперерабатывающую, черную металлургию с выпуском не только обычной сортовой стали и чугунов, но и ста-

лей нового поколения с уникальными свойствами. Однако при интенсивном освоении минерально-сырьевых ресурсов эксплуатация возводимой инфраструктуры (сооружений, трубопроводного, автомобильного и железнодорожного транспорта) возникает ряд проблем, связанных с безопасностью, и, прежде всего, с техногенным риском.

В Институте физико-технических проблем Севера СО РАН проводятся работы по совершенствованию методов расчета на прочность с целью выработки предложений по рациональному выбору конструктивного исполнения деталей машин, что позволило бы более полно использовать служебные свойства материала [1, 2].

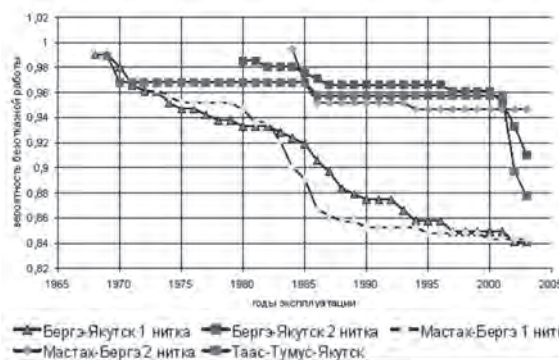
Усиление информационной политики в России, возрастание возможностей информационно-коммуникационных технологий определило направления научно-исследовательских работ по созданию вычислительных сетей, геоинформационных технологии, обеспечивающих эффективное прогнозирование и обеспечение возможности принятия оперативного управленческого решения как приоритетного. Решение подобных проблем инициирует спрос на ряд современных высоких технологий, начиная от эффективных средств надежной связи, специальных компьютерных технологий обработки пространственной информации, экспертных систем, позволяющих моделировать сценарии развития ситуаций и принятия решений в условиях высокой неопределенности и быстро изменяющейся обстановки, геоинформационных систем (ГИС).

В ИФТПС СО РАН осуществлялись работы связанные с проведением модельных расчетов аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах с оценкой антропогенного воздействия на окружающую среду и территории и расчетом возможных зон поражения на примере газопровода Мастаах-Бергэ-Якутск.

Магистральные трубопроводы (МТ) это геотехнические нелинейные сложные системы большой протяженности с риском эксплуатации выше среднего. Это обстоятельство требует, при оценке и прогнозировании остаточного ресурса, при проведении ремонтно-восстановительных работ и при управлении рисками трубопровода использования высокоточных моделей деформирования тонких несовершенных оболочек, построенных на основе механики разрушения, теории надежности и риска.

В процессе эксплуатации газопровода его техническое состояние изменяется, что

выражается в ухудшении количественных значений характеристик работоспособности и надежности (рисунок).



Вероятность безотказной работы газопровода.

В зависимости от условий эксплуатации изменяются показатели надежности и безотказности системы. Отказы технических устройств по их физической природе – следствие физико-химических процессов, непосредственно или косвенно влияющих на работоспособность элементов и возникновение отказов определяются: типом материала; местом протекания процесса; видом энергии, определяющей характер процесса; эксплуатационным воздействием; внутренним механизмом процесса.

На основе анализа выявляются причинно-следственные связи отдельных событий, приводящие к аварийным ситуациям, и сценарии возможных аварийных ситуаций.

Анализ показал, что основными причинами разрушений трубопроводов, связанными с качеством стали и технологией производства труб, являются трещины по зоне термического влияния (ЗТВ), дефекты продольного заводского шва, расслоение металла, сварочные напряжения и напряжения при укладке, отклонения от начальной геометрии (начальные напряжения), а также неоднородность основания, пучение грунтов, растепление грунтов, просадки основания, микросейсмика, оползни, сдвиги, потеря продольной устойчивости трубопровода. Каждая компонента сама по себе может быть источником разрушения трубопровода. Наиболее часто трещины возникают на пересечении заводского сварного и кольцевого монтажного сварного стыка в зоне подварки.

## Выводы

В настоящее время, в результате диагностирования технологических трубопроводов установлено, что с учетом деформационного

старения металла стенок труб дальнейшая эксплуатация технологических трубопроводов с дефектами формы трубы возможна при условии обоснованно рассчитанного ресурса безопасной эксплуатации. Наиболее опасные виды отказов технологических трубопроводов связаны с зарождением и развитием трещин в области дефектов под воздействием факторов эксплуатационного происхождения (статических и динамических нагрузок и наличия коррозионной среды). При комплексном подходе к мониторингу МТ необходима оценка несущей способности и устойчивости участка МТ, проходящего через растепленный участок многолетнемерзлого грунта.

В ходе выполнения работы дана оценка технического состояния трубопроводной сети Якутии; выполнены расчеты частоты отказов и вероятности безотказной работы газопроводов в связи с влиянием температурного и геологического факторов; выполнены модельные расчеты причин аварий подводного газопровода; с использованием ГИС-технологий установлены «слабые» участки трассы газопровода, для которых даны оценки риска аварий. Создана база данных по авариям сложных технических систем и отказам энергосистем республики [2, 3].

Работа выполнена при поддержке Программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН, проект № 116 «Антропогенные риски угледобывающих и нефтегазодобывающих территорий Сибири и гранта РФФИ 09-08-98513 «Создание моделей расчета рисков чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия) с использованием ГИС.

## Список литературы

1. Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экономические и техногенные проблемы / О. И. Слепцов, А. И. Левин, Г. П. Стручкова, Т. И. Семенова; ред. В. Ю. Фридовский, В. А. Прохоров. – Новосибирск: Наука, 2008. – 296 с., раздел 4.

2. Проблемы природно-техногенной безопасности регионов Сибири / В. В. Москвичев, Ю. И. Шокин, А. М. Лепихин и др. – Красноярск : СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, ИВМ СО РАН, 2010. – Препринт № 1. – 86 с., [0,4] л. вкл.

3. Надежность и безопасность газопроводного транспорта в условиях Крайнего севера / О. И. Слепцов, А. И. Левин, Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова, А. М. Большаков // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4. – С. 95-103.

## References

1. Sleptsov, O.I., Levin, A.I., Struchkova, G.P., Semenova, T.I. 2008. *Safety of the Sakha Republic (Yakutia): Social, Economic, and Man-Made Problems*. Edited by Fridovsky, V.Yu., Prokhorov, V.A. Novosibirsk: Nauka, part 4, 296 pp. (in Russian).

2. Moskvichev, V.V., Shokin, Yu.I., Lepikhin, A.M., et al. 2010. *Problems of Natural and Technogenic Safety in the Regions of Siberia*. Krasnoyarsk: Nauka, 86 pp. (in Russian).

3. Sleptsov, O.I., Levin, A.I., Kapitonova, T.A., Struchkova, G.P., Bolshakov, A.M. 2007. Reliability and safety of gas transfer under conditions of the Far North. *Problems of Safety and Emergency*, no. 4: 95-103 (in Russian).



## Urban water logging control in permafrost regions

V.V. Shepelev<sup>1</sup>, T.R. Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: shepelev@mpi.ysn.ru  
<sup>2</sup>North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

**Abstract.** Suprapermafrost water logging is a serious problem in many communities located in permafrost regions. Human factors, such as leaks from water distribution pipes, disruption of the natural drainage of subsurface water by roads, fills and pads, and the reduced water balance due to asphalt pavements, concrete surfaces and tree removal are the main causes of the problem, along with changes in climate. The conventional methods of subsurface drainage are not applicable, because of the cold climate and the specific character of recharge, regime and discharge of active-layer water in permafrost regions. The authors suggest a system approach to the water logging problem which involves control of both suprapermafrost and rainstorm flows. The proposed drain systems take into account the specific features of water movement in the aeration zone of permafrost, as well as the specifics of suprapermafrost water regime in the active layer.

**Keywords:** suprapermafrost water; drainage; active layer; permafrost.

## О борьбе с подтоплением на урбанизированных территориях криолитозоны

В. В. Шепелёв<sup>1</sup>, Т. Р. Чжан<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная 36, ИМЗ СО РАН, E-mail: shepelev@mpi.ysn.ru  
<sup>2</sup> Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Амосова  
Россия, 677000, ГСП, г. Якутск, ул. Белинского, 58, E-mail: tashachzhan@yandex.ru.

**Аннотация.** Подтопление надмерзлотными водами является очень серьезной проблемой для многих городов, расположенных в области распространения криолитозоны. Основными причинами этого, помимо изменения климатических условий, являются техногенные факторы: аварийные утечки воды из водонесущих коммуникаций, засыпка естественных путей стока надмерзлотных вод сезонноталого слоя, сокращение расходных статей водного баланса (асфальтирование и бетонирование поверхности земли, сокращение древесной растительности и т.д.), перекрытие надмерзлотного стока дорожными насыпями. Имеющиеся методы и способы дренирования грунтовых вод в данном случае не приемлемы, в связи с суровыми климатическими условиями и существенной спецификой формирования, режима и разгрузки надмерзлотных вод сезонноталого слоя.

Авторами предлагается системный подход к решению проблемы подтопления, основанный на учете как надмерзлотного, так и ливневого стоков. Учитывая особенности влагопереноса в зоне аэрации многолетнемерзлых горных пород и специфику режима надмерзлотных вод сезонноталого слоя, рекомендуются конструкции дренажных устройств для осушения подтопляемых территорий в условиях криолитозоны.

**Ключевые слова:** надмерзлотные воды; дренирование; сезонноталый слой; многолетнемерзлые породы; криолитозона.

## О борьбе с подтоплением на урбанизированных территориях криолитозоны

В. В.Шепелёв, Т. Р. Чжан

### Состояние проблемы

Подтопление надмерзлотными водами испытывают сегодня многие населенные пункты, расположенные в области распространения криолитозоны. Причинами этого являются аварийные утечки из водонесущих коммуникаций, засыпка естественных путей стока надмерзлотных вод, сокращения расходных статей водного баланса в связи с асфальтированием и бетонированием поверхности, уничтожением растительности, перекрытием надмерзлотного стока дорожными насыпями и т.д. [1-3].

Подтопление урбанизированных территорий вызывают повышение масштабов обводнения и заболачивания, а также активацию таких опасных криогенных процессов как термокарст, термосуффозия, термоэрозия, морозное пучение и т.д. Все это отрицательно влияет на устойчивость и долговечность фундаментов зданий, дорожных сооружений, подземных трубопроводов и других инженерных объектов.

Основными трудностями, существенно осложняющими проведение эффективной борьбы с подтоплением территорий крупных населенных пунктов расположенных в области распространения многолетнемерзлых пород, являются следующие.

1. Невозможность использования типовых конструкций дренажей и систем ливневой канализации из-за суровых климатических и сложных мерзлотно-геологических условий.

2. Застроенность территорий, что в совокупности с имеющимися подземными кабельными, водонесущими, газовыми и другими городскими коммуникациями значительно осложняют применение оптимальных схем дренирования надмерзлотных вод.

3. Высокая степень зарегулированности надмерзлотного стока дорожными насыпями, зданиями построенными по принципу сохранения вечной мерзлоты, подсыпками привозного грунта при планировочных работах на строительных площадках, что затрудняет нормальное функционирование дренажных устройств.

4. Невозможность сброса дренажных вод и ливневых стоков в существующие городские канализационные коллекторы из-за перегру-

женности последних постоянно возрастающим объемом хозяйственно-бытовых стоков.

5. Функционирование надмерзлотных вод в так называемом «культурном слое», представленном преимущественно привозным грунтом, перекрывающим различные свалки, помойки, выгребные ямы и даже древние кладбища. Неоднородные фильтрационные свойства грунтов «культурного слоя» чрезвычайно осложняют работу дренажных систем. Кроме того, высокая минерализация, агрессивность, токсичность и бактериальная загрязненность надмерзлотных вод не позволяют сбрасывать их в поверхностные городские водотоки и водоемы без предварительной очистки.

6. Перераспределение дополнительного инфильтрационного питания надмерзлотных вод, осуществляемого за счет аварийных утечек из водонесущих коммуникаций, с зимнего периода на весенне-летний. Зимой почти весь объем аварийных утечек воды аккумулируется в виде техногенных наледей. Таяние их в теплый период года существенно увеличивает приходную часть водного баланса и степень подтопления городских территорий. Так, по результатам проведенных наблюдений, слой наледного стока на территории г. Якутска в среднем составляет 50 мм в год, достигая в отдельных кварталах 200 мм [4].

Перечисленные трудности свидетельствуют о чрезвычайной сложности борьбы с подтоплением и обводнением застроенных территорий в условиях криолитозоны и указывают на необходимость комплексного геокриологического, гидрогеологического и инженерно-геологического подходов к разработке и обоснованию рекомендуемых защитных мероприятий.

С учетом особенностей влагопереноса в зоне аэрации многолетнемерзлых пород и закономерностей формирования и режима надмерзлотных вод предлагается применять комплексную систему осушения застроенных территорий (Шепелёв, 2007; Шепелёв, Попенко, 2008). В основу ее положен принцип совмещения ливневой канализации и дренажа надмерзлотных вод сезонноталого слоя, учитывая тесную генетическую связь поверхностного дождевого и надмерзлотного стоков. В комплекс рекомендуемой системы осушения включены следующие основные

элементы: магистральные дренажные коллекторы, главные (уличные) дрены и локальные (внутриквартальные) дрены (рис. 1).

Магистральные дренажные коллекторы необходимо строить в первую очередь, поскольку они предназначены прежде всего для отвода дренажных вод с осушаемой территории. Прокладываться они должны по магистральным улицам в направлении общего естественного уклона дневной поверхности.

Магистральные дренажные коллекторы должны быть закрытыми. Это необходимо для того, чтобы продлить период их функционирования в течение года, а также для обеспечения надежного сбора и отвода ливневого и над-

мерзлотного стоков с осушаемой территории. Закрытый коллектор можно закладывать на значительной глубине (до 4,5–6,5 м) и обеспечить тем самым самотечный приток и отвод стоков. Пространство над коллекторами засыпается хорошо фильтрующим грунтом (щебень, гравий).

Особенности предлагаемой конструкции магистральные дренажные коллекторы заключаются в следующем. Они должны выполняться из керамических или полимерных труб диаметром не менее 800-1000 мм. Верхняя их половина перфорируется круглыми или щелевидными отверстиями и перекрывается фильтрующим материалом (стекловолокно,

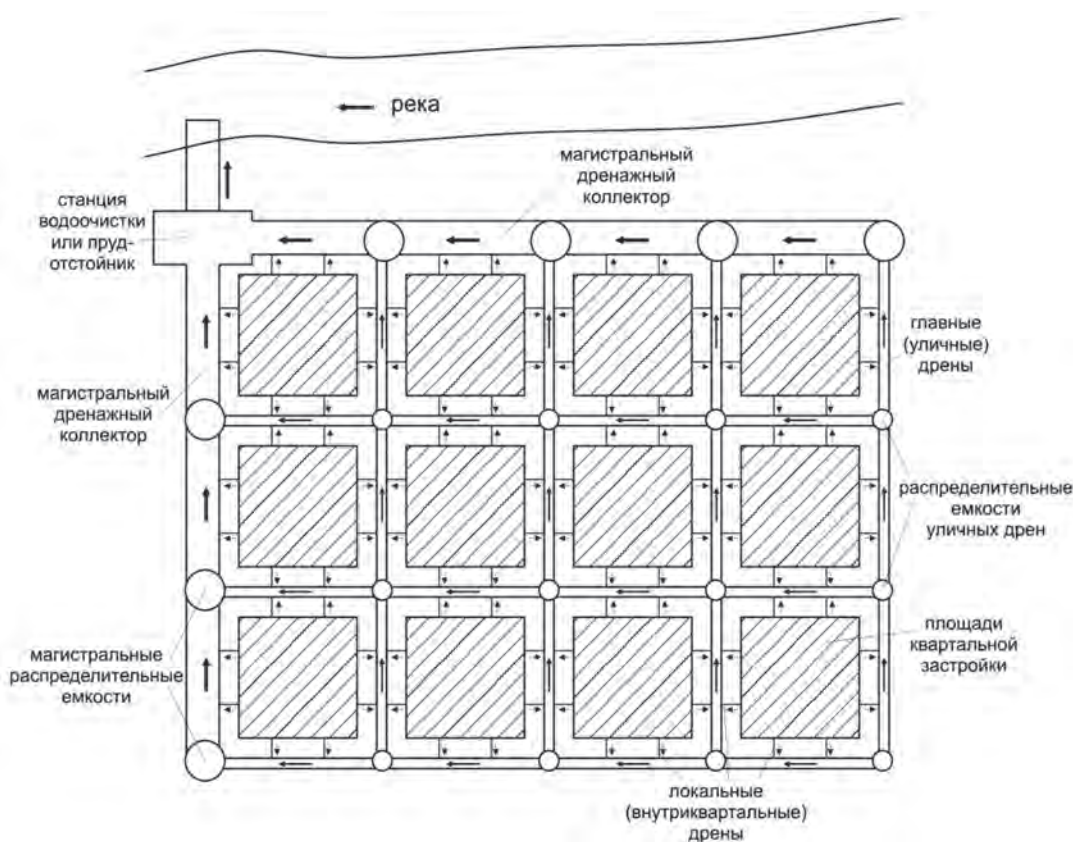


Рис. 1. Схема комплексной системы дренажного стока застроенной территории.

базальтовая вата и др.). Это необходимо для того, чтобы коллектор выполнял дренажную функцию. Нижняя часть труб не перфорируется и предназначена для стока дренажных вод.

Для предотвращения замерзания воды в коллекторах в весеннее время, когда в них начинают поступать талые снеговые воды, а температура окружающих грунтов отрицательная, внутри дренажных труб следует предусмотреть прокладку греющего кабеля.

Для обеспечения свободного отвода вод по магистральному дренажному коллектору необходимо создание специальных распределительных емкостей (рис. 2). Конструкция их позволяет обеспечить необходимые уклоны для беспрепятственного стока воды по коллекторам. Распределительные емкости можно использовать для откачки воды в период проливных дождей или во время интенсивного поступления талых снеговых вод. Кроме того, эти емкости можно использовать для под-



готовки всей дренажной системы к зимнему периоду. Для этого следует проводить откачку воды из них насосами в начале зимы. Расстояние между распределительными емкостями должно быть таким, чтобы обеспечить необходимый уклон для самотечного отвода дренажных вод (не менее 0,005).

Основное предназначение главных (уличных) дрен – сбор ливневых и надмерзлотных стоков и отвод их в магистральные дренажные коллекторы. Конструктивно они могут быть аналогичны магистральным коллекторам и отличаться от них лишь меньшими размерами дренажных труб (300–500 мм). Уличные

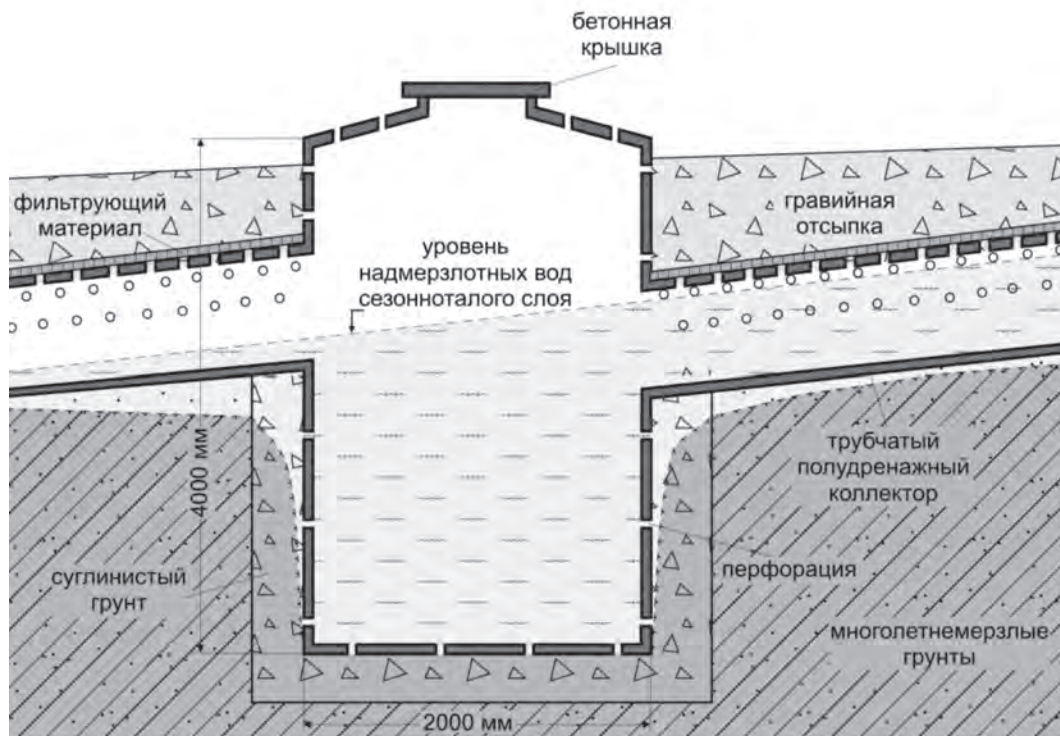


Рис. 2. Распределительная емкость дренажного коллектора.

дрены необходимо оборудовать греющим кабелем для расплавления льда, который может образоваться в них в зимний и, особенно, в весенний периоды. Вдоль уличных дрен также могут быть устроены меньшего размера распределительные емкости для создания необходимого уклона при движении ливневого и надмерзлотного стоков.

Основное предназначение локальных (внутриквартальных) дрен – сбор дождевых и надмерзлотных вод с территорий кварталов и отдельных крупных зданий и отвод их в главные (уличные) дрены. Конструктивно они не отличаются от магистральных дренажных коллекторов и уличных дрен и характеризуются лишь меньшими размерами дренажных труб (100–200 мм). Локальные дрены могут оконтуривать отдельные здания. В этом случае в них будут отводиться не только стоки с крыш, но и возможные аварийные утечки из водонесущих коммуникаций.

### Заключение

Реализация предлагаемой системы дренирования и грамотная ее эксплуатация позволят надежно защитить территории населенных пунктов или определенные их части от подтопления, обводнения и развития опасных криогенных процессов. Следует отметить, что предлагаемые конструкции дренажных устройств можно использовать в дорожном строительстве, в частности при сооружении водопропусков на трассах железных и автомобильных дорог, а также при прокладке их на участках распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород и подземных льдов.

### Список литературы

1. Шепелёв, В. В. Гидрогеологические особенности района Якутска и основные проблемы борьбы с подтоплением территории: материалы научно-практической конференции «Якутск –



столица северной республики» / В. В. Шепелёв. – Якутск : Фонд «Градосфера», 1997. – С. 51–56.

2. Шепелёв, В. В. Геоэкологические проблемы обводнения и подтопления территории г. Якутска / В. В. Шепелёв, М. М. Шац // Наука и образование. - 2000. - № 3. – С. 68–71.

3. Павлова, Н. А. Роль техногенных барражей в системе формирования поверхностного стока на территории г. Якутска и их влияние на обводненность / Н. А. Павлова, С. И. Сериков // Научное обеспечение решения ключевых проблем развития г. Якутска. – Якутск : ООО «Издательство Сфера», 2010. – С. 106–110.

4. Курчатова, А. Н. Влияние техногенных наледей на засоление литогенной основы городских ландшафтов Якутска / А. Н. Курчатова // Криолитозона и подземные воды. – Якутск : Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1996. – Часть вторая. – С. 95–104.

5. Шепелёв, В. В. О системе инженерной защиты территории г. Якутска от опасных техноприродных процессов / В. В. Шепелёв // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – М.: ГЕОС, 2007. – Вып. 9. – С. 423–426.

6. Шепелёв, В. В. Об инженерной защите территории г. Якутска от подтопления и обводнения / В. В. Шепелёв, Ф. Е. Попенко // Наука и техника в Якутии. – 2007. – № 2. – С. 15–18.

## References

1. Shepelev, V.V. 1997. Hydrogeology of the Yakutsk area and main problems in water-logging control. *Proceedings of the Conference, Yakutsk, the Capital of the Northern Republic*. Yakutsk: Gradostera Foundation, 51-56. (in Russian)

2. Shepelev, V.V., Shatz, M.M. 2000. Geocological problems of water logging and inundation in Yakutsk. *J. Nauka i Obrazovanie* 3: 68-71. (in Russian)

3. Pavlova, N.A., Serikov, S.I. 2010. Man-Made Barrages in Yakutsk: Role in Surface Runoff and Effects on Soil Saturation and Ponding. In: *Scientific Support to Solving the Key Problems of Yakutsk Development*. Yakutsk: Sfera, 106-110. (in Russian)

4. Kurchatova, A.N. 1996. The effect of anthropogenic icings on urban soil salinity in Yakutsk. In: *Permafrost and Ground Water in Siberia*, part 2. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 95-104. (in Russian)

5. Shepelev, V.V. 2007. The engineering system for protecting the Yakutsk area from natural and anthropogenic hazards. *Proceedings of the RAS Scientific Council Annual Meeting on Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 9. Moscow: GEOS, 423-426. (in Russian)

6. Shepelev, V.V., Popenko, F.E. 2007. On engineering measures for water logging control in the Yakutsk area. *J. Nauka i Obrazovanie* 2, 15-18. (in Russian)

## **Impact of Anthropogenic and Technogenic Accidents on the Ecological Safety of the Sakha Republic (Yakutia)**

G.P. Struchkova, V.M. Efimov, T.A. Kapitonova, O.I. Sleptsov

The V.P. Larionov's Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS  
677890, 1, Oktyabrskaya Str., Yakutsk, Russia, IPTPN SB RAS,  
e-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

**Abstract.** Investigation of technogenic accidents and anthropogenic disasters on the ecological safety of the Sakha Republic (Yakutia) has shown that to determine the environmental consequences analysis the most effective method is to use information technologies, which provides an estimate of the interaction of objects of life and the environment the most effectively. Using GIS technology allows developing the system of emergency situations prevention and choosing the optimum location for major industrial facilities. The most devastating effects on the objects of life cause accidents on gas pipelines, which exhaust their resources on 60 per cent and cause the stop of heat and electricity supply, as well as forest fires and floods. An integrated approach to managing events in the case of emergency situations during construction and operation of complex technical systems in cold regions through the application of GIS technologies allows describing adequately the dynamics of an emergency development and preventing the unfavorable development of events.

**Key words:** ecology; safety; mains; geoinformation technologies.

## **Воздействие антропогенных и техногенных аварий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия)**

Г. П. Стручкова, В. М. Ефимов, Т. А. Капитонова, О. И. Слепцов

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН  
Россия, 677890, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, ИФТПС СО РАН,  
e-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

**Аннотация.** Исследование техногенных аварий и антропогенных катастроф на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия) показало, что для определения анализа экологических последствий наиболее эффективным является использование метода информационных технологий, который наиболее эффективно обеспечивает оценку взаимодействия объектов жизнедеятельности и окружающей среды. Использование ГИС-технологий позволяет разработать системы предупреждения чрезвычайных ситуаций и выбирать оптимальные места для размещения крупных промышленных объектов. Наиболее катастрофические последствия на объекты жизнедеятельности вызывают аварии на магистральных газопроводах, на 60% отработавших свой ресурс, которые несут и остановку тепло- и энергоснабжения, а также лесные пожары и наводнения. Применение комплексного подхода к управлению событиями при возникновении ЧС при строительстве и эксплуатации сложных технических систем в криолитозоне на основе применения геоинформационных технологий позволяет адекватно описать динамику развития ЧС и предупреждать неблагоприятное развитие событий.

**Ключевые слова:** экология; безопасность; магистральные трубопроводы; геоинформационные технологии.

# Воздействие антропогенных и техногенных аварий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия)

Г. П. Стручкова, В. М. Ефимов, Т. А. Капитонова, О. И. Слепцов

## Введение

Современный мир насыщен продуктами научно-технического прогресса настолько, что практически любая область деятельности человека сопряжена с техногенными рисками. При этом наблюдается тенденция роста особо крупных аварий, приводящих к большим экономическим потерям и человеческим жертвам. Возникает непосредственная угроза природной сфере и сфере жизнеобеспечения человека. Природные стихийные явления в свою очередь также могут приводить к крупным техногенным катастрофам. Неблагоприятные последствия от этих явлений усугубляются в случае, если они происходят в условиях криолитозоны.

Для предупреждения возникновения внештатных ситуаций при транспортировке углеводородного сырья необходимо разработать систему мониторинга на случаи изменения толщины снежного покрова, возникновения водных преград, наводнений, затопления объектов нефте- и газопроводов, возможности возникновения лесных пожаров, заболачивания местности, изменения ландшафта, сейсмической активности территории. Моделирование возникновения чрезвычайных и аварийных ситуаций позволяет просчитать возможные экономические последствия от нанесенного ущерба.

Особенность арктического региона, его географическое положение и малонаселенность, состоит в том, что все объекты инфраструктуры разбросаны на огромной территории. В этом случае для управления процессом транспорта нефти и газа, который включает в себя надежность электро- и теплоснабжения, целесообразно использование современных информационных технологий, включая мониторинг трубопроводов с учетом поддержки принятия решений в случае аварий и внештатных ситуаций.

## Исследования систем окружающей среды

Идентификация опасностей или риск-факторов. В настоящей работе под опасностью или риск-фактором понимается потенциальный источник потерь (вреда), который может быть нанесен людям, имуществу или окружающей среде, а также любое неконтролируемое событие или условие, способное самостоятельно или в совокупности с

другими событиями и условиями привести к инциденту, аварийной или чрезвычайной ситуации. При этом выделяются опасности, которые при наличии неопределенной ситуации, могут привести к возможным серьезным последствиям.

Выявление источников возникновения риск-факторов. После определения риск-факторов необходимо установить источники их возникновения. Наиболее типичные источники возникновения опасных ситуаций приведены в таблице.

Категория	Характеристика неопределенной ситуации и ее опасных последствий
Ошибка персонала	Неверное включение / выключение оборудования, ошибки в определении показаний контрольно-измерительной аппаратуры, неправильный выбор режимов работы.
Отказ оборудования	Неправильное срабатывание запорной аппаратуры, превышение нагрузок на насосно-компрессорном оборудовании, замыкание электрических цепей, коррозия, структурные дефекты материалов
Отказ управления оборудованием	Потеря управления оборудованием, отказы систем безопасности.
Авария	Потеря устойчивости оборудования, обрыв и/или опрокидывание подъемного оборудования, прекращение подачи энергии и рабочих сред для питания и управления технологическим процессом
Внешние силы и нагрузки	Сейсмические явления, экстремальные гидрометеорологические явления, наводнения, удар молнии, падение перемещаемых грузов

Сценарии аварийных ситуаций. Сценарии разрабатываются исходя из опасностей, обнаруженных на этапе их идентификации и анализе последствий проявления. Детальность проработки сценариев определяется наличием исходной информации и условиями определения характера и возникновения последствий.

При определении возможного набора сценариев учитывается, что одно и то же событие может вызывать различные последствия, которые, в свою очередь, обусловлены различными риск-факторами и их сочетанием. При этом учитывается, что к инциденту могут

привести несколько одновременно или последовательно возникающих опасностей.

Обычной практикой является выделение так называемых базовых (как правило, связанных с наиболее серьезными последствиями) сценариев. Обычно это выполняется на основе предшествующего опыта и анализа аварий. В дальнейшем в целях полноты анализа рассматриваются различные модели развития сценариев. С этой целью:

- изменяется последовательность развития начального (базового) сценария;
- для каждого события определяются дополнительные условия возникновения;
- вводятся менее вероятные предположения и условия развития сценария.

Конечной целью данного этапа является обеспечение полноты анализа, то есть определение возможных путей наступления опасных последствий и цепочек событий от выявленных опасностей к этим последствиям. В наибольшей степени этим целям удовлетворяют методы построения и анализа логико-временной последовательности событий и деревьев отказов [1].

#### **Риск-факторы и сценарии аварийных ситуаций**

Опасные воздействия и последствия инцидентов, аварийных и чрезвычайных ситуаций обычно рассматриваются для следующих категорий:

- здоровье и безопасность персонала и населения;
- воздействие на окружающую среду;
- ущерб имуществу.

Экологическая ситуация в республике контрастная. Более 67% общего загрязнения окружающей среды составляет загрязнение от объектов энергетики. При разработке принципов и методов анализа экологических последствий воздействия топливно-энергетического комплекса на природную среду наиболее современным и эффективным является геосистемный подход, при котором обеспечивается комплексность, наибольшая полнота и взаимосвязанность информации о взаимодействии энергетических объектов и природной среды.

Воздействие на природные комплексы различных отходов неравноценно по своему количественному поступлению и территориальному распространению. Влияние твердых отходов на золошлакоотвале локализовано в пространстве, без учета возможной инфильтрации в подземные горизонты. Изменение гидрохимического состояния поверхностных

вод сточными водами не превышает нескольких километров и ограничено изменением небольшого ряда ингредиентов (взвешенные вещества, нефтепродукты, большие производственные комплексы). В то же время воздушные выбросы оказывают наиболее масштабное воздействие на природную среду, вовлекаясь в региональный перенос и рассеиваясь на расстояния в сотни километров. Атмосферные выбросы изменяют биотические компоненты природных комплексов на значительном расстоянии от источников. К тому же в настоящее время не существует промышленно-освоенных методов борьбы с газообразными продуктами выбросов.

В республике Саха преобладают выбросы оксида углерода –36,0%, оксидов азота –20,1%, диоксида серы –9,8% [2, 3].

В промышленных зонах городов Якутска и Мирного экологическая ситуация очень острая. Имеет место загрязнение атмосферы, вод, почв, деградация земель и термического режима многолетнемерзлых грунтов. В районах горных разработок – острая, на юге – умеренно острая. Выбросы вредных веществ в атмосферу

133,7 тыс. тонн в том числе в г. Якутске 4,2 тыс. тонн, забор вод 259 млн. м<sup>3</sup>, сброс загрязненных стоков 74,5 м<sup>3</sup>. Вокруг г. Якутска устойчивая зона общего загрязнения территории площадью 510 км<sup>2</sup>. Город Мирный техногенная аномалия с плотностью загрязнения по пыли в сотни раз превышающие фоновые показатели.

Основными источниками загрязнения воды р. Лена и ее бассейна являются суда речного флота, порты, нефтебазы и судоверфи. На территории Якутии на гидрохимический режим рек особое влияние оказывают своеобразные природные условия региона, характеризующиеся резко континентальным климатом, длительным периодом ледостава на водотоках и водоемах, наличием вечной мерзлоты, выступающей в роли водоупора, низкой самоочищающей способностью рек. В формировании химического состава большинства водных объектов бассейна значительную роль играет подземное питание.

Характерными загрязняющими веществами воды рек бассейна Лена являются нефтепродукты, фенолы, соединения меди. Уровень загрязнения этими ингредиентами практически не меняется по сравнению с предыдущими годами и составляет 3-4 ПДК. Наибольший объем сточных вод сбрасывается ОАО «ОЛПРОСА» и предприятиями жилищно-коммунального хозяйства Якутска.



Наибольший вклад в загрязнение атмосферы вносит автотранспорт (более 30% суммарных выбросов загрязняющих веществ).

Среди стационарных объектов выделяются предприятия электроэнергетики, цветной металлургии и коммунального хозяйства.

На территории республики имеются многочисленные источники радиоактивного загрязнения природной среды, в том числе радиоактивные отвалы в местах разведки и добычи полезных ископаемых. В Якутии было проведено 12 подземных ядерных взрывов хозяйственного назначения.

Увеличение количества и энергоемкости используемых в промышленности опасных веществ, усложнение технологий и режимов управления современными производствами требуют разработки механизма получения качественных и количественных оценок техногенного риска. Наиболее существенный недостаток большинства известных ныне подходов оценки техногенного риска – акцент на распространение вредных энергетических выбросов в биосфере и, соответственно, на меры защиты от них. При этом недостаточное внимание уделяется мероприятиям по предотвращению аварий, что связано, главным образом, с трудностями оценки вероятности возникновения соответствующих происшествий, причем количество техногенных ЧС на прямую связано с температурами эксплуатации.

#### **Использование ГИС-технологий для оценки последствий аварийных ситуаций на газопроводах**

На примере газопровода Мастах-Берге-Якутск создана база геоинформационных данных. Пространственный анализ, выполненный средствами ГИС, позволяет представить результат в виде серии тематических карт, синтезированной на основе суперпозиции и пространственного совмещения данных о возможных опасных проявлениях и свойствах уязвимости элементов риска.

Исследуя причины возникновения аномалий с использованием тематической карты, необходимо учесть следующие факторы:

- источники опасности распределены в пространстве неравномерно;
- сила опасного воздействия уменьшается по мере удаления от очага;
- природные аномалии среды, в которой распространяется опасное воздействие (воздух, вода, рельеф, грунт), могут радикально изменить картину опасного воздействия;
- активизация одного источника опас-

ности способна спровоцировать активность целого ряда других (это явление принято обозначать как «принцип домино», «цепная реакция» или «лавинообразный процесс»).

В базу данных заносится информация спецификации, механические характеристики оборудования. Кроме того, в базе содержится информация о технических параметрах газопровода, данные о прорывах и отказах, сведения о надежности сегментов трубопроводов, выполненных на цифровой картографической основе.

Достижение поставленной цели предполагает:

- рассмотрение основных технологий и форматов растрового описания данных;
- рассмотрение технологий и форматов векторного представления данных;
- апробация технологий создания видов цифровой картографической продукции;
- определение структуры построения базы геоинформационных данных;
- рассмотрение перечня нормативно-технических документов, регламентирующих правила создания цифровой картографической продукции.

Основополагающие требования к функциональным задачам базы геоинформационных данных Республики Саха (Якутия) вытекают из определяющих тенденций обеспечения природной и техногенной безопасности объектов территории.

Собран материал и разработаны новые слои распространения многолетнемерзлых пород и сейсмички. Проведено описание объектового состава природно-технических систем с геопространственными данными, разработано информационное обеспечение, мониторинг текущего состояния объектов (трубопроводы, контуры водонефтяных контактов, схемы кустования скважин, внутривидовые коммуникации и др.) и прогнозирование сценариев развития технологических и экологических процессов.

Анализ работы газопровода Мастах – Берге-Якутск, эксплуатирующегося более 30 лет в условиях криолитозоны, проложенного выше глубины сезонного промерзания-протаивания грунта, показал, что сезонное промерзание и протаивание грунта особенно в сложных инженерно-геологических условиях (болота, заболоченные местности, обводненные территории), негативно сказывается на устойчивости трубопровода. Сезонные колебания температур, особенно на заболоченных участках способствуют образованию на газопроводах гофр и выталкиванием газопровода

на поверхность, потере несущей способности, увеличению нагрузки на ось, а в особо тяжелых случаях – разрыву металла труб. Например, натурные исследования газопровода Мастах-Бергэ-Якутск показали, что на некоторых участках (особенно в болотистых грунтах) образовались выходы газопровода на поверхность и его смещения на 12 м от первоначального положения [4, 5].

На рисунке представлен участок газопровода Мастах-Берге на 33 км. Анализ повторяющихся аварий, произошедших на данном участке, причинами которых являлись заводские и технологические дефекты, после нанесения на карту показал, вышеобозначенные дефекты становятся опасными на участках, где отмечается морозобойные трещины грунта, которые вызывают дополнительную динамическую нагрузку, изменяя напряженно-деформируемое состояние газопровода. Таким образом, использование ГИС дает возможность предсказать наиболее опасные участки газопровода и моделировать последствия возможных аварий и экологических катастроф.



Влияние компонент природных опасностей на распределение частоты аварий газопровода.

Работа выполнена при поддержке Программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН, проект № 116 «Антропогенные риски угледобывающих и нефтегазодобывающих территорий Сибири и гранта РФФИ 09-08-98513 «Создание моделей расчета рисков чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия) с использованием ГИС».

#### Список литературы

1. Слепцов, О. И. Использование геоинформационных систем для мониторинга и управления объектами угольной промышленности / О. И. Слепцов,

Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова, Р. О. Слепцов // Южная Якутия – новый этап индустриального развития: материалы Международной научно-практической конференции, 24-26 октября 2007 г., г. Нерюнгри, Россия. – С. 218-221. – Библиогр.: с. 221-222.

2. Стручкова, Г. П. Промышленные и транспортные аварии и катастрофы / Г. П. Стручкова, Т. А. Капитонова, Л. Е. Тарская // Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2008 году. - Якутск, 2009. -С. 60-62.

3. Экономика и энергетика регионов РФ / А. М. Мастепанов, А. А. Саенко, В. А. Рыльский, Ю. К. Шафроник; ред. А. М. Мастепанов; РГУ Нефти и газа им. И. М. Губкина. – М. : Экономика, 2001. - С. 433-438.

4. Слепцов, О. И. Геоинформационные технологии в Республике Саха (Якутия) / О. И. Слепцов, Г. П. Стручкова, Т. А. Капитонова // Вычислительные технологии. – 2007. – Том 12, специальный выпуск 3. – С. 90-99.

5. Слепцов, О. И. Моделирование возникновения аварийных ситуаций при транспортировке углеводородного сырья в условиях криолитозоны / О. И. Слепцов, Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова // Безопасность и живучесть технических систем: материалы II Всероссийской конференции, 8-12 октября 2007 г., г. Красноярск. - С. 88-91. – Библиогр.: с. 91.

#### References

1. Sleptsov, O.I., Kapitonova, T.A., Struchkova, G.P., Sleptsov, R.O. 2007. *Using geographic information systems for monitoring and management of the coal industry.* / South Yakutia - a new stage of industrial development: Proceedings of the International Scientific Conference, 24-26 October 2007, Neryungri, Russia. - pp. 218-221. - Bibliography: pp. 221-222.

2. Proceedings of state reports “On state and protection of the environment in the Republic of Sakha (Yakutia)” 2000-2005. - Yakutsk.

3. Mastepanov, A.M. et al. 2001. *Economy and energy of the Russian Federation regions.* Moscow: Economics. - pp. 433-438.

4. Sleptsov, O.I., Struchkova, G.P., Kapitonova, T.A. 2007. *Geoinformation technologies in the Sakha Republic (Yakutia).* Computational technologies. Volume 12, Special Issue 3.- pp. 90-99.

5. Sleptsov, O.I., Kapitonova T.A., Struchkova G.P. 2007. *Modeling of accidents occurrence during transportation of hydrocarbons under conditions of the permafrost.* Safety and Survivability of Technical Systems: The 2nd All-Russian Conference, 8-12 October 2007, Krasnoyarsk, pp. 88-91.

## Prediction of air temperatures in Yakutia up to 2050

L.G. Neradovsky, Yu.B. Skachkov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Using the classical technique of harmonic analysis performed for 6 weather stations located in the southern, northern, western, eastern and central parts of Yakutia, an attempt was made to predict mean annual surface air temperature  $T_a$  up to the year 2050. The prediction used the Stadia program developed by A.P. Kulaichev. The prediction method involved construction of Fourier models in the initial form and with removal of harmonics of interannual  $T_a$  variation with a period of 3-6 years. This enabled us to detect not only general trends, but also common specific features in Fourier model behavior for entire Yakutia. These are most apparent in the long  $T_a$  series for Yakutsk (180 years) and Verkhoyansk (122 years). It is inferred that the observed warming in Yakutia, as in western Siberia, will follow a moderate scenario. The warming rate will weaken in the next few years and enter a stage of stability, which is seen as a fragment of the secular background associated with the maximum phase equilibrium region. It seems likely that increases in temperature will exceed the current climatic level by no more than 0.7-1.0°C by the year 2050. Local cooling periods 5 to 30 years in length and 0.5-0.7°C in amplitude are expected to occur in some areas of Yakutia. There are no reasons to expect a significant and lasting change towards cooling in the nearest future. This will probably begin in Yakutia from the middle of the 2050s-2060s and reach its maximum by the early next century. The prediction for Yakutia agrees with the results of hydrometeorological and ice extent studies in the Arctic.

**Keywords:** mean annual air temperature  $T_a$  series; Fourier models; prediction.

## Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г.

Л. Г. Нерадовский, Ю. Б. Скачков

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Классическим методом гармонического анализа по 6 метеостанциям, расположенным на юге, севере, западе, востоке и в центральной части Якутии, выполнен прогноз среднегодовой приземной температуры воздуха  $T_{вз}$  до 2050 г. Для этого применялась программа А. П. Кулаичева «Stadia». Методика прогноза предусматривала построение Фурье-моделей в исходном виде и с удалением гармоник межгодовых вариаций  $T_{вз}$  с периодом 3-6 лет. В результате удалось обнаружить не только общие тенденции, но и общие частные особенности поведения Фурье-моделей для всей Якутии. В наибольшей степени они проявлены в длинных рядах  $T_{вз}$  г. Якутска (180 лет) и г. Верхоянска (122 года). Благодаря этому есть основание говорить о том, что наблюдаемое в Якутии потепление климата будет протекать по умеренному сценарию, как и в Западной Сибири. В ближайшие годы темп роста  $T_{вз}$  ослабнет и войдет в длительную стадию стабилизации, который рассматривается как фрагмент векового фона, сопряженного с областью максимального фазового равновесия. По всей вероятности, к 2050 г. рост температуры превысит достигнутый климатический уровень не более чем на 0,7 – 1,0° С. В отдельных местах Якутии ожидаются локальные периоды похолодания длительностью 5 – 30 лет с амплитудой 0,5 – 0,7° С. Говорить о кардинальном изменении климата в ближайшие годы в сторону похолодания на длительный период времени преждевременно. Вероятнее всего, перелом в сторону длительного и сурового похолодания климата начнется в Якутии примерно с середины 50 – 60-х годов текущего века и достигнет максимума в начале следующего века. Прогноз по Якутии согласуется с результатами исследований гидрометеорологических и ледовых условий в Арктике.

**Ключевые слова:** ряды среднегодовой температуры воздуха  $T_{вз}$ ; Фурье-модели; прогноз.

# Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г.

Л. Г. Нерадовский, Ю. Б. Скачков

## Введение

Угроза необратимости происходящих в настоящее время изменений глобального и регионального климата с их негативными последствиями, недостаточная изученность причин и пространственно-временных закономерностей происходящих изменений климата, а также связанная с этим неопределенность реакции криолитозоны делает тему прогнозных исследований актуальной. В текущий этап развития человеческого общества она остро востребована при долгосрочном стратегическом планировании сценариев развития экономики и промышленности северных территорий России и в частности такого крупного её региона, как Республики Саха (Якутия).

## Цель исследований

Проанализировать данные метеостанций расположенных в разных местах Якутии и на их основе составить числовой долговременный прогноз изменения среднегодовой приземной температуры воздуха до 2050 г. Для достижения поставленной цели применялись современные компьютерные технологии математического моделирования, использующие классический метод гармонического анализа.

## Характеристика метеоусловий

Особенностью резко континентального климата, свойственного практически всей территории Якутии, является высокая межгодовая изменчивость среднегодовой температуры воздуха  $T_{вз}$ . За период 1966–2009 гг. вариации этой величины на всех метеостанциях составили в среднем 4–5° С. Минимум вариаций (–3,4° С) отмечался в п. Батамай, а максимум (–5,6° С) – в пгт. Тикси и пгт. Чульмане.

Глобальное потепление климата, начавшееся во 2-й половине 60-х годов прошлого века на большей части Северного полушария, затронуло и территорию Якутии. В период 1966–1988 гг. потепление в этом регионе проходило относительно плавно и характеризовалось практически зональным распределением приращения температуры воздуха.

В начале 90-х годов процесс потепления климата проявился более резко. Повышение температуры воздуха отмечается на всей территории Якутии, причем оно пространственно неоднородно: южнее 64° с.ш. приращение  $T_{вз}$

составило 1,5–2°С и более, а на северо-западе и северо-востоке Якутии –0,5–1,0° С. Необходимо отметить, что подавляющий вклад в повышении среднегодовой температуры воздуха принадлежит зимам. Они стали теплее и, что особенно существенно, – в Центральной и Южной Якутии. Летнее потепление пока не столь заметно [1].

Тренды температуры имеют на территории Якутии тенденцию к потеплению. Оно также неоднородно в пространстве. По-прежнему влияние зимних температур на среднегодовые значения остается существенным. Хотя и возросло число метеопунктов, где повышение среднелетних температур воздуха стало статистически значимым. Все эти пункты расположены южнее широты Верхоянска (69°).

На значительной части Якутии колебания температуры за исследуемый период наблюдений (1966–2009 гг.) происходили достаточно синхронно, но с разной амплитудой (рис. 1). На высокую степень согласованности межгодовых изменений среднегодовой температуры воздуха указывают и коэффициенты парной корреляции между шестью пунктами, находящимися на довольно удаленном друг от друга расстоянии.

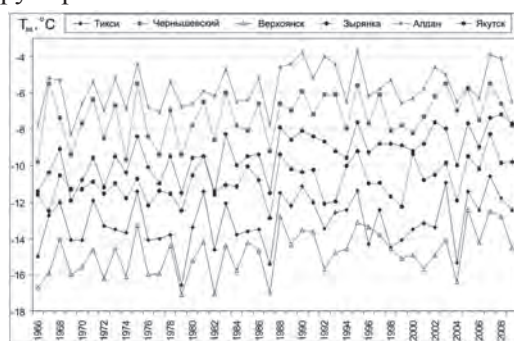


Рис. 1. Пространственно-временная изменчивость среднегодовой температуры воздуха в Якутии за период 1966–2009 гг.

Отмеченные региональные особенности поведения температурных рядов во времени и пространстве легли в основу численного прогноза температуры воздуха в Якутии.

## Методика прогнозирования

Использованный фактический материал достаточен по объёму и содержанию для выявления тех закономерностей изменения



среднегодовой температуры воздуха в Якутии, которые могут с той или иной степенью вероятности произойти в ближайшие десятки лет.

Задача долгосрочного прогнозирования температурных рядов  $T_{вз}$ , как и другие задачи подобного рода, не имеет точного решения в силу известной всем аксиомы – будущее не может быть известным человеческому обществу. Методы прогнозирования при всей своей математической изощрённости позволяют всего лишь увидеть некоторые черты или признаки будущего, содержащиеся в общих и устойчивых закономерностях настоящего времени.

Именно поэтому при прогнозировании основное внимание уделялось не точному соблюдению формальных процедур цифрового анализа, а поиску репрезентативного исходного фактического материала (температурных рядов  $T_{вз}$ ), содержащего в себе искомые периодические закономерности в максимально возможной полноте признаков.

Из многообразия большого объёма имеющегося материала в ходе разведочного статистического анализа были выбраны шесть метеостанций на юге, севере, западе, востоке и в центральной части Якутии (таблица).

Список метеостанций

Пункты наблюдений	Период наблюдений	Начало прогноза	Длина ряда $T_{вз}$
Алдан	1926-2009	1930	80
Якутск	1830-2009	1830	180
Чернышевский	1966-2009	1966	44
Зырянка	1965-2009	1965	45
Верхоянск	1888-2009	1888	122
Тикси	1933-2009	1936	74

В качестве инструмента математического прогнозирования был выбран алгоритм способа построения Фурье-модели. Он разработан А. П. Кулаичевым и реализован в одном из обрабатывающих модулей программы «Stadia» [2]. Главное её достоинство среди других программ – это адаптация обратного преобразования Фурье к особенностям структуры исходного ряда  $T_{вз}$ , включая его частотную фильтрацию, очистку шумов и пр. тонкостей цифровой обработки.

Адаптация прогнозной модели осуществляется посредством последовательного приближения к временному ряду по критерию наименьших квадратов трёх параметров – амплитуды, фазы и частоты по каждой ненулевой спектральной составляющей модели.

Каждый из трёх параметров итерационным образом изменяется программой «Stadia» таким образом, чтобы достигнуть максимального приближения модели к временному ряду. Именно поэтому адаптация по частоте приводит к не повторению в прогнозе начала модели временного температурного ряда.

Методика прогнозирования предусматривала для каждой метеостанции перебор нескольких вариантов построения моделей Фурье в 2-х направлениях: в исходном виде без каких-либо преобразований и с удалением короткопериодных составляющих (3 – 6 лет) межгодовых вариаций  $T_{вз}$ .

В своей совокупности короткопериодные вариации настолько сильны (на их долю приходится около 60% всей энергии спектра), что маскируют долговременные и более закономерные изменения температуры, препятствуя или точнее сказать, затрудняя их обнаружение. Это, в свою очередь снижает качество и достоверность решения задачи долговременного прогноза. Именно поэтому хвосты (концы) спектров обрезались и тем самым, устранялись из исходных рядов  $T_{вз}$  помехи – короткопериодные вариации.

Такие процедуры избирательной фильтрации в какой-то мере помогли выйти на правдоподобную оценку прогноза по коротким временным рядам (Чернышевский, Зырянка).

Касаясь вопроса достоверности прогнозной оценки, заметим, что предлагаемый и используемый некоторыми исследователями приём искусственного наращивания длины температурных рядов в начальной их части в принципе непригоден для решения такого рода задач. Он лишь заведомо увеличивает долю случайности и неопределённости в получаемых результатах.

Поэтому для прогноза ряды  $T_{вз}$  использовались такими, какими они были получены за период инструментальных наблюдений. При этом наибольшее предпочтение отдавалось прогнозным оценкам, полученным по длинным рядам. Это г. Якутск и г. Верхоянск. Однако и эти ряды, к сожалению, оказались недостаточными по продолжительности, чтобы по ним можно было получить с необходимой точностью и разрешением спектральную оценку периода вековых (более 100 лет) составляющих изменчивости среднегодовой температуры.

Поэтому при построении долговременного прогноза приходилось ограничиться использованием составляющей с периодом 60 лет. Её наличие обнаруживается в длинных

рядах  $T_{вз}$  по пику энергии в начальной части спектров. Гармоника в 60 лет устойчиво проявляет себя не только в Якутии, но и в Арктике [3].

В силу этого было принято решение использовать её в качестве опорной (реперной) составляющей для прогнозирования трендового изменения среднегодовой температуры воздуха в Якутии до 2050 г.

Фурье-модели вычислены с использованием процедуры сглаживания межгодовой изменчивости 10-летним окном осреднения с последовательным сдвигом окна по заданным рядам  $T_{вз}$  через один год. Для этого применялась программа «Mezozawr». В отличие от других программ, например, «Statistica-6», она корректно выполняет операцию сглаживания сложнопо-строенных многокомпонентных рядов.

### Результаты прогноза

Большой объём графического материала результатов прогнозирования не позволяет представить их в полном виде. Поэтому в настоящей работе приводится описание результатов прогноза лишь по графику наиболее длинного ряда  $T_{вз}$  г. Якутска (рис. 2).

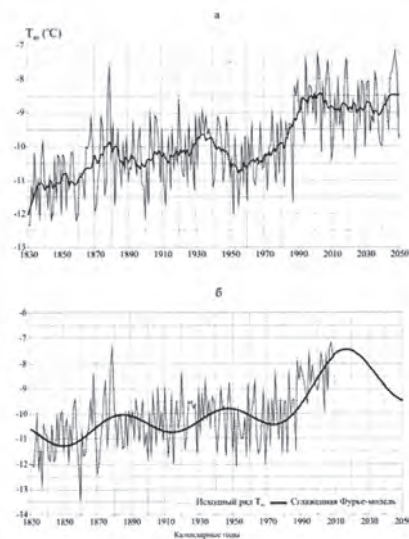


Рис. 2. График исходного температурного ряда  $T_{вз}$  и его Фурье-модели с прогнозом до 2050 г.: а – сглаженная модель в 10-летнем окне осреднения; б – с фильтрацией периодических составляющих длительностью более 60 лет.

Сохранение в спектре короткопериодной составляющей и очистка шумов на уровне 35% энергии обеспечивает хорошую сходимость по морфологическому показателю общей формы и деталей ряда  $T_{вз}$  и его модели Фурье (средняя разница между ними  $0,24^{\circ}\text{C}$ ).

Прогнозная часть модели ряда  $T_{вз}$  сохраняет в себе черты исходного процесса – сильные осцилляции межгодовой изменчивости температуры воздуха. На этом фоне трудно обнаружить и принять решение о существовании тенденции к повышению-понижению температуры. Можно лишь констатировать факт стабилизации температурного режима в интервале  $-8,5...-9,0^{\circ}\text{C}$ . Ситуация проясняется после сглаживания модели скользящим окном длительностью 10 лет (рис. 2, а). Становится понятным, что в 10-летнем цикле процесс похолодания воздуха, начавшийся в 2002 г., носит медленный характер и будет продолжаться до 2040 г. Далее ожидается период потепления с возвратом температуры воздуха на уровень минус  $8,5^{\circ}\text{C}$ .

Более упрощённая картина прогноза наблюдается при построении модели ряда  $T_{ср}$  с пропуском гармоник спектра длительностью более 60 лет (рис. 2, б). В этом варианте прогноза потепление в г. Якутске будет продолжаться с выходом на максимальный уровень (минус  $7,5^{\circ}\text{C}$ ) в 2015 г. После этого, начиная с 2020 г., начнётся монотонное понижение температуры воздуха. На конец прогнозного периода оно достигнет уровня минус  $9,5^{\circ}\text{C}$ . Разница в сравнении с достигнутым климатическим уровнем велика и составляет два градуса.

Прогноз по г. Якутску согласуется с результатами исследований гидрометеорологических и ледовых условий в Арктике [3]. Используя естественный 60-летний цикл изменения температуры воздуха в качестве основы для долговременного прогноза, исследователи пришли к выводу: «С большой степенью вероятности тёплый период завершится около 2015 – 2020 гг. Дальнейшее понижение температуры, согласно прогнозу, продлится примерно до середины 30-х годов XXI века, после чего вновь следует ожидать переход к очередному потеплению, которое, как и предыдущее, будет ограничено во времени».

Поясним, что прогнозная оценка в Арктике получена только по одной гармонике длительностью 60 лет с амплитудой  $0,6^{\circ}\text{C}$  без учёта линейного тренда температуры воздуха.

Примечательно, что полученные для разных климатических условий прогнозные оценки температурного размаха в максимальных фазах потепления-похолодания практически совпадает. Для г. Якутска она равна, как уже отмечалось выше, два градуса, а в Арктике –  $1,8^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Разница в  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

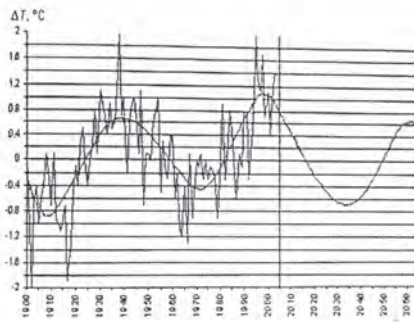


Рис. 3. Изменения аномалии среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне 70 – 85о с.ш. в XX – начале XXI века и её фонный прогноз [3].

Для обоснования объективности и в какой-то степени достоверности прогноза, полученного для условий Центрально-Якутской низменности, на которой расположен г. Якутск, сошлёмся еще на один результат недавно проведенных ИМЗ им. П. И. Мельникова СО РАН исследований [4]. Они выполнены по классической схеме гармонического анализа с расчётом температуры воздуха на весьма длительный период времени – до конца следующего века.

Судя по прогнозу, начало устойчивого похолодания в г. Якутске начнётся в 2018 г. и продолжится до 2048 г. Далее вновь начнётся потепление с устойчивыми и меньшими температурами, чем за предыдущий климатический период на уровне минус 9 – 10° С.

Разница в прогнозных моделях по г. Якутску есть, но она касается деталей и не меняет сути главного результата.

### Выводы

Сопоставление частных особенностей и общих тенденций поведения графиков Фурье-моделирования температурных рядов разной длительности и спектрального состава даёт основание для следующих выводов:

1. По совокупности амплитудно-фазовых атрибутов ожидается, что наблюдаемое на территории Якутии потепление климата будет протекать по умеренному сценарию, как и в Западной Сибири.

2. В ближайшие несколько лет линейный темп нарастания среднегодовой температуры воздуха ослабнет и войдёт в длительную стадию затухания или стабилизации. По всей вероятности, к концу прогнозного периода она будет превышать достигнутый климатический уровень не более чем на 0,7 – 1,0° С.

3. Асимптотический (стабилизационный) участок, найденный по совокупности прогнозных графиков температур по 6 метеостанциям, рассматривается как фрагмент векового фона,

сопряжённый с областью максимального фазового равновесия.

Здесь ожидаются локальные по времени, месту и амплитуде (0,5 – 0,7° С) периоды похолодания длительностью 5 – 30 лет.

### Заключение

Говорить о кардинальном изменении климатической обстановки в ближайшие годы в сторону резкого похолодания на длительный период времени преждевременно. Для этого сценария фактический материал не даёт убедительных аргументаций.

Вероятнее всего, перелом в сторону длительного и сурового похолодания климата начнется в Якутии, где-то с середины 50-60-х годов текущего века и достигнет температурного минимума в начале следующего века.

### Список литературы

1. Скачков, Ю. Б. Тенденции современных изменений температуры воздуха в республике Саха (Якутия). Исследования ландшафтов криогенных областей / Ю. Б. Скачков // Вопросы географии Якутии. – Вып. 9. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2005. – С. 27–31.

2. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных. 4-е изд., перераб. и доп. / А. П. Кулаичев. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.

3. Фролов, Е. И. и др. Научные исследования в Арктике / Е. И. Фролов и др. Том 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. – СПб : Наука, 2007. – 158 с.

4. Балобаев, В. Т. Прогноз изменения климата и мощности мёрзлых пород Центральной Якутии до 2200 г. / В. Т. Балобаев, Ю. Б. Скачков, Н. И. Шендер / География и природные ресурсы, №2, 2009. – С. 50–55.

### References

1. Skachkov, Yu.B. 2005. Recent trends in air temperature in the Republic of Sakha (Yakutia) In: *Issues of the Geography of Yakutia, vol. 9, Landscape Investigations in Cryogenic Regions*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 27-31. (in Russian)

2. Kulaichev, A.P. 2006. *Methods and Tools for Integrated Data Analysis*, 4 th ed. Moscow: FORUM: IN-FRA-M, 512 pp. (in Russian)

3. Frolov, E.I. et al. 2007. *Scientific Investigations in the Arctic. Vol. 2, Climate-Induced Changes in Ice Extent in the Eurasian Shelf Seas*. St. Petersburg: Nauka, 158 pp. (in Russian)

4. Balobaev, V.T., Skachkov, Yu.B., and Shender, N.I. 2009. Predicted changes in climate and permafrost thickness for Central Yakutia to the year 2200. *Geografiya i Prirodnye Resursy* 2: 50-55. (in Russian)

## Consequences of global warming in Arctic Northern Yakutia

S.P. Gotovtsev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: gotovcev@mpi.ysn.ru

**Abstract.** In 2008-2009, integrated investigations were conducted in the Alazeya basin in order to reveal the causes of the observed changes in the river regime. The research program included geotechnical and permafrost investigations in the flood-prone villages; hydrometric measurements along the entire length of the Alazeya River; and fluvial and thermal erosion observations. Studies were carried out to understand how prolonged flooding affects the permafrost conditions, soil and vegetation structure, and water ecosystem.

**Keywords:** Kolyma Lowland; hydrological regime; climate warming; thermokarst; thermal erosion; alas-valley system.

## Последствия глобального потепления климата на арктическом севере Якутии

С. П. Готовцев

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: gotovcev@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** В 2008-2009 гг. в бассейне р. Алазеи были проведены комплексные научно-исследовательские работы по выявлению причин изменения ее режима. Исследованы инженерно-геологические и геокриологические условия территорий подтопляемых населенных пунктов. Проведены гидрометрические работы по всей длине р. Алазеи, изучен характер разрушения берегов и особенности проявления термоэрозионных процессов. Проведены работы по изучению влияния длительного затопления на геокриологические условия, структуру почвенно-растительного покрова и на водную экосистему в целом.

**Ключевые слова:** Колымская низменность; гидрологический режим; потепление климата; термокарст; термоэрозионные процессы; аласно-долинная система.



# Последствия глобального потепления климата на арктическом севере Якутии

С. П. Готовцев

## Введение

По результатам анализа данных метеорологических станций 1990-2000 гг. в северном полушарии Земли средняя температура приземного воздуха возросла на  $0,4^{\circ}\text{C}$ , а среднегодовое количество атмосферных осадков увеличилось на 4-6% [1]. Считается, что глобальное потепление в первую очередь коснется северных районов России, где развиты сильнольдистые многолетнемерзлые горные породы. В этом процессе основную роль будет играть оттаивание льда и сокращение его объема.

В последние годы в разных районах Якутии наблюдается активизация термоэрозийных процессов. Достаточно отметить оврагообразование в г. Покровске, Кысыл-Сыыре, селах Тиит-Ары (Хангаласский улус) и Чакыр (Амгинский улус), а также катастрофическое появление глубокого оврага летом 2007 года в с. Синске. Здесь овраг длиной 800 м и глубиной до 6 м возник, в течение каких-либо 2 – 3 часа. Кроме того, участились случаи подтопления населенных пунктов. Все это мы считаем признаками глобального потепления климата на Севере и начало воздействия этого потепления на мерзлоту.

## Результаты и обсуждение

В Якутии, из-за малочисленности метеорологических станций и постов, количественная оценка темпов и масштабов изменения климата довольно сложно. Например, в пределах огромной территории арктического севера Якутии, насчитывается всего 4–5 метеорологических станций, которые расположены на разных орографических условиях. Тем не менее, даже субъективные показатели изменения природных условий данной территории однозначно показывают изменение климата в сторону потепления. Здесь на реках существенно увеличиваются сроки установления ледового покрова, увеличивается мощность сезоннопротаивающего слоя и усиливается таяние подземных льдов, в результате чего появляется множество термокарстовых озер, обводненных мест и оврагов. На арктическом севере Якутии участились случаи катастрофического наводнения на малых реках. Так, в последние годы большие проблемы встали с

подтоплением населенных пунктов, расположенных в бассейне р. Алазеи.

Метеорологическая станция г. Среднеколымска является ближайшей к бассейну р. Алазеи, где за температурой воздуха наблюдают с 1887 года. Анализ изменения средней годовой температуры воздуха за 120 лет показывает наличие четырех Брикнеровских циклов изменения климата (рис. 1). Как известно, гипотеза о циклических изменениях климата – чередовании прохладно-влажных и тепло-сухих периодов в интервале 35-45 лет, выдвинута еще в конце XIX в. Э.А. Брикнером [6] и А.И. Воейковым [2]. Впоследствии эти научные положения были существенно развиты А.В. Шнитниковым [3, 4, 5] в виде стройной теории о внутривековой и многовековой изменчивости климата и общей увлажненности материков Северного полушария.

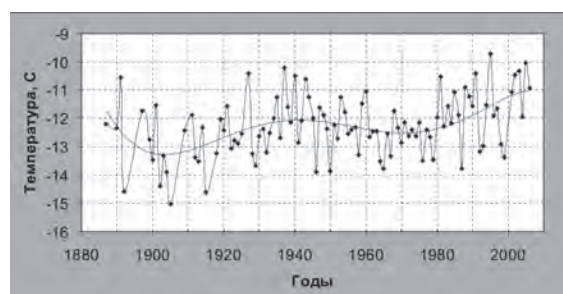


Рис. 1. Многолетний ход температуры воздуха по данным метеорологической станции г. Среднеколымска.

В районе Среднеколымска периоды похолоданий наблюдались в 1900-х и 1970-х годах, а в сороковых годах XX-го века, а также в последние годы наблюдается потепление климата. Установлено, что за последние 40 лет в регионе произошло повышение средней годовой температуры воздуха на  $1,8^{\circ}\text{C}$ .

За это время увеличивается и среднее количество осадков, особенно выпадающих в теплое время года (рис. 2).

Детальное изучение геокриологических и инженерно-геологических условий надпойменных террас, на которых построены подтопляемые населенные пункты, показало, что верхняя часть криогенной толщи

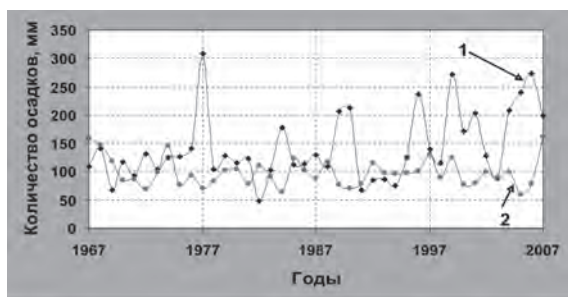


Рис. 2. Изменение количества жидких (1) и твердых (2) осадков по данным метеостанции Среднеколымск за последние 40 лет.

представлена верхне-четвертичными и современными озерно-аллювиальными отложениями, относящимися к ледовому комплексу. Повторно-жильные льды мощностью 4 - 5 м вскрываются с глубины 1,2 - 1,3 м. По составу и особенностям криолитологического строения разрез состоит из двух горизонтов. Верхний, имеет мощность 3,7 - 5,6 м и представлен пылеватым суглинком серовато-коричневого цвета пойменной фации речных отложений, а нижний – озерно-аллювиальным.

Льдистость грунтов достигает 40 - 60%. Температура ММП изменяется от 3 - 5° до 5-7° С. Причем, в с. Аргахтах на участке, находившемся длительное время под водой, температура пород повысилась примерно на 2,0 - 2,5° С. Наблюдается увеличение глубины сезонного протаивания грунтов (СТС). Если раньше его мощность изменялась в пределах 0,6 - 0,75 м, то в конце сентября 2009 г. она составила 0,8 - 1,0 м, т.е. увеличилась примерно на 15 - 30%, что способствовало полному исчезновению высокольдистого защитного слоя, расположенного на границе СТС. При этом произошло также оттаивание верхней части консервированных повторно-жильных льдов с повсеместным проявлением локальных термокарстовых просадок поверхности.

Маршрутными исследованиями установлено, что в водосборном бассейне р. Алазеи происходит переполнение акваторий озер и массовый сход их вод в долину реки. Основной причиной переполнения озер явилось увеличение мощности СТС с деградацией верхней части ледового комплекса, что в свою очередь, вызвало резкое увеличение составляющего надмерзлотного стока.

Из-за больших размеров озер масса спущенной воды, как правило, бывает значительной. Эта вода, накапливаясь в виде разливов в прирусловой части долины, является своеобразным гидрологическим барьером и

играет основную роль в подтоплении населенных пунктов.

Таким образом, в настоящее время в результате активизации термоэрозионных процессов между приводораздельными озерами и долиной р. Алазеи здесь формируется аласно-долинная система, резко увеличивающая водосборный бассейн самой реки (рис. 3).



Рис. 3. Формирование аласно-долинной системы в результате спуска озер в бассейне р. Алазеи.

### Заключение

Проведенные комплексные научно-исследовательские работы в бассейне р. Алазеи показали, что за последние сорок лет в арктическом севере Якутии произошло повышение средней годовой температуры воздуха на 1,8° С. С повышением температуры произошла деградация верхней части ледового комплекса, увеличилась глубина сезонного протаивания с полным вытаиванием его защитного слоя. В связи с этим произошло кратковременное увеличение надмерзлотного стока, что способствовало переполнению акваторий озер.

Таким образом, резкое изменение гидрологического режима р. Алазеи и подтопление населенных пунктов в его бассейне связано с нарушением водного баланса, вызванного попаданием вод близлежащих озер в речную систему. В настоящее время на месте водораздельных озер формируются аласы, а между ними и долиной р. Алазеи формируется аласно-долинная система, резко увеличивающая водосборный бассейн последней. Исходя из этого, необходимо констатировать, что в арктическом севере Якутии наблюдаются необратимые изменения орографической поверхности, как результат глобального потепления климата.

### Благодарности

Работа выполнена по Программе интеграционного проекта Отделения наук о Земле Эволюция криосферы в условиях меняющегося климата: ОНЗ-13.3 «Влияние изменений климата на гидрологический режим равнинных рек арктической зоны Восточной Сибири».

### Список литературы

1. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010-2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. – М.: Росгидромет, 2005. – 28 с.
2. Воейков, А. И. Колебания климата и уровня озер Туркестана и Западной Сибири / А. И. Воейков. – Метеорологич. вестник. – 1901. – № 3. – С. 16–27.
3. Шнитников, А. В. Внутривековые колебания уровня степных озер Западной Сибири и Северного Казахстана и их зависимость от климата / А. В. Шнитников // Тр. лаб. озероведения АН СССР. – 1950. – Т. 1. – 129 с.
4. Шнитников, А. В. Изменчивость общей увлажненности материков Северного полушария. / А. В. Шнитнико // Зап. Геогр. общества СССР. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957. – Т. 16. – С. 1–336.
5. Шнитников, А. В. Внутривековая изменчивость компонентов общей увлажненности / А. В. Шнитников. – Л. : Наука, 1969. – 244 с.

6. Bruckner Ed. 1890. Klimaschwankungen seit 1700 hebst Bemerkungen uber die Klimaschwankungen der Diluvialzeit. Georg. Abhandl.von A. Penck, bd. 4, hf. 2: 43-58.

### References

1. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). 2005. *Strategic-Prediction for the Period of up to 2010-2015 of Climate Change Expected in Russia and Its Impact on Sectors of the Russian National Economy*. Moscow, 28 pp.
2. Voeykov, A.I. 1901. Climate and lake-level fluctuations in Turkestan and West Siberia. *J. Meteorologi-cheskii Vestnik* 3: 16-27. (in Russian)
3. Snnitnikov, A.V. 1950. Intrasecularlakelevel variations in the steppes of West Siberia and northern Kazakhstan. *USSR Ac. Sci. Limnological Laboratory Transactions*, vol. 1, 129 pp. (in Russian)
4. Shnitnikov, A.V. 1957. Variability of general wetness in the continents of the Northern Hemisphere. In: *Notes of the USSR Geographic Society*, vol. 16: 1-336. Moscow-Leningrad: USSR Acad. Sci. Press. (in Russian).
5. Shnitnikov, A.V. 1969. *Intrasecular Variability of General Wetness Components*. Leningrad: Nauka, 244 pp. (in Russian)
6. Bruckner Ed. 1890. Klimaschwankungen seit 1700 hebst Bemerkungen uber die Klimaschwankungen der Diluvialzeit. *Georg. Abhandl.von A. Penck*, bd. 4, hf. 2: 43-58.

## Thermal state of upper permafrost in Central Yakutia under contemporary climate change

S.P. Varlamov, Yu.B. Skachkov, P.N. Skryabin, N.I. Shender

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Evolution of the ground thermal state was studied to assess the impact of current warming on permafrost in Central Yakutia. Long-term meteorological records from the region were analyzed which indicated one of the strongest warming trends in mean annual air temperature for northern Russia. Harmonic analysis was performed to predict future changes in surface air temperature. Data from ground thermal observations conducted at the Chabyda monitoring site near Yakutsk since 1981 were used to determine long-term changes in indicators of evolution of the ground thermal state, ground temperature at the base of the active layer, temperature at the depth of zero annual amplitude, and depth of seasonal thaw. Snow accumulation was found to be the main factor controlling the thermal state of soils. Long-term variability of thaw depth shows near-zero to weak positive trends in small valleys in contrast to weak negative trends on slopes. During the last two years, anomalously low snowfall and late snowpack establishment resulted in strong cooling of the ground despite of anomalously warm winter and summer air temperatures. Under considerable warming of the climate, the thermal state of upper permafrost remains relatively stable in Central Yakutia.

**Keywords:** climate; permafrost; monitoring; thaw depth; temperature; trend.

## Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном изменении климата

С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрыбин, Н. И. Шендер

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Исследования эволюции теплового состояния грунтов проведены с целью оценки влияния современного потепления климата на криолитозону Центральной Якутии. Анализ многолетних данных метеостанций региона четко показал один из наиболее высоких на севере России трендов повышения средней годовой температуры воздуха. Составлен прогноз изменения приземной температуры воздуха методом гармонического анализа. Мониторинг термического режима грунтов в естественных условиях, проводимый авторами с 1981 г. на стационаре Чабыда в окрестностях г. Якутска, позволяет выявить его многолетнюю динамику в широком спектре природных условий. Экспериментальные исследования позволили выявить многолетнюю динамику индикаторов эволюции теплового состояния грунтов: температуры грунтов на подошве активного слоя и слоя годовых теплооборотов, глубины сезонного протаивания. Установлено, что основным определяющим фактором формирования термического состояния грунтов является режим снегонакопления. Тренды многолетней изменчивости глубины сезонного протаивания в мелкодолинном типе местности изменяются от близких к нулю до слабоположительных значений, в склоновом типе местности наоборот, преобладают слабоотрицательные тренды. В последние два года anomalously малоснежные зимы с поздними сроками установления снежного покрова, несмотря на anomalously теплые зимние и летние сезоны, привели к сильному охлаждению грунтов. На фоне значительного потепления климата тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны остается достаточно устойчивым.

**Ключевые слова:** климат; мерзлые грунты; мониторинг; глубина протаивания; температура; тренд.



# Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном изменении климата

С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрыбин, Н. И. Шендер

## Введение

В последние десятилетия, в связи с развитием во многих странах исследований по изучению современного изменения климата, возрос интерес к работам, рассматривающим проблемы реакции вечной мерзлоты на прогнозируемое потепление. Исследования влияния современного потепления климата на криолитозону охватывают широкий круг задач, включая эволюцию теплового состояния верхних горизонтов многолетнемерзлых пород. Это стало одним из приоритетных направлений геофизиологических исследований, имеющих важное научное и практическое значение.

Информационной основой исследований термического состояния верхних горизонтов криолитозоны и выполнения прогнозных оценок ее изменений при ожидаемом потеплении климата служат данные метеорологических станций, геофизиологических стационаров и мониторинговых полигонов, региональных и инженерно-геофизиологических работ.

## Изученность вопроса и методика

В Центральной Якутии первые систематические температурные наблюдения в скважинах глубиной до 10–15 м стали проводиться с 1935 г. мерзлотной станцией Главсевморпути. Исследования выявили особенности изменений температуры и глубины протаивания грунтов под влиянием растительного и снежного покровов, «культурного слоя» и геолого-геоморфологических условий [1, 2].

В 40-е годы XX в. были организованы экспериментальные наблюдения за изменением температурного режима грунтов под теплоизоляционными покрытиями при удалении снежного и травяного покровов и в естественных условиях на опытных площадках Якутской НИМС [3–5].

В 50–60-е гг. XX в. более детальные и комплексные теплофизические наблюдения за формированием теплового режима горных пород были организованы по улучшенной методике на опытной площадке Института мерзлотоведения под руководством Н. С. Иванова [6].

В Центральной Якутии локальные и региональные закономерности формирования теплового режима грунтов наиболее детально

выявлены при широком применении стационарных методов исследований [7, 8 и др.]. В 60–80-е гг. круглогодичные теплобалансовые исследования по значительно расширенной программе выполнены на стационарах Якутск, Сырдах, Зеленый луг и Чабыда [9–12]. Исследования охватили как естественные ландшафты, так и техногенные. Детально изучены суточный, сезонный и годичный ход теплообмена поверхности с атмосферой, разработан ряд новых математических моделей промерзания-протаивания грунтов.

Исследования гидротермического режима мерзлотных почв при сельскохозяйственном освоении и мелиорации проведены в 60–80-е гг. прошлого века на сезонных стационарах Хатассы, Хоробут, Амга [13, 14].

В настоящее время мониторинговые исследования термического режима грунтов проводятся на стационарах Чабыда, Якутск и полигонах на северном участке трассы железной дороги Томмот – Якутск, Юкэчи, Умайбыт, Кердюген и др. Объектами исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов (глубина 10–20 м). Основными термическими параметрами являются глубина сезонного протаивания ( $\xi$ ) и средние годовые температуры на подошвах слоя сезонного протаивания ( $T_{\xi}$ ) и слоя годовых теплооборотов ( $T_{10}$ ).

В 90-е гг. XX в. по международным программам “GEMEX-GAME”, “CREST”, “JST” совместным российско-японским и российско-голландским научным проектам на стационарах Спасская Падь и Нэлэгэр были начаты режимные экспериментальные исследования. Целью исследований являлись: изучение многолетней динамики температуры почвогрунтов и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород, влажностного режима почв, глубины сезонного протаивания, водно-теплового баланса и углеродных потоков [15].

А. В. Павловым подведены итоги исследований эволюции термического состояния верхних горизонтов криолитозоны за период, начиная от III Международного геофизического года (1957–1959 гг.) до IV Международного полярного года (2007–2008 гг.) на территории России [16]. В. Е. Романовский и др. [17] оценили тепловое состояние криолитозоны

России за последние 20–30 лет, но Центральная Якутия в обзор не вошла. Данная работа в какой-то мере восполнит этот пробел.

### Современное изменение климата

Прогнозы изменения температуры воздуха в XXI веке у исследователей разные. Прогноз изменения климата, составленный Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (ГГО), основанный на результатах экстраполяции климатических характеристик, показывает, что фактически наблюдаемый тренд потепления на территории России к 2010–2015 годам сохранится и приведет к росту, по сравнению с 2000 годом, средней годовой температуры приземного воздуха на 0,4–0,8 °С, а к 2030 году – на 1,5 °С. Также прогнозируется дальнейший рост среднего количества осадков, преимущественно за счет их увеличения в холодный период. На севере Восточной Сибири ожидается увеличение количества осадков зимой на 7–9%, увеличение снегонакоплений на 2–4% [18]. В конце XXI в. в Восточной Сибири ожидается повышение средней годовой температуры приземного воздуха на 4–8 °С по сравнению со средними значениями температур двух последних десятилетий XX века [19]. Прогноз изменения среднегодовой температуры приземного воздуха в г. Якутске, составленный в Институте мерзлотоведения СО РАН с помощью метода гармонического анализа до 2015 г., почти совпадает с прогнозом Главной геофизической обсерватории, а далее расходится [20, 21]. Авторы прогнозируют похолодание до середины XXI в. на 2–3 °С. Исследователей особенно беспокоит

прогнозируемое увеличение количества осадков зимой и увеличение снегонакоплений, играющих значительную роль в повышении температуры грунтов.

### Результаты и обсуждение

Мониторинг термического режима грунтов в естественных условиях, проводимый авторами с 1981 г. на стационаре Чабыда в окрестностях г. Якутска, позволяет выявить его многолетнюю динамику в широком спектре природных условий. Ценность многолетних наблюдений состоит также в создании банка данных, необходимых для модельных прогнозов возможных изменений состояния криолитозоны при потеплении климата.

Стационар Чабыда находится в 20 км к юго-западу от г. Якутска, у оз. Малая Чабыда. Рельеф района исследований характеризуется сочетанием пониженных и возвышенных участков холмисто-увалистой равнины. Экспериментальные исследования были организованы в двух типах местности: мелкодолинный – днище долины ручья (пл.: 3а, 8а, С-1) и на ложбине стока (пл. 8); склоновый – на пологом склоне (пл.: 5, 6б), на приводораздельном склоне (пл.: 7б и 9) и на умеренно-крутых склонах северной (пл. 10) и южной (пл. 11) экспозиций. В районе исследований, в зависимости от ландшафтных условий, глубина сезонного протаивания варьирует от 0,37 до 4,11 м, а средняя годовая температура на подошве слоя сезонного протаивания – от 0 до –7,4 °С и на подошве слоя годовых теплооборотов от –0,2 до –4,9 °С.

Таблица 1 дает представление об изменчивости глубины сезонного протаивания и средней годовой температуры грунтов.

Средние многолетние и экстремумы основных параметров слоя годовых теплооборотов

№ площ.	Годы наблюдений	$\xi$ , м			$T_{\xi}$ , °С			$T_{10}$ , °С		
		Min	Среднее	Max	Min	Среднее	Max	Min	Среднее	Max
Мелкодолинный тип местности										
С-1	1981-2010	0,81	1,07	1,30	-5,1	-2,7	-0,6	-3,4	-2,7	-1,8
3а	1986-2010	0,37	0,44	0,53	-7,4	-4,9	-1,3	-4,9	-3,9	-2,8
8	1982-2010	0,86	1,16	1,37	-5,5	-3,5	-1,3	-3,3	-2,7	-1,9
8а	1986-2010	0,65	1,05	1,45	-6,5	-3,6	-0,1	-4,5	-3,5	-1,8
Склоновый тип местности										
5	1981-2010	3,37	3,55	3,86	-1,0	-0,4	-0,1	-0,6	-0,4	-0,3
6б	1986-2010	3,54	3,85	4,11	-0,9	-0,4	0,0	-0,6	-0,4	-0,2
7б	1986-2010	1,70	1,86	2,00	-2,2	-1,2	-0,4	-1,5	-1,0	-0,3
9	1985-2010	1,31	1,52	1,72	-3,6	-2,4	-1,0	-2,5	-2,2	-1,8
10	1986-2010	1,63	1,91	2,11	-2,8	-1,8	-0,7	-2,4	-2,0	-1,6
11	1986-2010	1,73	1,92	2,27	-2,2	-0,9	-0,2	-1,5	-1,2	-0,9

29-летний цикл наблюдений за тепловым состоянием грунтов показал, что на фоне значительного повышения средней годовой температуры воздуха (рис. 1), глубина сезонного протаивания их остается достаточно стабильной (рис. 2). Значительные межсезонные изменения глубины сезонного протаивания присущи грунтам мелкодолинного типа местности. Здесь отмечается тенденции к ее увеличению, а в склоновом типе местности, наоборот, некоторое уменьшение ее. В мелкодолинном типе местности особенно заметное увеличение глубины сезонного протаивания наблюдается в период с 2002 по 2008 гг. Это связано с повышением увлажнения сезонного талого слоя.

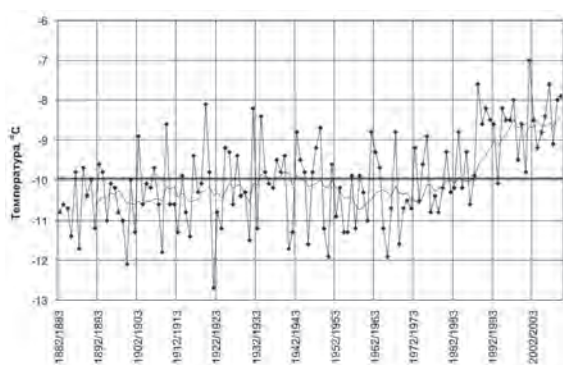


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха в Якутске.

Жирная линия – 10-летняя скользящая средняя, прямая жирная линия – средняя многолетняя.

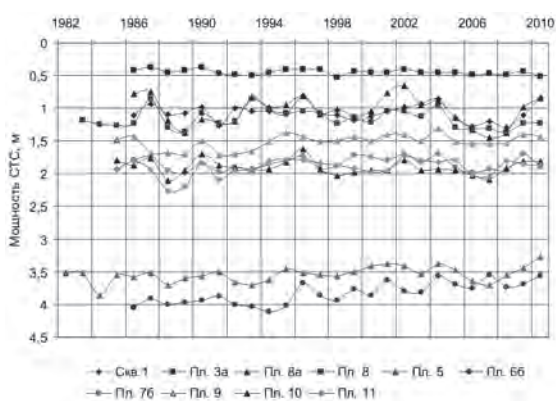


Рис. 2. Многолетнее изменение мощности деятельного слоя в различных ландшафтных условиях.

В мелкодолинном типе местности тренды многолетней изменчивости глубины сезонного протаивания изменяются от близких к 0 до положительных (0,4 см/год) значений, в склоновом типе местности, наоборот, преобладают отрицательные тренды (-0,15...-1,9 см/год).

Исключение составляют лишь склоны северной экспозиции (пл. 10), где наблюдается положительный (0,6 см/год) тренд.

Как правило, самые низкие температуры грунтов формируются в малоснежные годы с аномально поздним образованием устойчивого снежного покрова (рис. 3, 4). Более высокие температуры формируются в многоснежные годы с аномально ранним образованием устойчивого снежного покрова. Из этих двух факторов, определяющих формирование температурного режима грунтов, основным являющимся фактором теплового состояния грунтов слоя годовых теплооборотов в Центральной Якутии являются циркуляционные процессы атмосферы в холодный период года. Здесь следует отметить, что в последнее десятилетие заметно увеличилась амплитуда колебаний средней зимней высоты снежного покрова (см. рис. 3), свидетельствующая о неустойчивости циркуляционных процессов в холодный период.

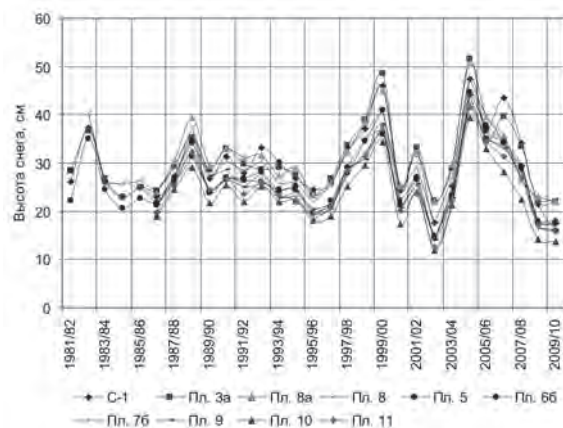


Рис. 3. Многолетнее изменение средней зимней высоты снежного покрова в различных ландшафтных условиях на стационаре Чабыда.

За весь период наблюдений самые низкие и высокие температуры грунтов отмечены соответственно в 2003 и 2007 годах (см. рис. 4). Зима 2002 – 2003 годов была аномально малоснежной, с аномально поздним сроком образования устойчивого снежного покрова. Последующие годы характеризовались многоснежными зимами (см. рис. 3) и обильными осенними осадками.

В целом на территории стационара Чабыда с 2003 по 2007 годы температура грунтов в различных ландшафтах повысилась на 0,5 – 6,0 °С на подошве слоя сезонного протаивания и на 0,3 – 4,5 °С – на подошве слоя годовых теплооборотов.



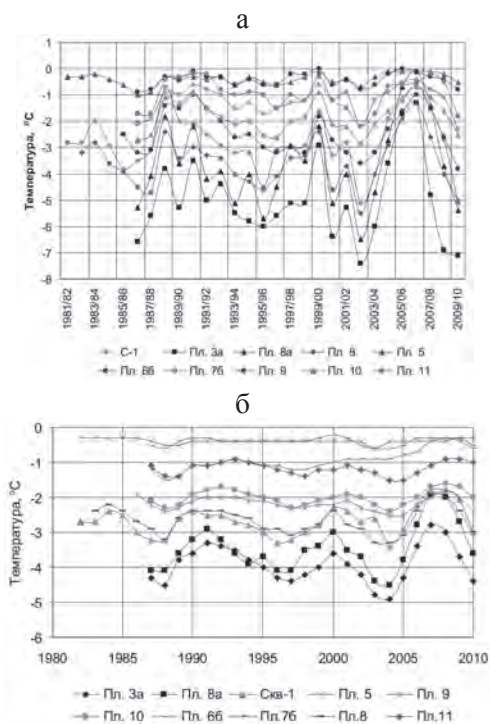


Рис. 4. Многолетнее изменение средней годовой температуры грунтов на подошве деятельного слоя (а) и на подошве слоя годовых теплооборотов (б) в различных ландшафтных условиях.

Зима 2007 – 2008 годов оказалась многоснежной в целом за сезон, но в первой половине она была малоснежной, с поздним сроком образования устойчивого снежного покрова. Эти метеорологические факторы привели к некоторому охлаждению грунтов на подошве слоя сезонного протаивания. Последние две зимы (2008 – 2009 гг. и 2009 – 2010 гг.) были аномально малоснежными, с поздними сроками образования устойчивого снежного покрова, что привело к сильному охлаждению грунтов слоя годовых теплооборотов, несмотря на аномально теплые годы.

### Выводы

1. В последние 30 лет в Центральной Якутии наблюдается одно из наиболее высоких на севере России повышение средней годовой температуры воздуха.
2. На этом фоне глубина сезонного протаивания остается достаточно стабильной.
3. Многолетняя динамика термического состояния грунтов в слое годовых теплооборотов свидетельствует о его относительной устойчивости.
4. Основным регулирующим фактором устойчивого термического состояния грунтов является режим снегонакопления.

### Список литературы

1. Мельников, П. И. Вечная мерзлота в районе г. Якутска / П. И. Мельников // Исследование вечной мерзлоты в ЯАССР. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – Вып. 2. – С. 52–70.
2. Соловьев, П. А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / П. А. Соловьев. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.
3. Шимановский, С. В. Влияние покрытий на тепловой режим грунтов / С. В. Шимановский // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. – Якутск, 1942. – Вып. 1. – С. 44–55.
4. Герасимов, Н. Н. Годовой ход температур грунтов в районе г. Якутска / Н. Н. Герасимов // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. – Якутск, 1950. – С. 179–191.
5. Ефимов, А. И. Некоторые результаты 3-годичных наблюдений за температурой грунтов в районе г. Якутска // Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Вып. 3. – С. 8–19.
6. Иванов, Н. С. О тепловом режиме верхнего слоя земной коры в районе Якутска / Н. С. Иванов // Тепло- и массообмен в мерзлых толщах земной коры. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 9–55.
7. Гаврилова, М. К. Климат и многолетнее промерзание горных пород / М. К. Гаврилова. – Новосибирск: Наука, 1978. – 212 с.
8. Арэ, Ф. Э. Температурный режим горных пород под усыхающим термокарстовым озером в Центральной Якутии / Ф. Э. Арэ // Вопросы географии Якутии. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – С. 70 – 75.
9. Павлов, А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах СССР / А. В. Павлов. – Якутск, 1975. – 302 с.
10. Павлов, А. В. Теплофизика ландшафтов / А. В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 284 с.
11. Скрябин, П. Н. Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска / П. Н. Скрябин, С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков; отв. ред. А. А. Мандаров. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 143 с.
12. Варламов, С. П. Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии / С. П. Варламов, Ю. Б. Скачков, П. Н. Скрябин; отв. ред. Н. И. Шендер. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 217 с.
13. Гаврильев, П. П. Гидротермические мелиорации сельскохозяйственных угодий в Якутии / П. П. Гаврильев, А. А. Мандаров, И. С. Угаров. – Новосибирск: Наука, 1984. – 201 с.
14. Угаров, И. С. Орошение дождеванием кормовых культур в Центральной Якутии / И. С. Угаров, А. А. Мандаров. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2000. – 128 с.
15. «Спасская падь»: комплексные исследования мерзлотных ландшафтов / А. Н. Федоров и др. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2006. – 210 с.



16. Павлов, А. В. Мониторинг криолитозоны / А. В. Павлов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2008. – 229 с.

17. Romanovsky, V.E. Thermal State of Permafrost in Russia / V. E. Romanovsky // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2010. – P. 136–155.

18. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. – М., 2005. – 28 с.

19. Мелешко, В. П. Климат России в XXI веке. Часть 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 / В. П. Мелешко, В. М. Катцов, В. А. Говоркова, П. В. Спорышев, И. М. Школьник, Б. Е. Шнееров // *Метеорология и гидрология*. – 2008. – № 9. – С. 5–21.

20. Шендер, Н. И. Прогноз естественноисторических колебаний климата городов Якутска и Фэрбенкса / Н. И. Шендер, В. Е. Романовский, А. С. Тетельбаум // *Наука и образование*. – 1999. – № 2. – С. 24 – 29.

21. Romanovsky, V. E. Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia / V. E. Romanovsky, T. S. Sazonova, V. T. Balobaev, N. I. Shender, and D. O. Sergueev // *Global and Planetary Change*. – 2007. – № 56(3 – 4). – P. 399–413.

### References

1. Melnikov, P.I. 1950. Permafrost in the Yakutsk area. In: *Permafrost Investigations in YaSSR*, vol. 2. Moscow-Leningrad: USSR Acad. Sci. Press, 52-70. (in Russian)

2. Solov'ev, P.A. 1959. *Permafrost in the Northern Part of the Lena-Amga Watershed*. Moscow: USSR Acad. Sci. Press, 144 pp. (in Russian)

3. Shimanovskii, S.V. 1942. Effect of pavements on the ground thermal regime. In: *Permafrost Investigations in the Yakut Republic*, vol. 1. Yakutsk, 44-55. (in Russian)

4. Gerasimov, N.N. 1950. Annual ground temperature variations in the Yakutsk area. In: *Permafrost Investigations in the Yakut Republic*. Yakutsk, 179-191. (in Russian)

5. Efimov, A.I. 1952. Selected results of 3-year ground temperature observations in the Yakutsk area. In: *Permafrost Investigations in the Yakut Republic*, vol. 3. Moscow: USSR Acad. Sci. Press, 8-19. (in Russian)

6. Ivanov, N.S. 1963. On the thermal regime of the upper earth crust in the Yakutsk area. In: *Heat and Mass Exchange in Frozen Layers of the Earth Crust*. Moscow: USSR Acad. Sci. Press, 9-55. (in Russian)

7. Gavrilova, M.K. 1978. *Climate and Perennial Freezing of Soils and Rocks*. Novosibirsk: Nauka, 212 pp. (in Russian)

8. Are, F.E. 1973. Ground temperature regime beneath a draining thaw lake in Central Yakutia. In: *Issues of the Geography of Yakutia*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 70-75. (in Russian)

9. Pavlov, A.V. 1975. *Heat Exchange between Soil and Atmosphere in Northern and Temperate Latitudes of the USSR*. Yakutsk, 302 pp. (in Russian)

10. Pavlov, A.V. 1979. *Thermal Physics of Landscapes*. Novosibirsk: Nauka, 284 pp. (in Russian)

11. Skryabin, P.N., Varlamov, S.P., and Skachkov, Yu.B. 1998. *Interannual Variability of the Ground Thermal Regime in the Yakutsk area*. Novosibirsk: SB RAS Press, 143 pp. (in Russian)

12. Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., and Skryabin, P.N. 2002. *Ground Temperature Regime in Permafrost Landscapes of Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 217 pp. (in Russian)

13. Gavriliev, P.P., Mandarov, A.A., and Ugarov, I.S. 1984. *Hydrothermal Reclamation of Agricultural Lands in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 201 pp. (in Russian)

14. Ugarov, I.S. and Mandarov, A.A. 2000. *Overhead Irrigation of Fodder Crops in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 128 pp. (in Russian)

15. Fedorov, A.N., Maximov, T.Kh., Gavriliev, P.P. et al. 2006. Spasskaya Pad: Integrated Investigations of the Permafrost Landscapes. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 210 pp. (in Russian)

16. Pavlov, A.V. 2008. *Permafrost Monitoring*. Novosibirsk: Fcfdemic Publishing House "Geo", 230 pp. (in Russian)

17. Romanovsky, V.E., Drozdov, D. S., Oberman, N. G., Malkova, G. V., Kholodov, A. L., Marchenko, S. S., Moskalenko, N. G., Sergeev, D. O., Ukraintseva, N. G., Abramov, A. A., Gilichinsky, D. A., Vasiliev, A. A. 2010. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes* 21: 136-155

18. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). 2005. *Strategic Prediction for the Period of up to 2010-2015 of Climate Change Expected in Russia and Its Impact on Sectors of the Russian National Economy*. Moscow, 28 pp.

19. Meleshko, V.P., Kattsov, V.M., Govorkova, V.A., Sporyshev, P.V., Shkol'nik, I.M., and Shneerov, B.E. 2008. Climate of Russia in the 21st century. Part 3. Future climate changes calculated with an ensemble of coupled atmosphere-ocean general circulation CMIP3 models. *Russian Meteorology and Hydrology* 33(9): 541-552.

20. Shender, N.I., Romanovsky, V.E., and Tetelbaum, A.S. 1999. A forecast of the natural variability of climate in Yakutsk and Fairbanks. *Nauka i Obrazovanie* 2: 24-29. (in Russian)

21. Romanovsky, V.E., Sazonova, T.S., Balobaev, V.T., Shender, N.I., and Sergueev, D.O. 2007. Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia. *Global and Planetary Change* 56 (3-4): 399-413.

# Thermophysical properties of sediments in the Yenisei-Khatanga Trough and its southern margin

R.I. Gavriliiev

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: gubanova@mpi.ysn.ru

**Abstract.** A method for estimating the effective thermophysical properties of sediments in geological structures is described. Based on the experimental data obtained on rock samples from various locations in the Yenisei-Khatanga Trough and its southern margin (Novaya, Khanar and Pyasino sites), the parameters for typical rocks of the structure were identified. Using these data and specifying the approximate amounts of sediments of different lithologies in the geological systems, the effective thermophysical properties and physical parameters of the sediments in the Yenisei-Khatanga Trough and its southern margin were estimated along three transects: one running lengthwise in the central part and two across the Trough from Vladimirskaya to Khanar and from Pyasino (Ugolnaya) to Norilsk. The estimation of the effective characteristics of geological sections was made to suite level. The results presented in this paper may be useful in assessing the effect of climate variations on the thermal state of permafrost in the region.

**Keywords:** rocks; sediments; effective thermophysical properties.

## Теплофизические свойства отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления

Р. И. Гаврильев

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: gubanova@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Описана методика расчетных оценок эффективных теплофизических свойств отложений геологических структур. По экспериментальным данным, полученным по образцам горных пород из различных пунктов Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления (площадь Новая и участки Ханар и Пясино), выделены параметры наиболее типичных пород указанной структуры. На основании этих данных, задавая примерное количественное содержание литологических разностей геологических систем, были проведены расчеты эффективных теплофизических свойств и физических параметров отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления по трем профилям: центральному вдоль простирания прогиба и двум вкрест к продольному профилю по линиям: Владимирская – Ханар и Пясино (Угольная) – Норильск. Расчет эффективных характеристик геологических разрезов осуществлялся до уровня свит. Приведенные сведения могут быть использованы в расчетах влияния климатических колебаний на тепловое состояние мерзлых толщ указанной территории.

**Ключевые слова:** горные породы; отложения; эффективные теплофизические свойства.

# Теплофизические свойства отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления

Р. И. Гаврильев

## Введение

В расчетах влияния климатических колебаний на тепловое состояние мерзлых толщ Енисей-Хатангского прогиба необходимо знание эффективных теплофизических свойств слагающих отложений, которые могут быть оценены расчетным путем до уровня свит на основе имеющихся экспериментальных данных на отдельных исследованных площадках и участках.

Общая постановка вопроса об исследованиях теплофизических свойств горных пород в лабораторных условиях вкратце сводится к следующему. После доставки проб с места отбора в лабораторию образцы изготавливались распиловкой скважинных кернов на камнерезном станке с алмазным режущим диском. Перед опытом они увлажнялись до полного вла-гонасыщения в эксикаторе, так как считается, что горные породы в естественном залегании находятся в состоянии полного влагонасыщения. Посредством теплового компаратора УИТ-1 разработки А.Н. Калинина в Сибирском НИИ метрологии (СНИИМ) [1] измерялись значения теплофизических свойств влагонасыщенных образцов горных пород в мёрзлом и талом состояниях.

## Методика расчетной оценки эффективных теплофизических свойств и физических параметров горных пород литологических разрезов

В описаниях разрезов даны только состав (вещественный и количественный) отложений и их мощность. Их влажность ориентировочно задавались нами. На основе этих сведений по измеренным ранее данным параметров образцов горных пород на конкретных опытных площадках и, привлекая информацию из справочного пособия Р.И. Гаврильева [2], находились теплофизические параметры отдельных составляющих разреза. Найденные параметры служили исходными данными для оценки осреднённых эффективных теплофизических свойств отложений.

Эффективные теплофизические свойства и физические параметры разрезов рассчитываются по следующим формулам:

осреднённый коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{эф} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}}, \quad (1)$$

объёмная теплоёмкость

$$c\gamma_{эф} = \sum_{i=1}^n c\gamma_i h_i, \quad (2)$$

коэффициент температуропроводности

$$a_{эф} = \frac{\lambda_{эф}}{c\gamma_{эф}}, \quad (3)$$

объёмная плотность сухого скелета

$$\gamma_{скэф} = \sum_{i=1}^n \gamma_{ски} h_i, \quad (4)$$

влажность

$$W_{эф} = \sum_{i=1}^n W_i h_i, \quad (5)$$

где  $\lambda_i$ ,  $c\gamma_i$ ,  $\gamma_{ски}$  и  $W_i$  - коэффициент теплопроводности, объёмная теплоёмкость, объёмная плотность сухого скелета и влажность  $i$ -той составляющей разреза, найденные по указанному справочному пособию;  $h_i$  - относительная толщина составляющих разреза.

При оценке физических параметров составляющих разрезов в случае крупнообломочных пород исходим из следующих соотношений:

объёмная плотность сухого скелета всей породы  $\gamma_{сух}$

$$\gamma_{сух} = d_k m_k + \gamma_{ск}^{зан} (1 - m_k), \quad (6)$$

весовая влажность породы

$$W = \frac{W^{зан} \gamma_{ск}^{зан} (1 - m_k)}{\gamma_{сух}}, \quad (7)$$

где  $d_k$  и  $m_k$  - удельный вес и объёмное содержание (в отн. ед.) крупнообломочных частиц;  $W^{зан}$  и  $\gamma_{ск}^{зан}$  - весовая влажность и объёмная плотность сухого скелета заполнителя, которые в расчётах задаются заранее.



В случае трещиноватых пород формулы (6) и (7) отражают параметры остова породы, а характеристики всей трещиноватой породы выражаются следующими формулами:

объёмная плотность сухого скелета всей породы

$$\gamma_{\text{сух}}^{\text{трещ. пор.}} = \gamma_{\text{сух}}^{\text{остова}} (1 - m_{\text{трещ.}}), \quad (8)$$

весовая влажность всей трещиноватой породы

$$W^{\text{трещ. пор.}} = W_{\text{остова}} + \frac{m_{\text{трещ.}}}{\gamma_{\text{сух}}^{\text{трещ. пор.}}}, \quad (9)$$

где  $m_{\text{трещ.}}$  – относительное содержание трещин (отн. ед.).

### Результаты исследований

Енисей-Хатангский прогиб и его южного обрамления охарактеризованы по трём профилям: один центральный вдоль его простирания и два вкрест к продольному профилю I-I' II-II' (см. рис.).

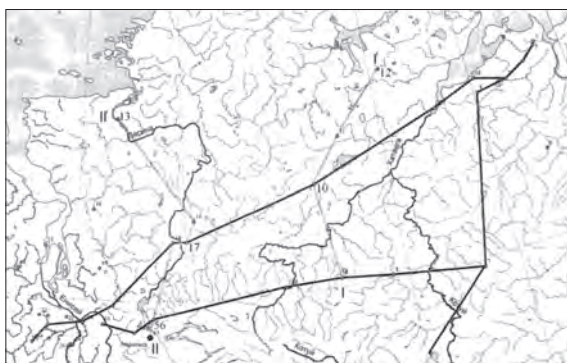


Схема расположения профилей Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления.

При этом приняты во внимание геологические разрезы пунктов №№ 10 и 17 для центрального профиля, №№ 9, 10, 12 для профиля I-I' и №№ 56, 17 и 13 для профиля II-II' (см. табл.).

Для выбора исходных данных для расчетов эффективных теплофизических свойств и физических параметров геологических разрезов мы пользовались результатами ранее нами измеренных данных в следующих пунктах: площадь Новая и участки Ханар и Пясино. По данным этих исследований и сведениям справочного пособия [2] приняты средние значения исходных параметров, которые изложены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные параметры горных пород для отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления

№ п/п	Описание пород	$\gamma_{\text{ск}}^{\text{г/см}^3}$	W, %	$\lambda$ , Вт/(м·К)	
				$\lambda_{\text{T}}$	$\lambda_{\text{M}}$
1	алевролиты	2,75	0,9	2,48	
2	песчаники	2,69	0,6	3,86	
3	аргиллиты (глины)	2,40	4,4	2,16	
4	пески	2,34	5,0	2,90	3,40
5	долериты	2,89	0,4	2,10	
6	туфы, туффиты	2,09	10,7	1,67	2,07
7	угли каменные	1,43	1,3	0,49	

На основании этих данных, задавая примерное количественное содержание литологических разностей геологических систем, по вышеизложенной методике были проведены расчеты эффективных теплофизических свойств и физических параметров отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления вдоль центрального продольного профиля и по поперечным профилям I-I' и II-II'. Полученные значения эффективных теплофизических свойств отложений приведены в табл. 2-4.

### Заключение

Охарактеризованы все основные свиты палеозойских (девон, карбон и пермь) мезозойских и четвертичных отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления до глубины 3460 м, что послужит основой для проведения тепловых расчетов влияния климатических изменений на состояние мерзлых толщ исследуемой геологической структуры.

### Список литературы

1. А.с. 949449 СССР. Компаратор для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности материалов / Калинин А.Н. – опубли. 1982, Бюл. № 29. – С. 180.
2. Гаврильев, Р. И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне : справочное пособие / Р. И. Гаврильев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 146 с.

### References

1. Kalinin, A.N. 1982. A Comparator for Express Measurements of Thermal Conductivity. USSR Inventor's Certificate 949449, publ. *Bulletin of Inventions* 29: 180. (inRussian)
2. Gavriliev, R.I., 2004. *Thermophysical Properties of Environmental Components in Permafrost Areas*, Reference Book. Novosibirsk: SBRASPress, 146 pp. (inRussian)



Таблица 2. Эффективные теплофизические свойства и физические параметры отложений Енисей-Хатангского прогиба вдоль основного профиля

Система	Отдел	Свита	Интервал глубин, м	Мощность слоя, м	Литологическое описание пород	$\gamma_{ск}$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$c_{\gamma} \cdot 10^{-6}$ , Дж/(м <sup>3</sup> *К)
Пункт №17 – Рассохинская площадь									
Q			15-80	95	Песчано-валунно-галечниковые отложения	2,22	7,3	3,51	2,20
K	K <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> dr	80-170	90	Чередование глин с алевролитами	2,57	2,4	2,31	2,42
	K <sub>1</sub>	K <sub>1-2</sub> dl	170-460	290	Чередование песков с песчаниками	2,48	2,6	3,57	2,71
		K <sub>1</sub> ak	460-720	260	Глины, пески, песчаники, алевролиты с прослойками угля	2,50	2,3	2,38	2,34
		K <sub>1</sub> ml	720-860	140	Песчаники, пески, алевриты, глины, долериты	2,62	0,3	2,86	2,24
		K <sub>1</sub> sd	860-1290	430	Песчаники, пески, алевриты, глины, долериты	2,63	0,3	2,66	2,24
K	K <sub>1</sub>	K <sub>1</sub> nh	1290-1340	50	Песчаники, аргиллиты	2,54	2,3	2,78	2,38
J	J <sub>3</sub>	J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub> , av	1340-1540	200	Песчаники, аргиллиты, глины	2,63	0,6	3,34	2,28
		J <sub>3</sub> sg	1540-1650	110	Долериты, песчаники	2,85	0	2,31	2,39
		J <sub>3</sub> tc	1650-1820	170	Песчаники, глины	2,63	1,0	3,34	2,32
	J <sub>2</sub>	J <sub>2</sub> ml	1820-2160	340	Долериты, песчаники	2,79	0	2,98	2,34
		J <sub>2</sub> ln	2160-2380	220	Песчаники, глины	2,63	1,0	3,34	2,32
		J <sub>2</sub> ld	2380-2680	300	Песчаники, глины	2,63	1,0	3,34	2,32
		J <sub>2</sub> vm	2680-2980	300	Песчаники, глины	2,57	1,8	2,94	2,36
		J <sub>2</sub> cd	2980-3050	70	Глины, песчаники	2,52	2,7	2,62	2,40

Таблица 3. Эффективные теплофизические свойства и физические параметры отложений Енисей-Хатангского прогиба по поперечному профилю I-I

Система	Отдел	Свита	Интервал глубин, м	Мощность слоя, м	Литологическое описание пород	$\gamma_{скз}$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$c_{\gamma} * 10^{-6}$ , Дж/(м <sup>3</sup> *К)	$a * 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Пункт №9 – Участок Ханар										
Q			0-4	4	Суглинки с обломками алевролитов	1,65	22,0	1,70	2,08	0,82
T <sub>1</sub>			4-291	287	Туффиты, долериты, песчаники, алевролиты	2,30	7,8	2,11	2,22	0,95
C-P			291-500	209	Долериты, алевролиты, песчаники, аргиллиты	2,77	0,6	2,21	2,25	0,98
Пункт №10 – Площадь Новая										
Q			0-50	50	Суглинки с валунами, гравием	2,05	11,0	1,70	2,77	0,61
K <sub>1</sub>		Рассохинская – K <sub>1</sub> nh-pd-ml	50-500	450	Песчаники, пески, алевролиты, глины	2,56	1,0	3,00	2,21	1,36
J	J <sub>3</sub>		500-1100	600	Аргиллиты, алевролиты, песчаники	2,56	2,6	2,47	2,29	1,08
	J <sub>2</sub>	Юрюнг-Тумусская-Мальшевская и Леонтьевская – J <sub>2</sub> u-t(ml-ln)	1100-2500	1400	Аргиллиты, алевролиты, песчаники	2,56	2,6	2,47	2,29	1,08
	J <sub>2</sub>	Вымская – J <sub>2</sub> vm	2500-2670	170	Песчаники, алевролиты	2,71	0,7	3,31	2,31	1,43
	J <sub>2</sub>	Лайдинская – J <sub>2</sub> ld	2670-2830	160	Аргиллиты	2,40	4,4	2,16	2,24	0,96
	J <sub>1</sub>	Джангодская – J <sub>1</sub> dg	2830 и ниже		Алевролиты, аргиллиты, песчаники	2,63	1,9	2,64	2,32	1,14
Пункт №12 – Владимирская площадь										
Q			0-160	160	Пески с валунами	2,51	2,8	3,51	2,26	1,55
K <sub>1</sub>			160-770	610	Песчаники, алевролиты, глины	2,61	2,0	2,67	2,30	1,16
J <sub>2</sub>	J <sub>2</sub>	Юрюнг-Тумусская – J <sub>2</sub> u-t	770-885	115	Песчаники, глины	2,54	2,5	2,78	2,27	1,22
	J <sub>2</sub>	Вымская – J <sub>2</sub> vm	885-1030	145	Алевролиты, глины, аргиллиты	2,54	3,0	2,28	2,29	0,99
	J <sub>2</sub>	Лайдинская – J <sub>2</sub> ld	1030-1128	98	Алевролиты	2,78	0,9	2,48	2,41	1,03
	J <sub>1</sub> -J <sub>2</sub>	Джангодская – J <sub>1</sub> dg	1128-1639	511	Аргиллиты, песчаники, алевролиты	2,60	2,6	2,52	2,43	1,04
	J <sub>1</sub>	Балахинская – J <sub>1</sub> bsh	1639-1820	181	Песчаники, аргиллиты, алевролиты	2,61	1,8	2,86	2,39	1,19
P-T			1820-2625	805	Аргиллиты, алевролиты	2,54	3,0	2,28	2,45	0,93



Таблица 4. Эффективные теплофизические свойства и физические параметры отложений Енисей-Хатангского прогиба по поперечному профилю П-П

Система	Отдел	Свита	Интервал глубин, м	Мощность слоя, м	Литологическое описание пород	$\gamma_{ск}$ , г/см <sup>3</sup>	W, %	$\lambda$ , Вт/(м*К)	$c_{\gamma} * 10^{-6}$ , Дж/(м <sup>3</sup> *К)	$a * 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Пункт №13 – Участок Пясино, месторождение каменных углей										
Q			0-14	14	Суглинок с валунами	2,05	11,0	1,70	2,77	0,61
P	P <sub>2</sub>	Макаревичско-бражнинская, верхняя – P <sub>2</sub> mk <sub>2</sub>	14-101	87	Аргиллиты с валунами, пески с валунами, алевроиты и угли	2,17	8,7	1,98	2,61	0,76
		Макаревичско-бражнинская, нижняя – P <sub>2</sub> mk <sub>1</sub>	101-126	25	Алевролиты, пески с валунами	2,40	5,9	2,33	2,61	0,89
		Крестьянская – P <sub>2</sub> kr	126 и ниже		Пески, алевролиты, аргиллиты и угли	2,23	7,1	1,63	2,54	0,64
Пункт №56 – Участок Талнах										
T	T <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> nd	0-60	60	Порфиновые базальты, туффиты	2,78	2,5	2,02	2,48	0,81
		T <sub>1</sub> gd	60-220	160	Пикритовые базальты, лавобрекчия, порфиновые базальты	2,95	0,4	2,06	2,48	0,83
		T <sub>1</sub> sw	220-370	150	Толектовые базальты, габбро-долериты	2,95	0,4	2,06	2,48	0,83
P	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> IV	370-400	30	Толектовые базальты	2,95	0,4	2,06	2,48	0,83
C-P	C <sub>3</sub> -P <sub>3</sub>		400-430	30	Песчаники, алевролиты	2,72	0,7	3,02	2,36	1,28
D	D <sub>3</sub>	D <sub>3</sub> kl	430-460	30	Доломиты, мергели	2,90	0,3	4,54	2,44	1,86
		D <sub>3</sub> hk	460-520	60	Мергели, доломиты	2,62	2,4	2,94	2,46	1,19
	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> mk	520-540	20	Доломиты, ангидриты	2,90	0	5,05	2,44	2,07
		D <sub>2</sub> ml	540-700	160	Мергели, ангидриты, габбро-долериты	2,71	1,8	2,80	2,48	1,13
	D <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> pl	700-790	90	Аргиллиты, габбро-долериты	2,45	4,0	2,15	2,47	0,87
	D <sub>1</sub>	D <sub>1</sub> kr	790-970	180	Габбро-долериты, роговики, аргиллиты	2,69	1,7	188	2,45	0,77
D		D <sub>1</sub> zb	970 и ниже		Мергели, ангидриты, габбро-долериты, доломиты	2,75	1,5	2,98	2,49	1,20

## **Hazardous periglacial and mass movement processes in the Dvoynoye deposit area, Chukchi AD: results of remote sensing**

A.A.Galanin

Permafrost Institute of P.E.Melnikov SB RAS  
Ruswsia 677010, Yakutsk, Merzlotnaya st., 36, IMZ SB RUS, e-mail: agalanin@gmail.com

**Abstract.** A hazard assessment study for the Dvoynoye gold deposit area, Chukchi Autonomic District (67.6°N 169.3°E) was undertaken as part of the standard geological and geotechnical investigation. The study was motivated particularly by the detection of a “dangerous” landform within the proposed mine area interpreted by Canadian geologists as a slide block. Preliminary mapping of hazardous periglacial and mass movement processes was performed at a 1:25,000 scale from satellite imagery and preliminary field survey. The study indicates that landform development in the area was greatly affected by block movements, erosion cutting, frost action, glacial activity, nivation, and cryoplanation during the Late Pleistocene and Holocene. Comparison with the available regional data and reports suggests that most serious threats for exploration and construction activities may be associated with the icy and ice-cored landforms of glacial and permafrost genesis (Holocene moraines and rock glaciers), snow-water-debris flows, ice-cemented fracturing zones of the active faults, and narrow areas of the Dvoynaya River valley and some smaller channels that can be dammed by rock glaciers. The presence of a large block-shaped landslide previously mapped on the proposed mine site has not been confirmed. These preliminary studies emphasize the importance of more detailed analysis and mapping of frost-related gravitational landforms in the mountainous areas of northeastern Asia in the frame of fundamental scientific research, as well as in the scope of geotechnical site assessment.

**Keywords:** Ilirneysky Massif; Dvoynoye deposit; permafrost slope processes; rock glaciers; landslides; snow-water-debris flows.

## **Опасные мерзлотно-гравитационные процессы в районе месторождения Двойное (Чукотский АО): результаты дистанционного изучения**

А. А.Галанин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: agalanin@gmail.com

**Аннотация.** В связи с новым этапом изучения и обработки месторождения Двойное (67,6° с.ш. 169, 3° в.д.) в рамках стандартных инженерно-геологических изысканий были организованы исследования опасных процессов и явлений. Отдельным поводом для этих работ послужило обнаружение в пределах проектируемой шахты крупного образования, интерпретированного канадскими геологами как «соскользнувший блок» (slideblock). На основе спутниковой съемки и рекогносцировочного обследования была составлена предварительная схема опасных мерзлотно-гравитационных процессов в масштабе 1:25000. Установлено, что рельеф территории в позднплейстоценовый и голоценовый этапы развивался в условиях активных блоковых движений, эрозионных, криогенных и ледниковых процессов, интенсивной нивации и криопланации. Установлено, что наиболее негативное воздействие на строительство и эксплуатацию промышленных объектов могут оказать льдистые образования ледникового и мерзлотно-ледникового генезиса (голоценовые морены и каменные глетчеры); снежно-водо-каменные сели; повышенная трещиноватость некоторых участков и зоны неотектонического дробления; участки сужения и подпруживания долины и русла р. Двойная; нивационные явления и образования. Наличие ранее выявленного крупного скального оползня в пределах проектируемой шахты не было подтверждено. Выполненные работы показывают необходимость более тщательного анализа криогенно-гравитационной морфоскульптуры при проведении инженерно-геологических изысканий в горных районах северо-восточной Азии

**Ключевые слова:** Илirianский массив; месторождение Двойное; мерзлотные склоновые процессы; каменные глетчеры; оползни; снежно-водо-каменные сели.



## Опасные мерзлотно-гравитационные процессы в районе месторождения Двойное (Чукотский АО): результаты дистанционного изучения

А. А. Галанин

### Введение

Каменные глетчеры и ассоциируемый с ними комплекс перигляциальных процессов являются одним из наиболее ярких проявлений криолитогенеза во многих горных районах Мира. Эта формация включает значительное разнообразие близких по генезису переходных образований, образующих морфологический ряд между собственно каменными глетчерами, курумами, десерпцием и карово-долинными ледниками [2-3]. В ходе мелкомасштабного дистанционного картографирования, выполненного для территории Магаданской области и Чукотского АО, нами выявлено более

а



б



Рис. 1. Каменные глетчеры в окрестностях поселка Провидения. Чукотский полуостров. а - активный каровый каменный глетчер, нависающий над нефтехранилищем; б - линия электропередач и водоводов на фронтальном откосе активного присклонового каменного глетчера.

6000 образований, морфологически близких к каменным глетчерам. В некоторых районах установлено распространение каменных глетчеров и морфогенетически близких им образований на участках геологоразведочных работ, на территории некоторых поселков (рис. 1).

Вместе с тем многие районы северо-востока Азии и Восточной Сибири по-прежнему остаются белыми пятнами в этом плане. К таким горным сооружениям до недавнего времени относится Илirianский горный массив, примыкающий к северо-западу Анадырского плоскогорья и являющийся водоразделом речных систем Малого Анюя и Люлювеем. Здесь имеется несколько известных промышленных золоторудных объектов.

Илirianский массив сложен преимущественно средними и кислыми вулканитами, вулканогенно-осадочными породами кровли, интрузивными и субвулканическими образованиями раннемелового возраста. В морфоструктурном отношении он представляет собой резко расчлененную глыбу (горст), дифференцированно поднятую в ходе новейших движений на высоту от 500-1500 м относительно «доплиоценового» пенеппена.

Рельеф массива среднегорный, резко расчлененный с абсолютными отметками до 1500 м и превышениями 300-500 м. Водоразделы узкие, гребневидные, склоны крутые, покрыты грубообломочными отложениями. В долинах развиты ледниковые и водно-ледниковые валунно-галечно-щебнистые отложения, местами перекрытые в бортах суглинисто-песчаными отложениями ледового комплекса, а в устьевых частях водотоков первого-второго порядков – гипертрофированными конусами пролювиально-селевых отложений.

Климат резко континентальный арктического типа, ультра сухой – количество осадков менее 300 мм/год. Большая часть осадков выпадает летом. Среднегодовая температура около ...-13° С, средне-июльская ... +13, средне-январская около ...-35° С. Многолетне-мерзлые породы характеризуются сплошным распространением и высокой льдистостью. Температуры на глубине 10 м составляют в среднем -4,5° С.

### Объекты исследований

Месторождение Двойное (67,6° с.ш. 169, 3° в.д.), расположенное в осевой части массива в верховьях рек Двойная и Прав. Яракваам, приурочено к восточному флангу Илринейской меловой вулканической кальдеры. Недавно выполненные компанией KinrossGold (Канада) работы его большие перспективы и обусловили постановку комплекса различных изысканий под строительство рудника. Одновременно было установлено много негативных проблем, таких как отсутствие источников для водозабора, высокая льдистость рыхлых и трещиноватых коренных пород, наличие обвально-оползневых образований неясного генезиса в пределах строительных площадок.

Основной причиной для нашей экспертной геоморфологической оценки послужило обнаружение в пределах проектируемой шахты крупного геоморфологического образования (рис. 2), интерпретированного как «соскользнувший блок» (slideblock). Поэтому основной нашей целью было выполнение рекогносцировки на основе аэрокосмического дешифрирования, выявление предварительного перечня опасных объектов и процессов на территории землеотвода для последующего полевого их изучения. Для дешифрирования нами использованы данные монохроматич-

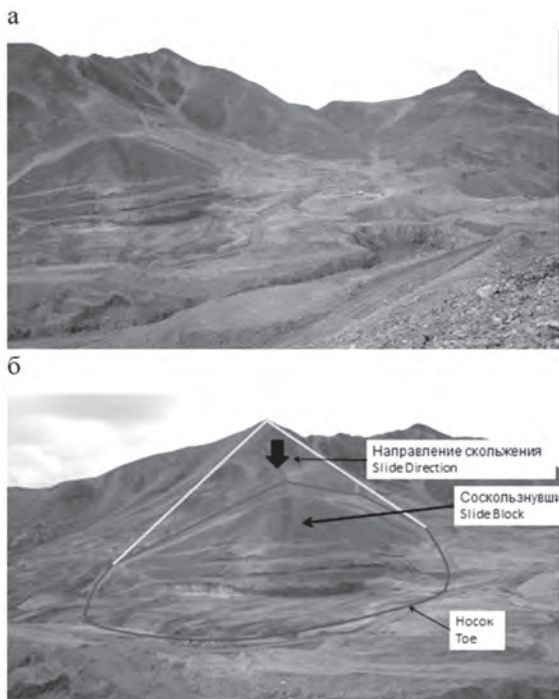


Рис. 2. Предполагаемый скальный оползень на участке старого рудного карьера и проектируемой шахты месторождения Двойное. а - общий вид; б - модель формирования скального оползня.

ческой спутниковой съемки с разрешением около 1 м, натурные фотографии наиболее проблемных объектов, топографические и геологические карты, генеральный план строительства.

### Морфоструктура и сейсмотектоника

Рельеф рассматриваемого участка имеет блоковое строение с большим количеством сквозных долин, заложенных в зонах дробления по границам блоков. Такие долины с аномально широким плоским днищем, резкими прямыми бортами и причлененными к бортам погружающимися тектоническими отторженцами иногда именуют грабен-долинами. Данный тип рельефа широко распространен на Северо-Востоке и связан с левосторонней сдвиговой кинематикой Берингийской плиты. Причем на отдельных участках формируются ориентированные в северо-восточном направлении зоны растяжения (грабены). В Провиденском районе Чукотки сходные неотектонические формы, по мнению ряда исследователей [1], являются результатом современного континентального растяжения (рифтогенеза), сопровождающегося повышением глубинного теплового потока и сейсмичности.

Водотоки всех порядков здесь наследуют разломную сеть, имеют ступенчатые тальвеги, резкие коленообразные изгибы. Борта долин - спрямленные плоские, часто совмещены с тектоническими уступами. Преобладают разрывы северо-восточного и северо-западного простирания. Менее выражено субширотное направление новейших трещин, еще не охваченное эрозионной деятельностью водотоков.

О преобладающих условиях растяжения коры свидетельствуют погружающиеся тектонические клинья и деформированные (разнонаклоненные) «тонущие» в грабенах фрагменты пенеплена. Особого внимания заслуживают выделенные на схеме дешифрирования тектонические клинья (или отторженцы), участки структурно-тектонического (возможно и сейс-мотектонического) бедлэнда (рис. 3). Наиболее крупный тектонический клин примыкает к западному побережью оз. Голубого.

Изучение фотографий и аэрокосмических данных на участке предполагаемого скального оползня не позволяет обосновать вывод о его оползневом происхождении и, более того, признать этот процесс катастрофическим. По морфологическим признакам этот элемент рельефа является тектоническим отторженцем. Степень и характер его обработ-

ки эрозионно-денудационными процессами, отсутствие фронтальных деформаций, несвойственный облик «ниши отрыва» свидетельствуют об его формировании в результате сложения факторов избирательной денудации и новейшей тектоники. Более того, на подрезанном карьером фронтальном участке должна вскрываться плоскость скольжения (ложе). Однако эти элементы пока не были установлены и охарактеризованы.

Принимая во внимание слабую сеймотектоническую изученность района и региона, общий характер морфоскульптурного комплекса рассмотренного участка дает основания предполагать возможность сеймотектонического происхождения отдельных образований. На основании ОСР-97 рассматриваемый район был отнесен к 6-7-бальной зоне

по шкале MSK-64 [4]. Вместе с тем, наличие вблизи района позднеплейстоценовой вулканической деятельности (Ануйский вулкан, 40-90 тыс. л.н.) и контрастных неотектонических элементов допускают вероятность наличия крупных сейсмогенерирующих структур более высокой энергетики.

По-видимому, данный вопрос заслуживает специального рассмотрения и рекогносцировочных полевых работ, поскольку общие свойства рельефа соответствуют таковым для районов с более высокой современной сейсмической активностью. Особенно важно более тщательное установление присклоновых и приразломных каменных глетчеров, блокировавших в позднем плейстоцене долину р. Двойная, на предмет их опосредованной связи с сеймотектоническими процессами.



Рис. 3. Фрагмент схемы распространения негативных мерзлотно-гравитационных процессов на территории месторождения Двойное. 1 – ледниково-тектонические скалистые склоны с развитием обвально-осыпных и лавинных процессов; 2 – ледниковый и водно-ледниковый рельеф днищ долин; 3 – крупные осыпные конусы; 4 – каменные глетчеры; 5 – конусы пролювиально-селевого выноса; 6 – современные русла, поймы и наледные участки долин; 7 – открытые тектонические трещины; 8 - зоны дробления крупных разрывов; 9 – участки структурно-тектонического бедленда; 10- участки ледниково-тектонического бедленда; проектируемые и действующие строительные площадки.

#### Ледниково-мерзлотные процессы

Общий блоковый характер рельефа рассматриваемого участка и Илирнейского массива осложнен плейстоценовой ледниковой экзарацией и криопланацией. Они проявлены

в виде обработанных ледниками литосборных воронок, ледниковых фасеток, редких каров и нивальных ниш, нагорных террас и криопедиментов и др.



В пределах участка работ нами реконструировано несколько долинных позднеплейстоцен-голоценовых ледниковых комплексов, очевидно, имеющих полихронное происхождение. Наиболее крупный, блокировавший долину р. Двойная не более чем 12-10 тыс.л.н., расположен к северу от отметки 1385 м в каре бокового притока (см. рис. 3). К настоящему времени здесь хорошо сохранились морены нескольких генераций с признаками течения, часть из которых отнесена к разряду комплексных и приразломных каменных глетчеров. Меньшие по размерам льдистые (с высоким рельефом) морены, активные и неактивные каменные глетчеры приразломного типа развиты в правом борту рассматриваемого участка р. Двойная.

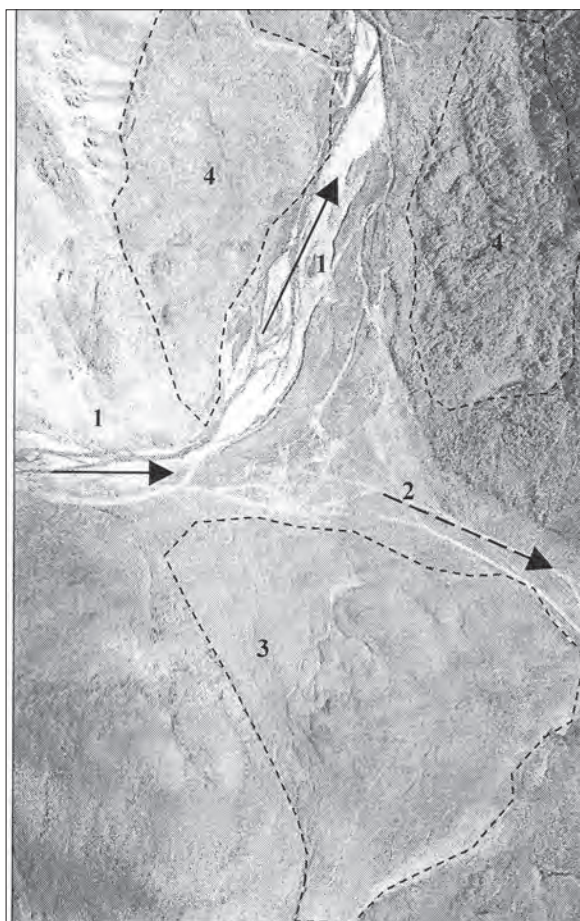


Рис. 4. Блокирование палеодолины р. Двойная отложениями голоценового снежно-водно-каменного селя. Ширина снимка 1,5 км. 1 -современное направление стока р. Двойная; 2 - направление стока в эпоху последнего оледенения; 3 – гипертрофированный конус выноса снежно-водо-каменных селей; 4 – участки ледниково-тектонического бедленда

В современных долинах водотоков наблюдаются маломощные и плохо изученные ледниковые отложения позднеплейстоценового возраста. По аналогии с соседними районами, можно предполагать, что здесь фрагментарно сохранились погребенные блоки сингенетического глетчерного льда и сама толща ледниковых отложений существенно переработана мерзлотными процессами, насыщена различными типами эпигенетического льда. Поэтому проведение крупных выработок здесь должно сопровождаться инженерно-геологическими изысканиями и бурением. Особенно важен учет льдистости отложений на участках проектирования хвостохранилища и других гидротехнических сооружений.

В истоках и в бортах некоторых долин хорошо сохранились высокольдистые и динамически активные образования ледникового и ледниково-крионенного генезиса каровые и приразломные каменные глетчеры, льдистые морены.

#### Приразломные каменные глетчеры

Полилопастные каменные глетчеры гипертрофированных размеров, развивающиеся в бортах долины р. Двойная, по видимому, следует отнести к разряду приразломных. Они уже охарактеризованы в региональной литературе [3] и имеют ряд отличительных признаков. Наиболее важным является сопряженность с активными разрывами и зонами дробления, обеспечивающими обильное поступление обломочного питания. Многие приразломные глетчеры региона, в том числе и на участке месторождения Двойное, деформированы современными (голоценовыми) движениями. Активные трещины установлены в пределах одного из образований (рис. 5). Недавно в других районах Чукотки со сходным типом рельефа и неотектоническими условиями были установлены ледово-грунтовые тела обрушения [3], морфологически близкие к образованиям ледника Колка на Северном Кавказе.

#### Склоновые процессы

В пределах участка работ развит широкий спектр перигляциальных процессов. Их сочетания образуют смешанные сезонно меняющиеся комплексы. В верхнем поясе гор на пологих вершинных поверхностях (криопленах) господствуют процессы температурного выверивания, морозного пучения и криотурбации.

На склонах более 20-25° распространены процессы осыпания, обваливания, суффозии



и десерпции. Наибольшей интенсивности они достигают на локальных участках под крутыми скалистыми склонами в бортах р. Двойная, в истоках р. Прав. Яракваам.

На более пологих ( $3-20^{\circ}$ ) склонах в условиях куртинного почвенно-растительного покрова развивается смешанный комплекс криогенно-склоновых, нивальных и делювиальных процессов. На участках склонов с повышенной мощностью рыхлых отложений (более 1,5-2 м) развиваются процессы площадной солифлюкции и мерзлотного крипа.

#### Снежно-водно-каменные сели

Из-за куртинного и маломощного почвенно-растительного покрова активно развивается делювиально-суффозионный снос, а в узких долинах водотоков первого порядка и литосборных воронках сезонно активизируются процессы пролювиально-селевого сноса.

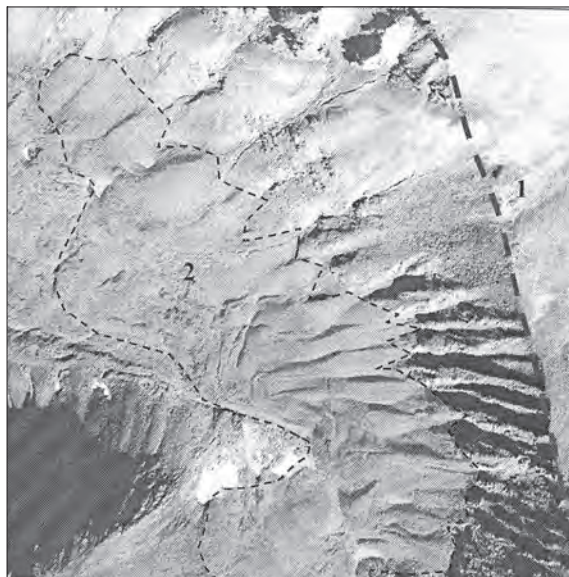


Рис. 5. Сложный приразломный каменный глетчер в борту грабен-долины на участке месторождения Двойное, рассеченный поперечными сеймотектоническими трещинами. Ширина изображения 1,3 км. 1 – бровка тектонического уступа и снежно-ледового забоя; 2 – активный полилопастной каменный глетчер

Выявленные мощные, весьма «свежие» и многочисленные конусы выноса в устьевых участках молодых эрозионных долин водотоков 1-2 порядка позволяют рассматривать процессы их формирования наиболее опасными для района рудника. Морфологические признаки дистанционно исследованных конусов выноса позволяют отнести их к ряду полигенетических, формирующихся наиболее активно в периоды весенне-летнего

снеготаяния. Не исключено формирование и прорыв снежниц с образованием снежно-водокаменных селей. На Чукотке известен случай схода снежно-водно-каменного селевого потока, который в июне 1991 г. на юге Чаунского района уничтожил вахтовый поселок геологов из 24 домиков [5].

#### Заключение

В ходе дешифрирования аэрокосмических материалов нами установлено сложное строение рельефа территории месторождения Двойное, в котором проявлены признаки активных неотектонических и современных движений, эрозионных, криогенных и ледниковых процессов, интенсивной современной нивации и др. В пределах района господствует так называемый перигляциальный (криогенный) режим развития экзогенных процессов (морфолитогенез). Его типоморфными проявлениями, способными оказать негативное влияние на строительство и эксплуатацию объекта, являются льдистые образования ледникового и мерзлотно-ледникового генезиса (льдистые голоценовые морены и каменные глетчеры); снежно-водо-каменные сели.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-05-000318а.

#### Список литературы

1. Fujita, K. Seismicity of Chukotka, northeastern Russia / K. Fujita, K. G. Mackey, R. C. McCaleb, L. V. Gunbina, V. N. Kovalev, V. S. Imaev, V. N. Smirnov // Geological Society of America. Special Paper 360, 2002. -P. 259272.
2. Галанин, А. А. Каменные глетчеры северо-востока Азии: картографирование и географический анализ // Криосфера Земли. - 2009. - Т. XIII. - № 4. - С. 49-61.
3. Галанин, А. А. Каменные глетчеры: вопро-сы терминологии и классификации / А. А. Галанин // Вестник СВНЦ ДВО РАН. - 2010. - № 4. - С. 2-11.
4. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. ОСР-97. Комплект карт и другие материалы для строительных норм и правил - СНИП «Строительство в сейсмических районах». - М., 1998. - 36 с.
5. Смирнов, В. Н. Опасные эндогенные и экзогенные геологические процессы на территории Северо-Востока России / В. Н. Смирнов, О. Ю. Глушкова // Геологические опасности: мат. XV Всерос. конф. – Архангельск, 2009. - С. 417-420.

### References

1. Fujita K., Mackey K.G., McCaleb R. C., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Smirnov V.N. 2002. Seismicity of Chukotka, northeastern Russia // Geological Society of America. Special Paper 360: 259-272
2. Galanin A.A. 2009. Rock glaciers Northeastern Asia: mapping and geospatial analysis // Cryosphere of Earth XIII(4): 49-61 (in Russian).
3. Galanin A.A. 2010. Rock glaciers: question of terminology and taxonomy // Vestnik of NESC FEB RAS (4): 2-11 (in Russian).
4. 1998. Common seismic zoning of territory of Russian Federation. CSZ-97: Maps set and other data on building regulations - SNIP "Construction in seismic regions". – Moscow. – 36 pp. (in Russian).
5. Smirnov V.N., Glushkova O.Yu. 2009. Dangerous endogenic and exogenic geological processes on the territory of the Northeast of Russia. // Geological hazards. Posters of the 15th All-Russian Conf. – Arkhangelsk. P. 417-420. (in Russian)

# Aggressiveness of suprapermafrost and supra/intrapermafrost groundwater in Yakutia to building materials and structures

L.D. Ivanova, N.A. Pavlova

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St.36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: pavlova@mpi.ysn.ru

**Abstract.** A 1:2,500,000-scale mapping of groundwater aggressiveness in the Republic of Sakha (Yakutia) was undertaken to determine regional trends on aggressive potential of supra- and supra/intrapermafrost waters on infrastructure. The database compiled for this mapping contained information on chemical composition of groundwater in the active layer and in the taliks below rivers and lakes, as well as of supra/intrapermafrost springs. The type and degree of aggressiveness of these groundwaters to structures was determined according to the Russian Building Code SNiP 2.03.11-85. Twenty seven areas were identified with respect to the predominant aggressive agents (sulfates, pH, acids, variable, and non-aggressive) and the depth to suprapermafrost water (<3 m), supra/intrapermafrost water (3-10 m) and groundwater in sporadic and discontinuous permafrost (>10 m). The digital map developed in ArcGIS will be useful for designers in selecting concrete and reinforced concrete structures for aggressive liquid environments.

**Keywords:** chemical aggressiveness; suprapermafrost and supra/intrapermafrost water; database, mapping.

## Агрессивность надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод Якутии к строительным материалам и конструкциям

Л. Д. Иванова, Н. А. Павлова

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: pavlova@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Районирование территории Республики Саха (Якутия) по агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод в масштабе 1:2 500 000 проведено в целях выявления региональных особенностей негативного влияния подземных вод на строительные сооружения и конструкции. В результате обобщения накопленной в базе данных информации о химическом составе подземных вод сезонного талого слоя, подрусловых и подозерных таликов, а также источников надмерзлотно-межмерзлотных вод, определены вид и степень их агрессивного воздействия к строительным конструкциям согласно СНиП 2.03.11-85. С учетом глубины залегания надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод (меньше 3 м и в интервале 3-10 м), а также грунтовых вод, залегающих глубже 10 м в области островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, выделено 27 полигонов, в которых преобладают подземные воды различной агрессивности (сульфатной, выщелачивающей, общекислотной, разной агрессивности и воды неагрессивные). Цифровая карта районирования, созданная в программе ArcGIS, может быть использована проектировщиками при выборе бетонных и железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в жидкой агрессивной среде.

**Ключевые слова:** агрессивность; надмерзлотные и надмерзлотно-межмерзлотные воды; база информационных данных, районирование.

# Агрессивность надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод Якутии к строительным материалам и конструкциям

Л. Д. Иванова, Н. А. Павлова

## Введение

Агрессивность подземных вод – это их способность путем химического воздействия разрушать горные породы и различные материалы: бетон, известковые материалы, металлы. На территории Якутии распространены подземные воды, обладающие разными видами агрессивности. Известны также естественные выходы подземных вод, в составе которых содержатся растворенные вещества, оказывающие химические и электрохимические воздействия на строительные материалы и инженерные конструкции. При нарушении ландшафтных условий во время строительства не исключена вероятность заводнения грунтов оснований надмерзлотными водами, обладающими корродирующей способностью по отношению к бетону, что может привести к его разрушению и, как следствие, ухудшению несущей способности строительных конструкций. Изучение распространения агрессивных подземных вод Якутии проводится в лаборатории подземных вод Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН с 2008 г. Для выявления региональных особенностей негативного влияния надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод на строительные сооружения, конструкции и транспортные пути сообщения было проведено районирование территории Республики Саха (Якутия) по агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод в масштабе 1:2 500 000. Основными задачами исследований являлись: систематизировать и обобщить фактические данные по химическому составу надмерзлотных и межмерзлотных вод Якутии, сопоставить результаты химических анализов воды с требованиями, предъявляемыми нормативной документацией, выделить районы в зависимости от вида и степени агрессивности жидкой среды и с учетом глубины залегания подземных вод. Конечным результатом явилась цифровая карта районирования Якутии по агрессивности надмерзлотных вод к строительным сооружениям в масштабе 1:2 500 000, созданная в программе ArcGIS.

## Методика исследований

Информационной основой для решения поставленных задач послужили опубли-

кованные данные и фондовые материалы Института мерзлотоведения. Накопление и моделирование геологической, гидрогеологической, гидрохимической и геоэкологической информации осуществлялось стандартными методами в программах ArcInfo и ArcView. Первоначально была сформирована база данных надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод, в которой содержатся сведения об источниках подземных вод – 165, вод сезонного слоя (СТС) – 130, таликах – 110 пунктов наблюдений.

В таблицы внесены параметры надмерзлотно-межмерзлотного водоносного горизонта (характеристика водовмещающих отложений, характер водоносности, глубина залегания подошвы водоносного горизонта, минерализация и химический состав воды, активная кислотность). Талики по условиям формирования подразделены на подрусловые и подозерные, а по отношению к многолетнемерзлым породам (ММП) – сквозные и несквозные. Для несквозных надмерзлотных таликов приведена мощность талых пород, для источников подземных вод – их дебит.

Для всех типов надмерзлотных вод указан вид и степень их агрессивности по отношению к бетону. Критериями для выделения подразделений по агрессивности жидкой среды послужили интервалы концентраций соответствующих компонентов согласно СНиП 2.03.11-85: углекислотная агрессивность,  $\text{CO}_2 > 10$  мг/л; общекислотная,  $\text{pH} < 6,5$ ; сульфатная,  $\text{SO}_4^{2-} > 250$  мг/л [1].

При создании цифровой модели районирования агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод использованы программы ArcInfo и ArcView. Было сформировано три точечных тематических слоя и один полигональный (рис. 1).

В точечных слоях «Воды СТС», «Источники», «Талики» условными знаками и цветом показан вид водопроявления и агрессивность надмерзлотных, надмерзлотно-межмерзлотных и грунтовых вод. Для визуализации в атрибутивных таблицах точечных слоев каждому из объектов, в зависимости от агрессивности жидкой среды, присвоено пять соответствующих значений поля «Туре»: 101 – воды неагрессивные, 102 – агрессив-



ность общекислотная, 104 – сульфатная, 106 – общекислотная и сульфатная, 107 – общекислотная и углекислотная.

При создании полигонального тематического слоя «Агрессивность грунтовых вод» помимо показателя агрессивности, учиты-

валась глубина залегания надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод [2, 3, 4]. Подземные воды с глубиной залегания более 10 м относятся к грунтовым водам области островного и прерывистого распространения ММП.

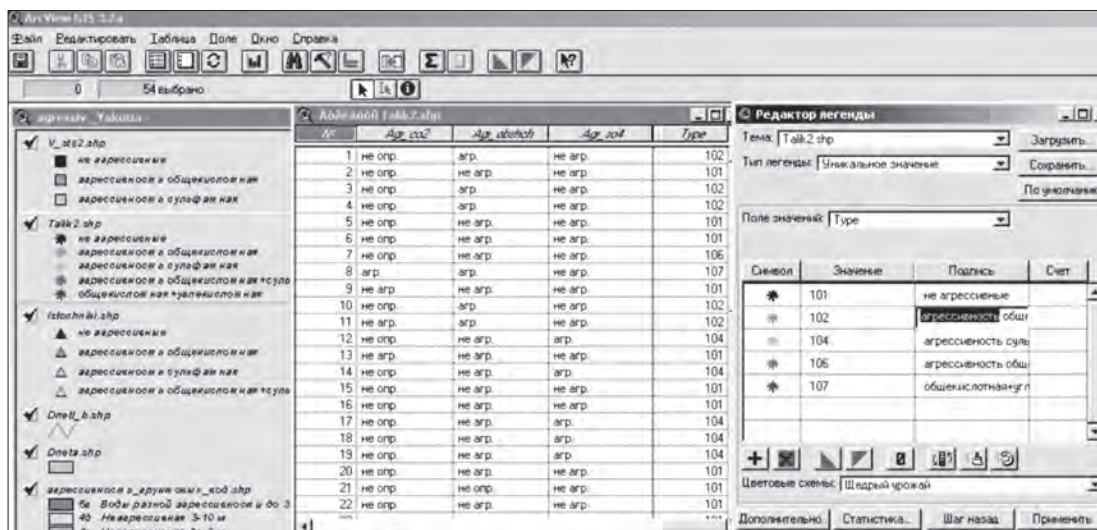


Рис. 1. Темы слоев карты, фрагмент атрибутивной таблицы и редактор легенды.

### Обсуждение результатов

В процессе создания цифровой модели районирования агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод Якутии было выделено 27 крупных полигонов. Каждый из полигонов картографируется соответствующим условным знаком по показателю агрессивности жидкой среды и в зависимости от глубины залегания криогенного водоупора (табл. 1). Полигоны условно можно объединить в семь районов (рис. 2). В пределах распространения сплошной и прерывистой мерзлой зоны выделено семь районов по виду агрессивности и глубине залегания.

*Район надмерзлотных вод с сульфатной агрессивностью ( $SO_4^{2-} > 250$ ) и глубиной залегания до 3 м (условный знак 2г; полигоны 10, 12, 13, 14, 15, 18, 21).*

Надмерзлотные воды распространены в слое сезонного промерзания-протаивания на территории сплошной и прерывистой мерзлой зоны до глубины 3 м на юго-западе Якутии в бассейнах рек Лена, Нюя, Большая Черепаниха, Бирюк, междуречье Лена-Большой Патом и др. в районах развития гипсоносных пород кембрийского, ордовикского и силурийского возраста. Содержание сульфат-иона в надмерзлотных водах свыше 250 мг/л.

*Район надмерзлотных вод с общекислотной агрессивностью ( $pH < 6,5$  и глубиной залегания до 3 м (условный знак 3г; полигоны 7, 8, 9, 22).*

Надмерзлотные воды, обладающие общекислотной агрессивностью распространены в пределах Верхоянской горной системы, Яно-Индигирского нагорья, кряжа Полоусный, Юкагирского поднятия и Алданского нагорья.

Подземные воды сезонно-талого слоя залегают здесь на глубинах менее 3 м на криогенном водоупоре и большей частью характеризуются значениями pH менее 6,5. Источники таликовых, меж- и подмерзлотные воды зон тектонической трещиноватости также обладают общекислотной агрессивностью (pH 5,9-6,5).

*Район неагрессивных надмерзлотных вод с глубиной залегания до 3 м (условный знак 4г; полигоны 1-6, 23, 26).*

Неагрессивные надмерзлотные воды распространены на большей части территории северо-запада Якутии, Центральнаякутской, Приморской, Яно-Индигирской низменностях, Учуро-Майском нагорье и частично в Чульманской впадине, а также на островах моря Лаптевых.

На песчаных террасах Центральнаякутской низменности характерно спорадическое развитие неагрессивных надмерзлотно-межмерзлотных вод на глубинах до 10 м и более.

*Район надмерзлотных вод с разной агрессивностью: сульфатной ( $SO_4^{2-} > 25$ ) и общекислотной ( $pH < 6,5$ ) с глубиной залегания до 3 м (условный знак 5г; полигоны 11, 16).*

Таблица 1. Принципы районирования территории Якутии по агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод

Мерзлая зона	Тип вод	Глубина залегания	Вид агрессивности	Номер условного знака
Сплошная и прерывистая мерзлая зона	Надмерзлотные и надмерзлотно-межмерзлотные	до 3 м	сульфатная	2г
			общекислотная	3г
			неагрессивные	4г
			воды с разной агрессивностью	5г
		3-10 м	сульфатная	2д
			неагрессивные	4д
Прерывистая и островная мерзлая зона	Надмерзлотные и грунтовые	>10 м	сульфатная	2в

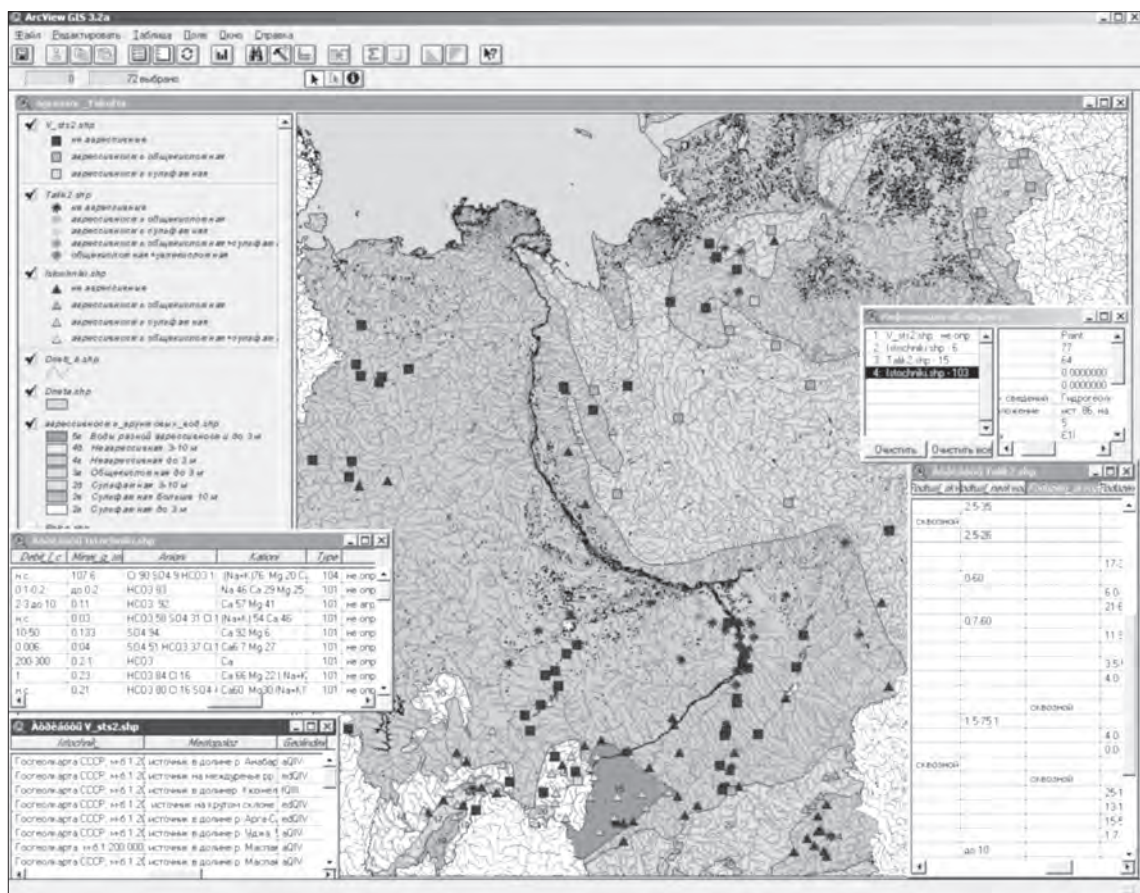


Рис. 2. Фрагмент цифровой карты районирования территории Республики Саха (Якутия) по агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод.

Надмерзлотные воды разной агрессивности распространены на глубине до 3 м на юго-западе территории в бассейнах рек Кемпендяй, Олекма, Чара, Токко, Туолба, на левобережье р. Лены в низовьях р. Наманы. В таликовых зонах пойм и долин крупных рек в гипсоносных карбонатных породах кембрийского возраста распространены надмерзлотно-

межмерзлотные воды на глубинах до 10 и более метров.

*Район надмерзлотных вод с сульфатной агрессивностью ( $SO_4^{2-} > 250$ ) и глубиной залегания 3-10 м (условный знак 2д; полигоны 17, 20).*

К этому району отнесены надмерзлотные воды области развития сплошной и преры-



вистой мерзлой зоны (бассейн р. Пеледуй и междуречье рек Лена-Малый Патом). Здесь развиты воды с сульфатной агрессивностью, залегающие в трещиноватой зоне карбонатных пород палеозойского возраста.

В таликовых зонах возможно спорадическое распространение грунтовых вод на глубине более 10 м.

*Район неагрессивных надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод с глубиной залегания 3-10 м (условный знак 4д; полигон 27).*

На глубинах 3-10 м неагрессивные надмерзлотные воды развиты в четвертичных и юрских отложениях Чульманского плато, которое характеризуется весьма пестрыми мерзлотными условиями. Надмерзлотно-межмерзлотные воды развиты здесь в многочисленных таликах как на пологих водоразделах и склонах, так и в долинах и поймах рек на глубинах 3-10 и более метров.

*Район надмерзлотных и грунтовых вод с сульфатной агрессивностью ( $SO_4^{2-} > 250$ ) и глубиной залегания более 10 м (условный знак 2в; полигон 19).*

Грунтовые воды с сульфатной агрессивностью, залегающие на глубине более 10 м выделены в пределах развития островной мерзлой зоны на юго-западе Якутии в пределах междуречий Лена-Пеледуй, Лена-Пилка, Лена-Хамра.

Данные по углекислотной агрессивности на рассматриваемой территории практически отсутствуют. Анализ проб, отобранных на  $CO_2$  агр. сотрудниками лаборатории подземных вод на терригенных юрских и терригенно-карбонатных кембрийских породах по авто-трассе Якутск-Невер показал, что эти породы не обладают углекислотной агрессивностью. Известны единичные определения  $CO_2$  агр. надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод, обладающих углекислотной агрессивностью в четвертичных и коренных отложениях на западе Якутии (траппы триасового возраста), на юго-западе (карбонатные нижнекембрийские отложения) и на северо-востоке Якутии (терригенные юрские).

### Заключение

В результате анализа полученных данных установлено, что надмерзлотные, надмерзлотно-межмерзлотные и грунтовые воды Якутии обладают сульфатной, общекислотной и смешанной агрессивностью (по СНиП 2.03.11-85). При районировании Якутии выделено семь районов, различающихся по показателям агрессивности и глубине залегания выделенных типов подзем-

ных вод. Наибольшее распространение имеют воды, обладающие сульфатной агрессивностью, в меньшей степени – воды разной агрессивностью. Неагрессивные подземные воды в естественных условиях развиты в основном в северных и центральных районах Якутии, подземные воды с общекислотной агрессивностью – в горных районах на Северо-Востоке Якутии и Алданском нагорье. Созданная цифровая карта районирования Республики Саха (Якутия) по агрессивности надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод в масштабе 1:2 500 000 может быть полезна проектировщикам при планировании застройки территории и выборе мер борьбы с агрессивным действием этих вод.

### Благодарности

Авторы приносят благодарность Я. И. Торговкину за оказанную помощь при оцифровке тематических слоев.

### Список литературы

1. Строительные нормы и правила. Защита строительных конструкций от коррозии. СНиП 2.03.11-85.- М. : Госстрой СССР, 1985. – 56 с.
2. Карта надмерзлотных вод Республики Саха (Якутия). М-б 1:2 500 000 / Составители Л. Д. Иванова, Т. Н. Лебедева, Н. С. Ломовцева, Н. М. Никитина, В. М. Пигузова. – Якутск: Якутское аэрогеодезическое предприятие Федеральной службы геодезии и картографии России №14, 1993.
3. Васильев, И. С. Закономерности сезонного протаивания грунтов в Восточной Якутии / И. С. Васильев. – Новосибирск: Наука, 1982. – 195 с.
4. Геокриологическая карта СССР. М-б 1:5 000 000 / Специальное содержание карты разработал И. И. Баранов. - М.: ГУГК, 1977.

### References

1. USSR State Committee on Construction. 1985. *Building Code SNiP 2.03.11-85. Corrosion Protection of Building Structures*. Moscow: USSR State Committee on Construction, 56 pp. (in Russian)
2. Ivanova, L.D., Lebedeva, T.N., Lomovtseva, N.S., Nikitina, N.M., and Piguzova, V.M. 1993. *Suprapermafrost Water Map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1:2,500,000*. Yakutsk: Yakutian Aerogeodetic Enterprise of the Russian Federal Agency for Geodesy and Cartography no. 14. (in Russian)
3. Vasiliev, I.S. 1982. *Patterns of Seasonal Soil Thawing in Eastern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 195 pp. (in Russian)
4. Baranov, I.I. 1977. *Geocryological Map of the USSR, Scale 1:5,000,000*. Moscow: GUGK. (in Russian).

## Substantiation of the potential gas accumulations under the permafrost-hydrate caprock

A.I. Sivtzev, I.I. Rozhin

Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS  
Oktyabrskaya St. 1, Yakutsk, Russia 677980, e-mail: maraday@yandex.ru

**Abstract.** On the basis of the systematization of gas shows obtained from the upper part of the section during oil and gas exploration in the Vilyuisky and Predverkhoyansky oil and gas bearing regions and from some hydrogeological wells of the Central Yakutia the authors suggest the existence of the intermediate fluid limiting block of the permafrost-hydrate nature. The territory of the Tolon-Mastakhsky gas condensate field was considered as the testing area with the possible presence of commercial gas accumulations under the permafrost-hydrate caprock. The choice was caused by a high probability of man-caused gas accumulations presence in the deposits of the upper part of the section. It is due to the fact that during the lifetime of permafrost rocks, estimated as 10000-20000 years, the potential of natural migration of hydrocarbons is realized incompletely. The lower bound of the permafrost-hydrate caprock, which forms the potential trap for gas accumulations at the expense of cross-flow gases along the annulus space of wells from deepest horizons of the field section, is determined by comparing the equilibrium conditions of hydrate formation with reservoir pressure and temperature.

**Keywords:** shows of gas; permafrost rocks; permafrost-hydrate caprock; zone of hydrate formation; gas accumulations.

## Обоснование потенциальных скоплений газа подмерзлотно-гидратным флюидоупором

А. И. Сивцев, И. И. Рожин

Институт проблем нефти и газа СО РАН  
Россия, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, ИПНГ СО РАН, e-mail: maraday@yandex.ru

**Аннотация.** На основе систематизации газопоявлений, полученных из верхней части разреза в ходе нефтегазопроисловых работ в Вилуйской и Предверхойанской нефтегазоносных областях, а также в ряде гидрогеологических скважин Центральной Якутии, сделано предположение о существовании промежуточного флюидоупора мерзлотно-гидратной природы. В качестве полигонного объекта с возможным содержанием промышленных скоплений газа под мерзлотно-гидратным флюидоупором рассмотрена территория Толон-Мастахского газоконденсатного месторождения. Выбор был обусловлен высокой вероятностью существования скоплений газа техногенного генезиса в отложениях верхней части разреза, т.к. потенциал естественной миграции углеводородов реализуется не в полной мере за время существования многолетне-мерзлых пород оцениваемых в 10-20 тыс. лет. Путем сопоставления равновесных условий гидратообразования с пластовыми давлением и температурой определена нижняя граница мерзлотно-гидратного флюидоупора, образующего потенциальную ловушку для накопления газов за счет их перетоков по затрубному пространству скважин из более глубоких горизонтов разреза месторождения.

**Ключевые слова:** газопоявления; многолетнемерзлые породы; мерзлотно-гидратный флюидоупор; зона гидратообразования; скопления газа.



# Обоснование потенциальных скоплений газа подмерзлото-гидратным флюидоупором

А. И. Сивцев, И. И. Рожин

## Введение

При проведении поисково-разведочного бурения на площадях и месторождениях Вилюйской синеклизы и прилегающего Предверхоанского прогиба в ряде скважин были получены промышленные и полупромышленные притоки газа из верхней части геологического разреза (ВЧР). В таких же геологических и термодинамических условиях в пределах Центральной Якутии в ряде гидрогеологических скважин были зафиксированы газопроявления различного масштаба [1].

Верхняя часть разреза в Вилюйской синеклизе и Предверхоанском прогибе представлена терригенными отложениями верхнеюрско-мелового возраста. Данные отложения многими исследователями рассматриваются как бесперспективные в отношении нефтегазоносности ввиду относительно неглубокого залегания и отсутствия в них региональных флюидоупоров. Имеющиеся факты газоносности ВЧР большинство исследователей сводит к повсеместной угленосности отложений и связанных с нею незначительным скоплениям газа под многолетнемерзлыми породами (ММП), способных экранировать углеводороды. Естественная миграция углеводородных газов из нижних продуктивных частей разреза и их аккумуляция в незначительном геологическом времени (время существования ММП) исключались ввиду присутствия регионально выдержанного глинистого флюидоупора – сунтарской свиты. О газогидродинамической изолированности верхнеюрско-меловых отложений свидетельствуют также данные измерения давлений гидрогеологического комплекса, которые имеют дефицит на 15 атм относительно нормального гидрогеостатического, в то время как под сунтарской свитой давления триасовых и юрских гидро-геологических комплексов находятся в ожидаемых величинах.

Вероятно, часть газопроявлений из ВЧР в пределах освоенных территорий обусловлена межпластовыми перетоками газа по затрубному пространству скважин. Ниже с техногенной точки зрения рассматривается проблема потенциальной газоносности ВЧР Толон-Мастахского газоконденсатного месторождения.

## Постановка проблемы

Потенциал «угольных газов» из относительно охлажденных угленосных отложений и их накопление в геологически ничтожное время (первые десятки тысяч лет) по классической схеме осадочно-миграционной теории не в полной мере объясняют довольно значительные величины газопроявлений из ВЧР на освоенных структурах. На наш взгляд, альтернативным объяснением газоносности ВЧР является недостаточно высокое качество цементирования колонн скважин, обусловивших межпластовые перетоки в затрубном пространстве особенно с учетом ощутимого дефицита пластового давления в ВЧР. Свидетельства межпластовых перетоков углеводородных флюидов по затрубному пространству известны во многих выработанных или имеющих долгий срок эксплуатации месторождениях вплоть до формирования самостоятельных объектов разработки [2, 3].

Собственно в Якутии зимой 1971 г. в скв. №16 на Усть-Вилюйском месторождении имело место аварийное фонтанирование газа дебитом около 300 тыс. м<sup>3</sup>/сут при забое 746 м в отложениях бергеинской свиты. К слову сказать, именно получение из этого интервала газа и подключение ее к магистральному газопроводу в большей степени способствовали оперативной нормализации газоснабжения г. Якутска, когда один за другим начали обводняться эксплуатационные скважины Усть-Вилюйского месторождения. Впоследствии был сформулирован справедливый вопрос: Почему газ оказался среди проницаемых в целом отложений верхней юры при отсутствии над этим скоплением газа сколько-нибудь надежной крыши? По этому поводу В.С. Ситников в своей статье [4] пишет: «...Разгадка оказалась проста. После бурения первых разведочных скважин на Усть-Вилюйском месторождении в связи с недостаточно высоким качеством цементирования эксплуатационных колонн начались перетоки в затрубном пространстве. Газ, поступающий в скважины из первоначально выявленной нижнеюрской залежи, в значительной степени перераспределяется затем по разрезу месторождения. В свою очередь это привело к техногенному разрушению основной газовой

залежи горизонта III-A. Темпы перераспределения газа по разрезу могли быть еще выше, но существенно замедлялись из-за толщи ММП в ВЧР. Именно ММП обеспечили задержки некоторых объемов газа под пачками отложений, содержащими отдельные прослойки плотных пород, но в целом не отвечающими требованиям, предъявляемыми к флюидоупорам...».

Дело в том, что в районе Усть-Вилуйской структуры подошва ММП по геотермическим данным находится несколько выше уровня полученного аварийного фонтанирования ( $550 \pm 50$  м), т.е. в вышеприведенном факте имело место опосредованное воздействие ММП на появление экранирующих свойств в изначально проницаемых породах. Проблема образования мерзлотно-гидратных флюидоупоров и об их уровнях относительно подошвы ММП нами рассматривалась в работе [1], где было показано, что в зависимости от состава газа и имеющихся термодинамических условий гидраты могут образовываться при достаточно высоких температурах ( $6 \div 8$  °C), другими словами, несколько ниже уровня подошвы ММП.

В целом, несмотря на многочисленные газопроявления из ВЧР на территории Вилуйской синеклизы и Предверхоанского прогиба к настоящему времени не открыты существенные залежи газа в верхней охлажденной части разреза. Данное явление, по всей видимости, обусловлено как низким начальным потенциалом нефтегазоносности близповерхностных отложений, обуславливающего соответствующую направленность геологоразведочных мероприятий нефтегазового назначения, так и неизученностью проблемы аккумуляции потенциальных переточных газов.

На наш взгляд, особый интерес в отношении перспектив газоносности ВЧР связанных с переточными газами представляет Толон-Мастахское газоконденсатное месторождение (ГКМ). В первую очередь, нужно отметить, что опыт строительства скважин в стадии поиска и разведки Толон-Мастахского ГКМ в относительно новых геологических и термодинамических условиях был небольшим, что обуславливало соответствующее качество цементирования. Вторым, но немаловажным, моментом можно считать имевшие место неоправданные высокие темпы разработки

залежей Толон-Мастахского ГКМ с высокой депрессией на пласт [5]. Так, исследованиями Н.В. Черского [6] было показано, что даже при удовлетворительном качестве цементирования скважин разрушение цементного камня может происходить в результате эффекта дросселирования газа при значительном увеличении его отбора или переходе на свободное фонтанирование. Здесь также как в Усть-Вилуйском месторождении были зафиксированы значительные газопроявления в ВЧР. Например, в 1982 г. зафиксирован аварийный выброс газа в скважине №101 с глубины 530 м с дебитом  $1100 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

В настоящее время Толон-Мастахское ГКМ находится на конечной стадии разработки и эксплуатируется преимущественно в качестве дополнительного месторождения для нивелирования пиковых объемов добычи из Средневилуйского ГКМ в зимнее время. Месторождение разбурено многочисленными скважинами в 1960-1970 гг.

#### Экспериментальная часть

Толон-Мастахское ГКМ расположено в центральной части Хапчагайского мегавала Вилуйской синеклизы Сибирской платформы. Месторождение приурочено к двум брахиантиклиналям (Толонской и Мастахской) и разделяющей их седловине. Структуры имеют субширотное простирание и относятся к восточной части Средневилуйско-Мастахского вала. Каждая из них, в свою очередь, осложнена поднятиями меньших размеров, некоторые из которых контролируют отдельные залежи. Размеры Толонской структуры по данным бурения  $14 \times 7$  км с амплитудой  $50 \div 60$  м; размеры Мастахской –  $41 \times 14$  км с амплитудой  $270 \div 300$  м. Общие размеры месторождения  $70 \times (7 \div 14)$  км. Структура в целом характеризуется совпадением структурных планов по всем основным продуктивным горизонтам. На рис. 1 представлена структурная схема по кровле верхнего продуктивного горизонта  $J_1$ -II.

Основные промышленные залежи газа приурочены мезозойским и верхнепермским отложениям, где выявлено и в разной степени разведано 9 промышленных залежей. Из них в промышленную эксплуатацию были введены 5 залежей:  $P_2$ -I,  $T_1$ -IVa,  $T_1$ -X (восток),  $T_1$ -X (запад) и  $J_1$ -I.

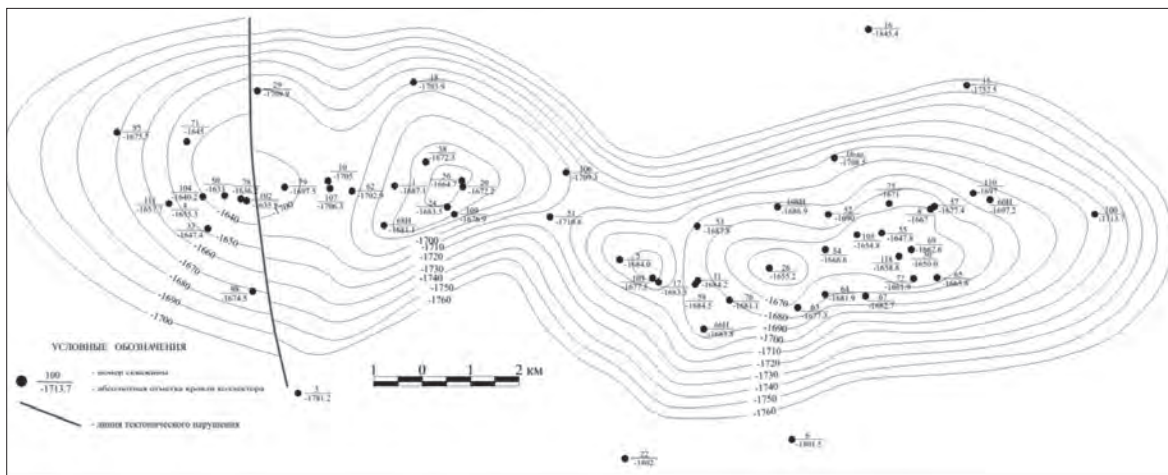


Рис. 1. Структурная схема по кровле продуктивного горизонта  $J_1$ -II.

Суммарные балансовые запасы, утвержденные в ГКЗ СССР по пяти введенным в эксплуатацию залежам, составляли более 35 млрд.  $m^3$  природного газа. В настоящее время месторождение находится на завершающей стадии разработки. На 01.01.2010 г. из месторождения добыто чуть более 12,5 млрд.  $m^3$  газа и в эксплуатации находятся только 3 скважины № 65, 110 по залежи  $T_1$ -IVa и скважина №105 по залежи  $P_2$ -I, суммарный среднесуточный дебит которых не превышает 200 тыс.  $m^3$ /сут. Проектом довыработки месторождения ввод новых эксплуатационных скважин не предусматривается.

В настоящее время по месторождению ко-эффект конечной газоотдачи составляет 34% от начальных балансовых запасов газа утвержденных в ГКЗ СССР [5]. В этой связи можно предположить, что некоторый оцененный объем запасов газа из залежей неконтролируемо перераспределится в ВЧР по затрубному пространству скважин обуславливая преждевременное обводнение скважин.

Для выявления возможных промышленных скоплений углеводородов в ВЧР на территории Толон-Мастахского ГКМ поставили следующие геолого-промысловые задачи:

1. Оценка потенциального источника, обеспечивающего поступление газа в верхнемезозойский потенциально газоносный этаж.

2. Определение уровня подошвы зоны гидратообразования (ЗГО) как потенциального флюидоупора для переточных газов с оценкой ее структурного плана на предмет образования ловушки.

Установление подошвы МПП в пределах Толон-Мастахского ГКМ по данным термометрии скважин и комплекса КВ и ПС

(кавернометрия и самопроизвольная поляризация) является довольно несложной задачей с учетом пресности гидрогеологического комплекса ВЧР. Действительно, отличительной особенностью всего Хапчагайского мегавала, в том числе и Толон-Мастахского месторождения, является полное отсутствие высоко минерализованных пластовых вод в ВЧР. Воды слабоминерализованные, практически пресные (до  $1 \div 4$  г/л). Поскольку температуры замерзания таких вод мало отличаются от  $0^\circ C$ , границей между мерзлыми и тальми породами служит нулевая геоизотермическая поверхность.

Определение подошвы ЗГО требует вычисления равновесных условий гидратообразования на основе вещественного состава газа и дальнейшего её приведения относительно подошвы ММП. Для расчетов равновесных условий гидратообразования взят состав газа из нижнеюрской залежи  $J_1$ -I в условиях ВЧР. Такой выбор обусловлен прежде всего тем, что основные балансовые запасы газа (около 4 млрд.  $m^3$ ), остающиеся не выработанными до настоящего времени по месторождению, приурочены к залежи  $J_1$ -I. При этом ввиду гипсометрического положения продуктивный горизонт является самым разбуренным на месторождении, т.е. углеводороды из этого горизонта являются главными потенциальными мигрантами в верхнемезозойскую часть разреза. Расчет равновесных условий гидратообразования был проведен по методике Е.Д. Слоуна [7]. На рис. 2 выше равновесной кривой находится область гидратообразования (ЗГО), а ниже – область двухфазного состояния «вода-газ» или «лед-газ». Косой линией выделен участок преимущественного попадания пластовых температур и давлений



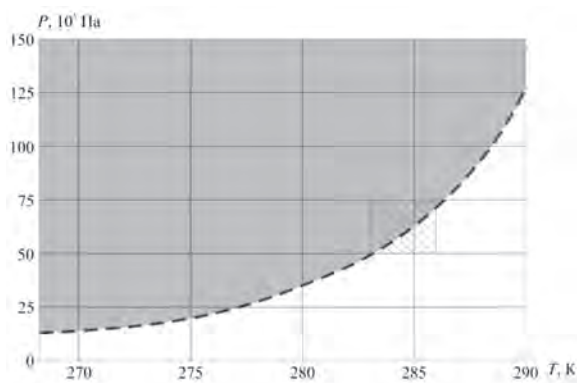


Рис. 2. Равновесные условия гидратообразования для газа следующего состава (% мол.):  $CH_4$  – 96,69;  $C_2H_6$  – 2,01;  $C_3H_8$  – 0,27;  $i-C_4H_{10}$  – 0,14;  $C_5H_{12+}$  – 0,05;  $CO_2$  – 0,2;  $N_2$  – 0,64.

до любой безгидратной глубины). В результате были найдены значения, соответствующие абсолютной отметке глубины залегания подошвы зоны гидратообразования по отдельным скважинам. На рис. 3 представлены построенные карты подошвы ММП (а) и ЗГО (б).

### Результаты и обсуждение

В целом по месторождению нижняя граница (подошва) ЗГО располагается в пределах нижнемеловых отложений. Нижнемеловые отложения в пределах Толон-Мастахского ГКМ представлены тремя свитами – батылыкская, эксеняхская и харытыкская. Батылыкская и харытыкская свиты промышленно-угленосны, тогда как разделяющая их эксеняхская свита практически полностью лишена угольных прослоев. При этом на Хапчагайском мега-

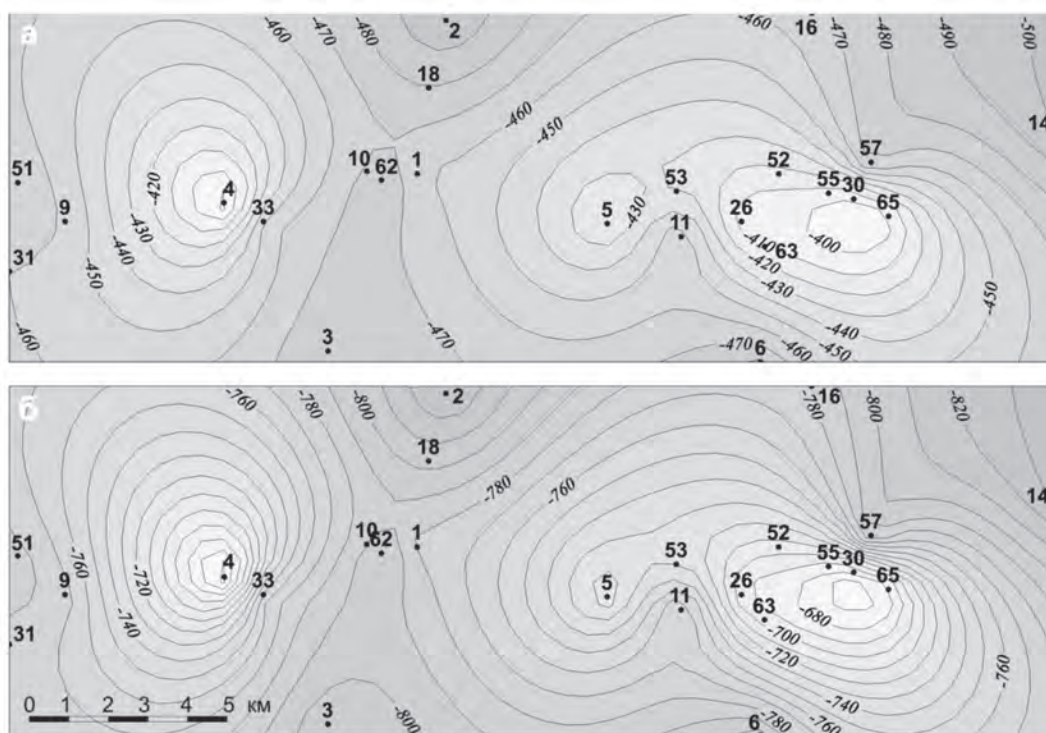


Рис. 3. Структурные схемы по подошвам ММП (а) и ЗГО (б).

Для приведения подошвы ЗГО относительно подошвы ММП использованы зависимости температуры и давления от глубины. Средний геотермический градиент подмерзлотных отложений по данным термометрии составляет  $0,038$  °С/м, а пластовое давление (в атм) вычисляется по формуле:  $P_{пл} = (H/10) - 15$ , где  $H$  – абсолютная глубина (в м), 15 – дефицит пластового давления (в атм) подмерзлотного гидрокомплекса. Решение находилось методом деления отрезков пополам (первый отрезок от подошвы ММП

вале эксеняхская свита появляется только на крыльях, будучи размытой в сводовых частях. Пески и песчаники харытыкской свиты отличаются от батылыкской ожелезненностью и калинитизацией, однако по материалам промыслово-геофизических исследований обе свиты составляют толщу преимущественно грубозернистых терригенных образований довольно равномерно насыщенных промышленными пластами углей. Мощность нижнемеловых отложений в разрезе Толон-Мастахского месторождения составляет 300-



500 м. Их кровля в присводовых скважинах совпадает с подошвой многолетнемерзлых пород.

Как видно из рис. 3 рельеф нижней границы ЗГО, как и рельеф подошвы толщи ММП, имеют антиклинальное строение и в целом повторяют структурные планы продуктивных комплексов нижней части разреза. Здесь также как и в структурных планах продуктивных комплексов выделяются два участка куполообразного залегания подошвы ЗГО – восточный 8,5×4 км с вертикальной амплитудой порядка 90 м и западный – 4,5×5,5 км с амплитудой 100 м.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно проводить дополнительные исследования ВЧР Толон-Мастахского с целью выявления потенциальных скоплений газа под мерзлотно-гидратным флюидоупором, желательны прямыми методами исследования пласта. В случае получения положительных результатов при опробовании требуется весьма широкая и разносторонняя программа исследований по определению промысловых характеристик скоплений. Нужно заметить, что, несмотря на относительно высокую степень разбуренности Толон-Мастахского месторождения, геологические материалы, способные охарактеризовать потенциальный верхнемезозойский этаж газоносности, весьма скудны, что связано с традиционным отношением к верхнемезозойским отложениям как совершенно бесперспективным.

### Заключение

В данной работе газовые гидраты рассмотрены в качестве флюидоэкранирующего материала, а не как самостоятельный потенциальный объект разработки. С появлением экономически выгодных технологических возможностей разработки газогидратных скоплений (залежей) интервалы с потенциальными газогидратами также могут вызывать научно-практический интерес.

Следует заметить, что для построения более точной схемы структурного плана подошвы ЗГО нужно иметь кондиционный вещественный состав газа из ВЧР, скорее всего, отличающийся от состава газа залежи J<sub>1</sub>-I за счет смешивания газов из разных залежей и так называемых «угольных» газов, которые несомненно имеют место быть.

При получении положительных результатов при опробовании ВЧР Толон-Мастахского ГКМ вышеприведенные методические подходы можно применить для всей группы газоконденсатных месторождений Хапчагайского

и Логлорского валов Вилойской синеклизы, характеризующихся относительной схожестью геологических и геотермодинамических условий.

### Список литературы

1. Александров, А. Р. Об уровне мерзлотно-гидратного флюидоупора в пределах погребенного Якутского поднятия / А. Р. Александров, И. И. Рожин, А. И. Сивцев, И. Ш. Сяндюков // Дегазация земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь: сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием к 100-летию со дня рождения академика П. Н. Кропоткина, 18–22 октября 2010 г., г. Москва. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 18-20.

2. Севастьянов, О. М. Методические и практические аспекты изучения газовых залежей переточного происхождения / О. М. Севастьянов, Е. Е. Захарова, С. В. Багманова // Достижения, проблемы, перспективы: сб. статей. – Оренбург: Газпромнефть ООО «Оренбурггазпромсервис», 2002. – С. 78-82.

3. Ларичев, В. В. Геоэкологические проблемы освоения нефтяных и газоконденсатных месторождений Прикаспийской впадины / В. В. Ларичев, В. И. Попков // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. НТЖ № 3 : сб. науч. тр. – Астрахань: Издат. дом «Астраханский университет», 2005. – С. 228-236.

4. Ситников, В. С. Необычные скопления нефти и газа, прогноз и методика их поисков в условиях Крайнего Севера / В. С. Ситников // Комплексование геолого-геофизических методов при обосновании нефтегазопромысловых объектов на Сибирской платформе (в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия)). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2009. – 318 с.; вкл. с. 147-152.

5. Сивцев, А. И. Причины низкой эффективности разработки Толон-Мастахского ГКМ / А. И. Сивцев // Электронное издание «Нефтегазовое дело». [http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev_1.pdf), 2008. – 20 с.

6. Черский, Н. В. Конструкция газовых скважин / Н. В. Черский. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 284 с.

7. Sloan E. Dendy, Jr. Clathrate hydrates of natural gases. – N. Y., Basel, Hong-Kong: Marcel Dekker, Inc., 1997. – 705 pp.

### References

1. Alexandrov, A.R., Rozhin, I.I., Sivtzev, A.I., Syundyukov I.Sh. 2010. The level of the permafrost-hydrate caprock within the buried Yakut high. *Degassing of Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life. Proceedings of the All-Russian Conf. with the international*

participation by the 100<sup>th</sup> anniversary of academician P.N. Kropotkin, 18–22 October 2010, Moscow: 18-20. Moscow: GEOS (in Russian)

2. Sevastianov, O.M., Zakharova, E.E., Bagmanova, S.S. 2002. Methodical and practical aspects of studying gas deposits of the cross-flow nature. *Progress, problems, prospects, Collected articles: 78-82*. Orenburg: Gasprompechat. LC “Orenburggaspromservis”. (in Russian)

3. Larichev, V.V., Popkov, V.I. 2005. Geocological problems of the development of oil and gas condensate fields of the Prikaspiisky depression. *South-Russian Bull. of geology, geography and global energy. Sci. Tech. J., Bull. of sci. reports* 3: 228-236. Astrakhan: Astrakhan University Publ. (in Russian)

4. Sitnikov, V.S. 2009. Unusual oil and gas accumulations, prediction and methods of their

search in the conditions of the North. *Integration of geological-geophysical methods at substantiation of oil and gas search objects on the Siberian platform (in the Eastern Siberia and the Republic of Sakha (Yakutia))*: 147-152. Novosibirsk: SNIIGGiMS. (in Russian)

5. Sivtzev, A.I. 2008. Reasons of low efficiency of the Tolon-Mastakhsky GCF development. // *Electronic edition “Oil and Gas production”*. [http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Sivtzev/Sivtzev_1.pdf): 20. (in Russian)

6. Chersky, N.V. 1961. *Design of gas wells*. Moscow: Gostoptekhizdat, 284 pp. (in Russian)

7. Sloan E. Dendy, Jr. 1997. *Clathrate hydrates of natural gases*. N.Y., Basel, Hong-Kong: Marcel Dekker, Inc., 705 pp.

## **Anthropogenic impact on drinking water quality in urban areas near the southern limit of permafrost: an example of Chita**

L.A. Vasyutich

ChitaStateUniversity

Russia 672039 Chita, st. Alexander-Factory, 30, ChSU, e-mail: lyudmila-vasyuti@mail.ru

**Abstract.** Groundwater of cryogenic talik system in Chita address the needs of the population in the water drinking destination for over 40 years. In the last years there has been contamination of groundwater under the influence of anthropogenic factors. The quality of drinking waterintakes on individual Chita assessed as unsatisfactory. Underground water due to itsdynamism is an active conductor of anthropogenic impacts over long distances.

**Keywords:** anthropogenic impact; groundwater; cryolithozone; urbanization.

## **Антропогенные воздействия на качество питьевых вод урбанизированных территорий южной криолитозоны (на примере г. Читы)**

Л. А. Васютич

Читинский государственный университет

Россия, 672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, д. 30, ЧитГУ,  
e-mail: lyudmila-vasyuti@mail.ru

**Аннотация.** Подземные воды криогенно-таликового комплекса в г. Чите обеспечивают потребности населения в воде хозяйственно-питьевого назначения более 40 лет. В последние годы происходит загрязнения подземных вод под влиянием антропогенных факторов. Качество питьевых вод на отдельных водозаборах г. Читы оценивается как неудовлетворительное. Подземные воды благодаря своей динамичности являются активным проводником антропогенных воздействий на значительные расстояния.

**Ключевые слова:** антропогенные воздействия; подземные воды; криолитозона; урбанизация.

## Антропогенные воздействия на качество питьевых вод урбанизированных территорий южной криолитозоны (на примере г. Читы)

Л. А. Васютин

Прогрессирующая урбанизация территорий, которая сопровождается сосредоточением населения, промышленности и транспорта на не-больших площадях приводит к увеличению антропогенной нагрузки на все компоненты окружающей среды. В результате происходит изменение микроклимата, гидрологических и гидрогеологических условий, деградация многолетнемерзлых пород, загрязнение окружающей среды. Важнейшей задачей в этих условиях является проведение комплекса природо-охранных мероприятий, для обоснования которых необходима информация о величине и распределении техногенной нагрузки.

Под руководством профессора Д.М. Шестернева, данные исследования выполнены в рамках Госбюджетной темы Читинского государственного университета «Оценка антропогенных воздействий на геоэкологические условия урбанизированных территорий южной криолитозоны (на примере г. Читы), регистрационный номер темы 01201066651.

Город Чита находится в области развития резко континентального климата. Отрицательная среднегодовая температура и отсутствие мощного снежного покрова способствуют глубокому сезонному промерзанию пород (до трех и более метров). Многолетнемерзлые породы в окрестностях г. Читы характеризуется температурами в пределах  $-0,2 \dots -1,0$  °С. По условиям формирования многолетнемерзлые горные породы г. Читы относятся к эпигенетическому типу. Она находится в состоянии неустойчивого термодинамического равновесия, и техногенные факторы приводят к коренному изменению температурного режима горных пород [4].

Специфической особенностью городских территорий является нарушенный гидрогеологический режим в связи с большой плотностью застройки, значительной площадью асфальтовых покрытий, густой сетью водонесущих коммуникаций и подземных инженерных сооружений. Для крупных городов характерно как значительное понижение уровней водоносных комплексов, используемых для централизованного водоснабжения, так и повышение уровня грунтовых вод за счет утечек из водопроводной сети и уменьшения

расходных статей водного баланса: испарение и транспирация. Все это способствует усилению миграции загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные комплексы [2].

В настоящее время качество питьевой воды оценивается путем сравнения ее свойств и величин содержания в воде различных компонентов с их утвержденными значениями и предельно допустимыми концентрациями (ПДК). На основе существующих государственных нормативов для питьевой воды А.Н. Воронов и А.А. Шварц разработали общую классификацию качества подземных вод, используемых для питья [3]:

1. Неудовлетворительное качество подземных вод: превышение одним и более техногенными компонентами ПДК по токсикологическим и/или по органолептическим показателям, а также превышение ПДК по токсикологическим показателям одним или несколькими компонентами естественного состава подземных вод.

2. Удовлетворительное качество подземных вод: превышение одним и более компонентами естественного состава ПДК по органолептическим показателям и/или несоответствие воды требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» по микробиологическим показателям.

3. Соответствие СанПиНу: вода должна отвечать требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01.

4. Первая категория: вода должна соответствовать требованиям, предъявляемым СанПиНом 2.1.4.116-02 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества» к питьевой воде первой категории.

5. Высшая категория: вода должна соответствовать требованиям, предъявляемым СанПиНом 2.1.4.116-02 к питьевой воде высшей категории.

Используем данную классификацию для оценки качества питьевых вод Читинского месторождения подземных вод. Водоснабжения в г. Чите осуществляется скважинами глубиной до 300 м, эксплуатирующими трещинно-пластовые воды водоносного криогенно-



таликового комплекса нижнемеловых осадочных отложений Читино-Ингодинского артезианского бассейна. Читинское месторождение подземных вод эксплуатируется с 60-х годов XX века. Эксплуатационные запасы Читинского месторождения подземных вод составляют 327,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Основные городские водозаборы - Центральный, Ингодинский, Угданский и Прибрежный, производительность которых изменяется от 5 тыс. м<sup>3</sup>/сут до 42 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

На Центральном водозаборе в постоянной эксплуатации находится около 20 скважин. Подземные воды характеризуются сульфатно-гидрокарбонатным магниевонатриево-кальциевым составом, минерализацией (0,28-0,32 г/дм<sup>3</sup>), стабильно низкими концентрациями хлоридов (17,2-35,1 мг/дм<sup>3</sup>), сульфатов (53,5-76,7 мг/дм<sup>3</sup>), жесткостью (3,2-4 мг-экв/дм<sup>3</sup>). Проблемы качества воды на Центральном водозаборе связаны с содержанием в воде железа (1,15-2,1 мг/дм<sup>3</sup>) и марганца (0,7 мг/дм<sup>3</sup>).

Ингодинский водозабор представляет собой полукольцевую систему из 10 скважин. На площади водозабора, где идет питание эксплуатируемого водоносного горизонта поверхностными водами, подземные воды в водозаборных скважинах имеют гидрокарбонатный кальциевый состав с минерализацией (0,14-0,32 г/дм<sup>3</sup>), жесткостью от 1,8 до 4,4 мг-экв/дм<sup>3</sup>, содержание фтора 0,2-0,4 мг/дм<sup>3</sup>, содержание железа – 0,6-1,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Угданский водозабор представляет собой площадную систему из 10 скважин, из которых эксплуатируется шесть. На Угданском водозаборе первоначальное качество воды продолжает сохраняться лишь в одной самой северной скважине. В южной части водозабора идет интенсивное подтягивание некондиционных вод, что привело к увеличению концентрации натрия-иона до 360-460 мг/дм<sup>3</sup> (первоначально 120-160 мг/дм<sup>3</sup>), сухого остатка до 1,2 г/дм<sup>3</sup> (первоначально 0,45-0,5 г/дм<sup>3</sup>), наблюдается постоянный рост сульфатов, содержание которых достигло 220-278 мг/дм<sup>3</sup> (первоначально 4-8 мг/дм<sup>3</sup>). Для водозабора характерно присутствие в воде аммония в количестве 1,7-6,6 мг/дм<sup>3</sup>.

Прибрежный водозабор расположен на северном берегу озера Кенон, представляет собой линейный ряд скважин, вытянутый с востока на запад. В эксплуатации находятся 3 скважины. На качество подземных вод влияет взаимосвязь с водами оз. Кенон, использующегося как прудохладитель Читинской ТЭЦ-1, результатом чего стало изме-

нение гидрокарбонатного состава вод озера на хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный. Подтягивание озерной воды повлекло за собой рост минерализации, жесткости, концентраций сульфатов и фтора в подземных водах Прибрежного водозабора. Первоначальный гидрокарбонатный натриевый состав воды сохраняется в скважине наиболее удаленной от озера. В двух других действующих скважинах вода близка к озерной и имеет сульфатно-гидрокарбонатный магниевонатриево-кальциевый состав. Максимальные концентрации железа (до 4-13 мг/дм<sup>3</sup>) характерны для восточной части водозабора. Из микрокомпонентов подземные воды водозабора характеризуются повышенным содержанием бария (1,03-3,1 ПДК), брома – 1,22-1,49 ПДК, лития - 2,4-2,88 ПДК.

Все крупные водозаборы, обеспечивающие население питьевой водой, находятся в черте города, где сосредоточено наибольшее количество источников загрязнения: золоотвал ТЭЦ-1, нефтехранилища, автозаправочные станции, очистные сооружения, территории промышленных предприятий. Загрязняющие вещества, обнаруженные в подземных водах Читинского месторождения в концентрациях, превышающих гигиенические нормативы - это: железо, марганец, аммоний, фтор, нитраты, сульфаты, нефтепродукты [1].

Негативное влияние на качество подземных вод оказывает гидрозолоотвал ТЭЦ-1, из которого в результате деградация многолетней мерзлоты под днищем котловины происходит фильтрация техногенных вод в водоносный криогенно-таликовый комплекс нижнемеловых отложений. Ореол загрязнения подземных вод распространяется в юго-восточном направлении на площади не менее 10-12 км<sup>2</sup>.

Антропогенное воздействие на подземную гидросферу связано с интенсивным отбором питьевых подземных вод. При отборе подземных вод на эксплуатируемых участках Читинского месторождения произошла трансформация гидродинамической структуры фильтрационных потоков. Переход плановой фильтрации в радиальную характерен для Центрального водозабора: общая площадь депрессионной воронки по данным за 2009 г достигает 13,25 км<sup>2</sup>, величина понижения уровня в центре воронки составляет 64,5 м. Отбор подземных вод приводит к изменению качества воды эксплуатируемого комплекса за счет подтягивания некондиционных вод, наиболее показательными примерами существенного изменения качества являются водозаборы Прибрежный и Угданский.

Загрязнение подземных вод происходит не только непосредственно от техногенного источника загрязнения, но и через другие компоненты окружающей среды: поверхностную гидросферу, атмосферу, литосферу (почвы и породы зоны аэрации). Тесная взаимосвязь поверхностных и подземных вод характерна для Читинского месторождения. Эксплуатационные запасы подземных вод Центрального водозабора г. Читы формируются с участием поверхностных вод р. Читинки, которая является источником их восполнения. На площади Ингодинского водозабора идет активное питание эксплуатируемого водоносного горизонта поверхностными водами. На качество подземных вод Прибрежного водозабора оказывает влияние оз. Кенон.

Выводы:

Качество питьевых вод Читинского месторождения подземных вод определяется как физико-географическими, геологоструктурными и гидродинамическими факторами, так и характером и уровнем развития антропогенной нагрузки на геологическую среду.

В соответствии с общей классификацией качества подземных вод, используемых для питья, в пределах Читинского месторождения подземных вод неудовлетворительное качество характерно для питьевых вод Угданского и Прибрежного водозаборов. Удовлетворительное качество характерно для подземных вод на Центральном водозаборе. Требования Сан-ПиН 2.1.4.1074-01 соответствуют подземные воды Ингодинского водозабора.

Подземные воды благодаря своей динамичности являются активным проводником антропогенных воздействий на значительные расстояния. Изучение влияния антропогенной деятельности на состояние окружающей среды, определение критериев и оценок устойчивости геологической среды позволит обосновать масштабы техногенной нагрузки и прогнозировать развитие экологической ситуации при освоении городских территорий.

## Список литературы

1. Васютич, Л. А. Оценка качества питьевых вод Читинского месторождения подземных вод / Л. А. Васютич // Гидрогеология, инженерная геология, геокриология и геоэкология Забайкалья и сопредельных территорий: материалы науч.-практ. конф., 24–25 сент. 2008 г., Чита. – Чита : ЧитГУ, 2008. – С. 140–145.
2. Верхотуров, А. Г. Ресурсы и экологическое состояние питьевых подземных вод Забайкалья / А. Г. Верхотуров, Л. А. Васютич // Недропользование – XXI век. – 2008. – № 3. – С. 79–81.
3. Воронов, А. Н., Шварц А. А. Современные подходы к оценке качества подземных вод / А. Н. Воронов, А. А. Шварц // Проблемы гидрогеологии XXI века: Наука и образование. – М. : Изд-во РУДН, 2003. – С. 12–24.
4. Шестернёв, Д. М. Типизация техногенных воздействий на геокриологические условия / Д. М. Шестернёв // Геокриология СССР. Горные страны юга СССР. – М. : Недра, 1989. – С. 139–143.

## References

1. Vasyutich L.A. 2008. Assessment of drinking water quality of the Chita deposit groundwater. *Hydrogeology, engineering geology, Geocryology and Geoecology of Transbaikalia and the contiguous territory-trajectories: scientific-practical materials. Conf. Sept. 24-25 Chita*: 140-145. Chita: ChSU (in Russian)
2. Verkhoturov A.G. , Vasyutich L.A. 2008. Resources and ecological condition of underground drinking water Baikal. *Subsoil - XXI Century № 3 – 2008*. Moscow: 79-81 (in Russian)
3. Voronov, A., Schwartz, A.A. 2003. Current approaches to assessing the quality of groundwater / *Hydrogeology problems of the XXI century: Science and Education of*. - Moscow: Publishing House of People's Friendship University, 12-24 (in Russian)
4. Shesternev D.M. 1989. Typification of technological impacts on permafrost conditions. *Geocriology USSR. Mountain country south of the USSR*. Moscow: Nedra: 139-143 (in Russian)

## **Geophysical methods of exogenous processes study in choosing the platform for sleeper and slab plant “Railways of Yakutia” construction**

N.N. Grib, A.A. Syasko, V.M. Nikitin, A.V. Kachaev, P.U. Kuznetsov

Technical Institute (branch) of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov.  
Kravchenko-st. 16, Nerungri 678960, Sakha Republic, Russia  
e-mail: grib@nfygu.ru

**Abstract.** The main objectives of geophysical studies are receiving the information about season thawing depth, determining of possible thawing areas and areas of karsts development and estimation of fundamental rocks roof depth. The complex of geophysical methods consists of geological and radiolocation, electric sounding in modification of bipolar axial sounding and seismic prospecting of refracted waves correlating method. The investigation resulted in the formulation of a common notion of season thawing depth which is determined mostly by the position of fundamental rocks roof. Three thawing areas with the thawing depth of 20 meters and more are distinguished, at that it is established that absolute mark of fundamental rocks roof is consistent enough, and friable deposits power is about 20 meters.

**Keywords:** geophysical studies; geological and radiolocation; electric sounding; seismic prospecting, thawing rocks depth, fundamental rocks roof.

## **Изучение экзогенных процессов геофизическими методами при выборе площадки под строительство шпалопроточного завода ОАО АК «Железные дороги Якутии»**

Н. Н. Гриб, А. А. Сясько, В. М. Никитин, А. В. Качаев, П. Ю. Кузнецов

Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри, Россия 678960, г. Нерюнгри, ул. Кравченко, д. 16, ТИ (ф) СВФУ,  
e-mail: grib@nfygu.ru

**Аннотация.** Основными задачами геофизических исследований являются: получение информации по глубине сезонной оттайки; определение возможных таликовых зон и зон возможного развития карста, а также оценка глубины залегания кровли коренных пород. Комплекс геофизических методов включает георадиолокацию, электрическое зондирование в модификации ДОЗ - дипольное осевое зондирование, сейсморазведку КМПВ - корреляционный метод преломленных волн. По результатам исследований сформировано общее представление о глубине сезонной оттайки по участку работ, которая в существенной мере определяется глубиной положения кровли коренных пород. Выделены три таликовые зоны с глубиной протаивания пород до 20 и более метров, а также установлено, что абсолютная отметка кровли коренных пород достаточно выдержана, а мощность рыхлых отложений составляет, в среднем, 20 м.

**Ключевые слова:** геофизические исследования; георадиолокация; электрическое зондирование; сейсморазведка; глубина протаивания пород; кровля коренных пород.

# Изучение экзогенных процессов геофизическими методами при выборе площадки под строительство шпалопропиточного завода ОАО АК «Железные дороги Якутии»

Н. Н. Гриб, А. А. Сясько, В. М. Никитин, А. В. Качаев, П. Ю. Кузнецов

## Введение

При инженерно-геологическом изучении площади под строительство комплекса шпалопропиточного завода в г. Томмот (рис. 1) геофизическими методами применялась методика с использованием опорного геологического разреза, полученного по результатам интерпретации данных буровых работ. Глубины буровых скважин опорного геологического разреза составляли 10 м, что вполне достаточно для получения необходимой информации к построению опорного интерпретационного профиля и решению следующих задач:

- определение глубины сезонной оттайки;
- выделение возможных таликовых зон и зон возможного развития карста;
- определение глубины залегания кровли коренных пород.

## Методы исследования

При геофизических исследованиях был использован комплекс геофизических методов: георадиолокация, электрическое зондирование в модификации ДОЗ - дипольное осевое зондирование, сейсморазведка КМПВ - корреляционный метод преломленных волн.

В качестве базового метода в представленном комплексе геофизических методов был выбран метод георадиолокации, что объясняется обеспечением максимальной точности определения положения аномалии по профилю (шаг трасс по профилю наблюдений - 20 см). Для сравнения: шаг точек электрического зондирования по профилю - 20 м., шаг сейсмоприёмников в методе КМПВ - 5 м. Таким образом, точность определения положения аномалии составляет: для электрического зондирования ДОЗ -  $\pm 10$  м., для сейсморазведки КМПВ -  $\pm 2,5$  м., для георадиолокации -  $\pm 0,10$  м.

## Интерпретация данных геофизических исследований

### *Интерпретация данных георадиолокации*

Интерпретация данных георадиолокации осуществлялась в три этапа.

Первый этап интерпретации включал в себя технологические операции обработки

первичных полевых данных: анализ исходных радарограмм, объединение фрагментов протяженных профилей, выделение волн-помех, определение уровня относительного нуля шкалы глубин, топографическая привязка меток радарограммы.

Второй этап - выделение георадарных комплексов по угловым и стратиграфическим признакам несогласий.

Третий этап - выделение георадарных фаций мерзлых пород и пород, предполагаемых таликовых зон. Выделение фации производилось путем визуального анализа волновой картины, при котором исследовались основные параметры: конфигурация осей синфазности; интенсивность осей синфазности; частотный состав записи; протяженность осей синфазности; форма фациальных единиц в пространстве.

Каждый параметр несет определенную информацию о геологическом строении данной части разреза. Конфигурация отражений позволяет определить основные типы напластования.

Амплитуда отражений зависит от изменения литологии, наличия различных флюидов и используется при прогнозировании латеральной изменчивости отложений. На частотный состав записи влияет взаимное расположение отражающих границ, наличие флюидов и т.д. [1].

### *Интерпретация данных сейсморазведки КМПВ*

При обработке абсолютно всех сейсмических профилей была принята трехслойная модель строения: зона малых скоростей, представленная, по большей части, рыхлыми отложениями верхней части разреза; область мерзлых рыхлых пород; относительно ненарушенные скальные породы. Существенно осложнило интерпретацию наличие техногенных отложений на значительной части профилей.

При интерпретации данных сейсморазведки отмечены следующие особенности разреза:

1. Невыдержанность мощности ЗМС (зоны малых скоростей).



2. Существенная изменчивость мощности зоны мерзлых пород при относительной выдержанности скоростных характеристик.

3. Существенный разброс скоростей распространения упругих волн в третьем слое, соответствующем скальному массиву.

Самым значимым для последующей комплексной интерпретации при обработке данных сейсморазведки признано: выделение

мерзлых пород, существенно отличающихся скоростями распространения упругих волн, выделение таликов и потенциально опасных на развитие карста участков.

Проблема выделения ключевых значимых аномалий была решена только на этапе комплексной интерпретации – с привлечением всех доступных видов информации о строении участка.

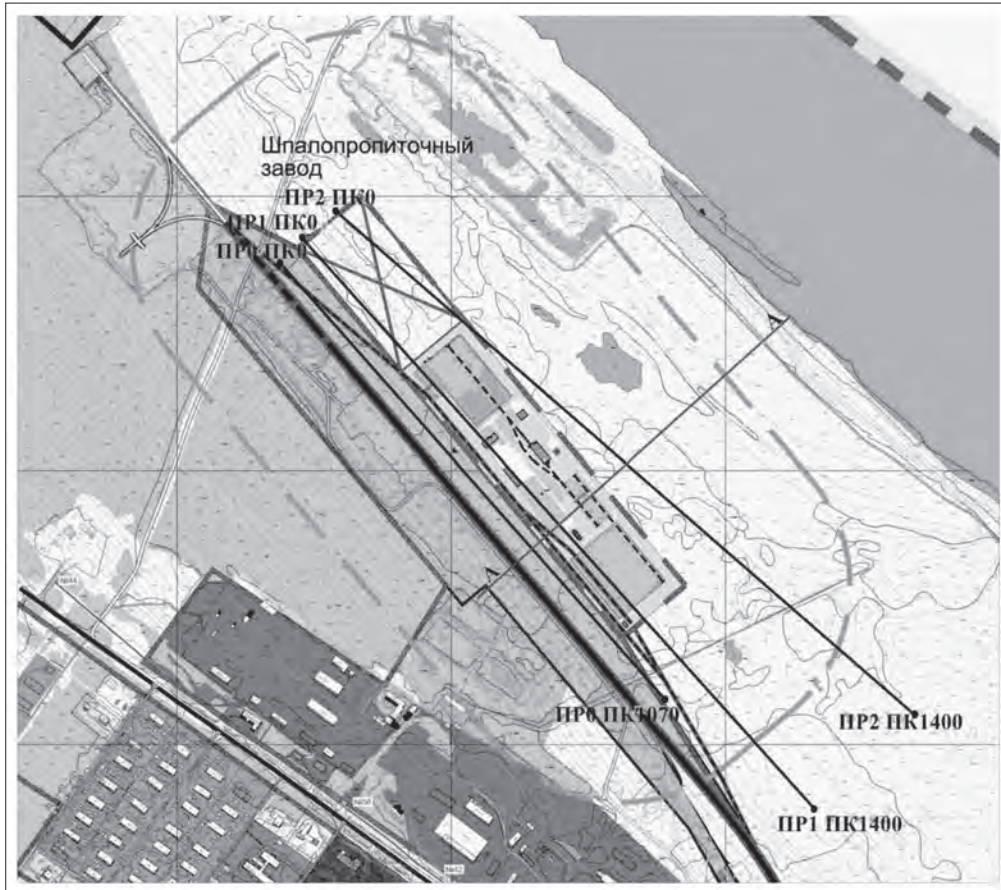


Рис. 1. План-схема площадки под строительство комплекса шпалопропиточного завода в г. Томмот.

#### *Интерпретация данных электрического зондирования ДОЗ.*

При интерпретации данных дипольного осевого зондирования важным фактором, влияющим на последующие построения, является определение положения точки отсчета. С теоретической точки зрения точкой отсчета следует считать середину расстояния между питающим и приемным диполем. Глубина точки отсчета принимается примерно от 1/6 до 1/3 разности установки. Но, по опыту предшествующих исследований [2], наиболее контрастным и геометрически близким к реальному геологическому строению является построение, при котором точка отсчета отнесена к середине питающего (неподвижного) диполя. Помимо преимуществ визуализации, этот спо-

соб построения имеет ещё одно неоспоримое достоинство: при отнесении точки отсчета к питающему диполю однозначно отбраковываются аномалии, обусловленные приповерхностными и поверхностными объектами [3]. Тем не менее, аномалии, морфологически сходные с аномалиями от приповерхностных неоднородностей, не были отбракованы при обработке данных по участку. Причина такого подхода в следующем: минимальная глубинность применяемой установки ДОЗ равна примерно двум с половиной – трем метрам, глубина возможного обнаружения линз льда – примерно такая же. Соответственно, даже приповерхностные аномалии для этих условий исследования могут иметь существенное значение.

### *Комплексная интерпретация геофизических данных*

Комплексная интерпретация геофизических данных, полученных по площади работ. Комплексная интерпретация геофизических данных проводилась в соответствии со следующей схемой:

- выделение значимых аномалий производится путем неоднократных перекрестных сопоставлений геофизических разрезов – сопоставление разных методов в пределах одного профиля;
- сопоставление разрезов по отдельным методам между профилями (три разных вида сопоставлений – по числу геофизических методов);
- сопоставление положения аномальных точек, выделенных в предыдущие этапы увязки разрезов.

### **Результаты и выводы**

По результатам проведения комплексной интерпретации были решены следующие поставленные задачи:

**1. Определение глубины сезонной оттайки.** При определении положения кровли мерзлых пород реперным методом стала сейсморазведка, корреляционный метод преломленных волн (КМПВ). В силу особенностей строения верхней части разреза – техногенная отсыпка и подстилающие суглинки – слой талых пород на скоростных разрезах КМПВ отражен в качестве зоны малых скоростей. Средняя скорость распространения упругих волн по профилю составила 600 – 900 м/с. Второй по контрастности аномалий метод – георадиолокация. Граница талых и мерзлых пород на георадиолокационном разрезе выражено в виде плавной смены характера волновой картины. При обработке данных электрического зондирования выделить четкую контрастную границу не удалось, что, скорее всего, обусловлено тем, что суглинки, как в мерзлом, так и в талом состоянии, имеют относительно невысокое электрическое сопротивление. Тем не менее, при комплексной интерпретации полученных геофизических данных представляется возможным получить общее представление о температурном строении разреза (рис. 2).

**2. Выделение возможных таликовых зон и зон развития карста.** Задача выделения распространения таликовых зон сводилось к определению участков аномально глубокого (существенно ниже уровня сезонной оттайки) протаивания грунтов. Данные участки в дальнейшем интерпретировались как наиболее вероятные зоны распространения таликов.

Основным методом для решения этой задачи стала электроразведка – воронкообразные зоны пониженного сопротивления на геоэлектрическом разрезе позволили определить общую форму таликовых аномалий, которые в дальнейшем уточнялись по данным сейсморазведки и георадиолокации (см. рис. 2).

Зоны развития карста определялись по аномально низким скоростям распространения упругих волн на некоторых интервалах слоя коренных пород (по данным сейсморазведки КМПВ) с привлечением данных георадиолокации.

Основываясь на морфологии выделенных аномалий, можно предположить, что и талики, и карст, образовались в результате действия приповерхностных водотоков, текущих по направлению к реке. Так же, наблюдается корреляция отметок рельефа дневной поверхности с зонами таликов – в таликовых зонах наблюдаются локальные понижения рельефа и, ниже по склону – небольшие водоёмы (см. рис. 1). При этом установлено существенное влияние поверхностных и приповерхностных водотоков на тепловой режим толщи рыхлых пород. Помимо выноса мелкодисперсного материала талой толщи, не исключено образование карстовых полостей в коренных породах с последующим заполнением этих полостей суглинистым материалом, что также приводит к образованию локальных понижений на дневной поверхности (см. рис. 2).

В пределах участка работ выделены три таликовые зоны с глубиной протаивания пород до 20 и более метров. Нижняя граница глубины протайки в существенной мере определяется глубиной положения кровли коренных пород.

**3. Определение глубины залегания кровли коренных пород.** При решении этой задачи учитывался фактор наличия мерзлых пород в верхней части разреза. Наиболее контрастно граница рыхлых и коренных пород выражена на георадиолокационном разрезе. При совмещении построенной по радиолокационным данным границы с электроразведочным и сейсморазведочным разрезами выявлена следующая закономерность – в интервалах профиля, на которых были выделены талики, кровля третьего слоя по данным сейсморазведки практически полностью совпала с построенной границей; ситуация с геоэлектрическим разрезом несколько сложнее – совпадение георадиолокационной границы с областью высокого градиента кажущихся сопротивлений наблюдается примерно на 50% профиля и для решения этой задачи дипольное зондирование привлечено в качестве вспомо-



гательного метода. На тех интервалах профиля, где отсутствовали предполагаемые талики, аномалии на скоростном и геоэлектрическом разрезах были экранированы аномалиями кровли мерзлых пород.

Следует отметить, что существует опасность ложного толкования наблюдаемой георадиолокационной аномалии – аналогичного

вида отражения можно получить, исследуя уровень грунтовых вод. В пользу интерпретации выделенной границы как кровли коренных свидетельствуют следующие факты – абсолютная отметка зеркала воды реки Алдан, протекающей в четырёхстах метрах от участка работ, составляет примерно 278 м. (рис. 3). Отметка выделенной границы – от 265 до 268 м.

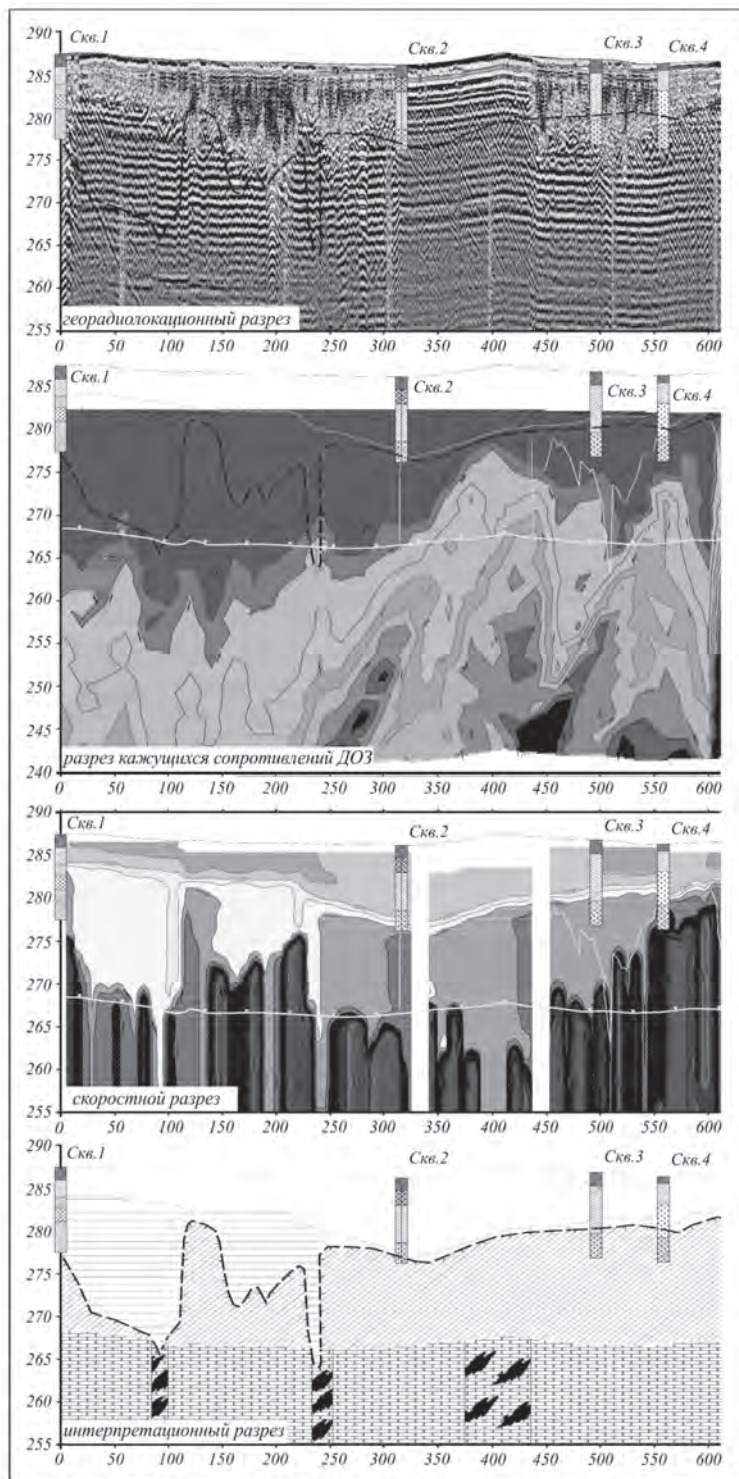


Рис. 2. Характерные аномалии таликовых зон и зон развития карста при комплексной интерпретации.

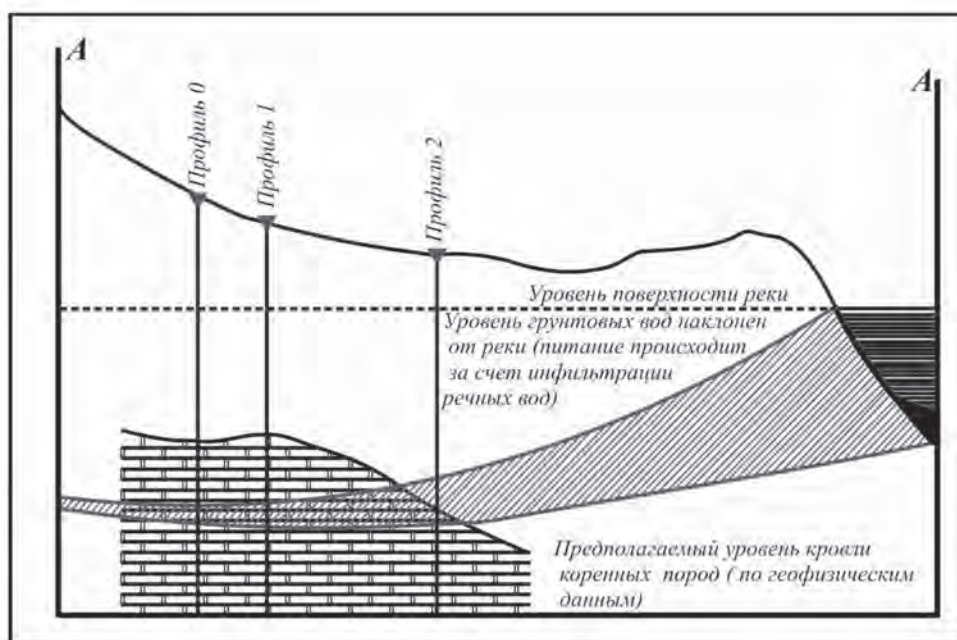


Рис. 3. Модель уровня зеркала грунтовых вод.

При приближении к реке, абсолютная отметка предполагаемой кровли коренных пород составляет 260 м. Это логично вписывается в картину увеличения мощности рыхлых отложений по мере приближения к водотоку и не подтверждает гипотезу о связи аномалии с уровнем грунтовых вод. Таким образом, в результате комплексной интерпретации геофизических данных было установлено, что абсолютная отметка кровли коренных пород достаточно выдержана, а мощность рыхлых отложений составляет, в среднем, 20 м.

#### Список литературы

1. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие / А. В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.
2. Технология геолого-геофизического изучения выходов угольных пластов в криолитозоне /

Н. Н. Гриб [и др.]. – Якутск : ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2004. – 160 с.

3. Шевнин, В. А. Краткое пособие по электроразведке / В. А. Шевнин, И. Н. Модин, Д. К. Большаков. – М. : МГУ, 1999. – Режим доступа: <http://geophys.geol.msu.ru/STUDY/krym/krim008.htm>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

#### References

1. Starovoitov, A.V. 2008. *Geological and radiolocation data interpretation*. Moscow: Moscow State University Publisher (in Russian)
2. Grib, N.N. 2004. *Technology of geological and geophysical studying methods of open coal beds in criolitozone*. Yakutsk: Russian Academy of Science (in Russian)
3. Shevnin, V.A. 1999. *Short educational supply on electric prospecting*. Moscow: Moscow State University Publisher (in Russian)



## **Research of cryogenic conditions changes of the soil in the technogenic impact by GPR method**

D.V. Savvin, L.L.Fedorova, A.V. Omelyanenko

Chersky Institute of Northern Mining, SB RAS  
Lenina Ave. 43, Yakutsk, Russia 677000, e-mail: deophysic@mail.ru

**Abstract.** The results of GPR survey cryogenic conditions of the soils of the road network in Yakutsk are presented. Zones of cryogenic conditions changes of the soil refined on the basis analysis of dynamic characteristics of the GPR signals are installed. The technique of mapping the GPR anomalies associated with the disruption of the structure of soils.

**Keywords:** frozen soil; cryogenic conditions; geological engineering survey; GPR method; mapping.

## **Исследование методом георадиолокации изменения криогенного состояния грунтов при техногенном воздействии**

Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко

Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского СО РАН  
Россия, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, д. 43, ИГДС СО РАН, e-mail: deophysic@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты георадиолокационного обследования криогенного состояния грунтов улично-дорожной сети г. Якутска. Установлены зоны изменения криогенного состояния грунтов определяющиеся на основе анализа динамических характеристик георадиолокационных сигналов. Предложена методика картирования георадиолокационных аномалий связанных с нарушением структуры грунтов.

**Ключевые слова:** мерзлые грунты; криогенное состояние; инженерно-геологические изыскания; георадиолокация; картирование.

# Исследование методом георадиолокации изменения криогенного состояния грунтов при техногенном воздействии

Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко

## Введение

Освоение районов распространения многолетнемерзлых пород сопровождается интенсивным строительством инженерных сооружений, что неизбежно приводит к нарушению природного температурного баланса. При этом многолетнемерзлые грунты даже в случае кратковременных нарушений поверхностных условий в пределах сезоннопротаивающего слоя меняют свои прочностные свойства, влияя, тем самым, на устойчивость оснований инженерных сооружений. В этих случаях необходимо проводить исследования по прогнозу развития криогенных процессов и ранней диагностики возникновения последствий криогенных явлений. Одним из методов успешно решающих задачи дистанционного криогенного мониторинга грунтов оснований фундаментов является георадиолокация, как наиболее эффективный геофизический метод для детального изучения мерзлых рыхлых отложений.

Объектами георадиолокационных исследований являются мерзлые грунты, отличающиеся высокими значениями электрических сопротивлений. В районах развития многолетнемерзлых пород метод георадиолокации успешно применяют для мониторинговых наблюдений за криогенным состоянием грунтов, для выделения и оконтуривания зон нарушенных и разуплотненных пород. Контрастное различие физических свойств криогенных нарушенных пород от вмещающего массива предопределяет успешное использование метода для картирования этих зон как в плане, так и в разрезе.

## Методы

Экспериментальные исследования по георадиолокационному обследованию криогенного состояния грунтов улично-дорожной сети, свайного основания инженерных сооружений проведены по улице Короленко г. Якутска. Зондирования проведены по 14 профилям. Схема георадиолокационных профилей приведена на рис. 1.

Съемка производится по методике георадиолокационного профилирования

разработанной для применения в комплексе инженерно-геологических изысканий [1]. Высокая детализация геофизического разреза предопределяется практически непрерывной скоростью записи сигналов. Энергетическое суммирование сигналов в режиме накоплений позволяет выявлять информацию на фоне шумов, что особенно важно при работе на застроенных участках. К примеру, работы, проводились непосредственно на улице, где также наблюдалось интенсивное движение автотранспорта. Радарограммы получены при съемке со скоростью 2-3 км/ч и экспериментально установленным параметром накоплений. Расстояние между точками зондирования  $d = 6-10$  см, что удовлетворяет детализации разреза для непрерывной съемки на исследуемом участке работ. По технологии работ при площадной съемке с целью изучения криогенного состояния пород требуется свести до минимума вероятность пропуска аномальных зон и локальных неоднородностей (карст, межмерзлотные талики, нарушения, зоны разуплотнения). Прослеживание границ раздела сред осуществляется по равномерной системе профилей с расстоянием между профилями не более 5 м, а в некоторых случаях до 1-2 м, при изучении локальных объектов имеющих изометрическую форму [2]. Длина каждого профиля выбирается из расчета величины аномальной зоны, так как профиль должен пересекать грунты с измененным криогенным состоянием и грунты без аномальных изменений. Это делается для сравнительного анализа сигналов аномальной зоны на фоне неизменных грунтов.

Необходимая глубина исследования достаточна в пределах 5-8 м. Для детального исследования криогенного состояния грунтов целесообразно применение аппаратуры с частотами выше 400 МГц [3]. Выбор спектра частот определяется разрешающей способностью аппаратуры в талых и мерзлых породах и необходимой глубиной. Из комплекта георадара серии ОКО эти параметры обеспечивают антенные блоки АБ-1200 (1200 МГц), АБ-700 (700 МГц) и АБ-400 (400 МГц).



Рис. 1. План георадиолокационных работ по ул. Короленко.

При площадной съемке в режиме непрерывных измерений не удастся получить одинаковое количество точек зондирования по профилю, поэтому перед обработкой требуется подготовка полученных данных. Разработано специальное программное обеспечение позволяющая формировать георадиолокационные профили в равномерную сетку по площади. Если выбранное расстояние между точками зондирования удовлетворяет детальности исследований, то выравнивание производится без потери информации и не влияет на качество дальнейшей обработки и интерпретации материалов исследований.

Контакты слоев с различными физическими свойствами (галечники, пески и суглинки с различной влажностью, льдистостью) выделяются по сигналам с высокими амплитудами. В процессе обработки георадиолокационных данных на всех разрезах выделены зоны хаотичного распределения высокоамплитудных контрастных отражений, которые выявляются с использованием регулировки усиления по экспоненте и полосовой фильтрацией. На рис.2 представлены результаты георадиолокационной съемки и выделения сигналов по расчетным значениям дисперсии ( $DX$ ). По данным исследований,

геология и положение границ очередности отсыпки соответствуют их графическому представлению.

### Результаты и обсуждение

По результатам обработки данных нами выделены 3 зоны изменения криогенного состояния грунтов на различных глубинах (рис.3). Первая зона I на расстоянии  $L=$  от 23 до 28 м и выделяется с глубины 2,2 м. Третья зона III выделяется на расстоянии  $L=$  от 98 до 116 м и прослеживается в интервале глубин от 2,0 до 4,1 м при средней глубине 3,05 м. Так как основной задачей являлось изучение участка возле жилого дома, то во второй выделенной зоне II были проведены дополнительные профили для ее оконтуривания (рис.1). Вторая зона ( $L=$  от 75 до 92 м) прослеживается на глубине от 0,4 м возле жилого дома и до 5,0 м в сторону от нее. Средняя глубина зоны 2,3 м. Профили пересекают подземные коммуникации, глубина расположения которых примерно 2 – 2,5 м. Криогенные изменения выделенных зон, возможно, определяются растепляющим воздействием канализационных труб. В пределах этих зон возможна существенная деформация дорожного покрытия.

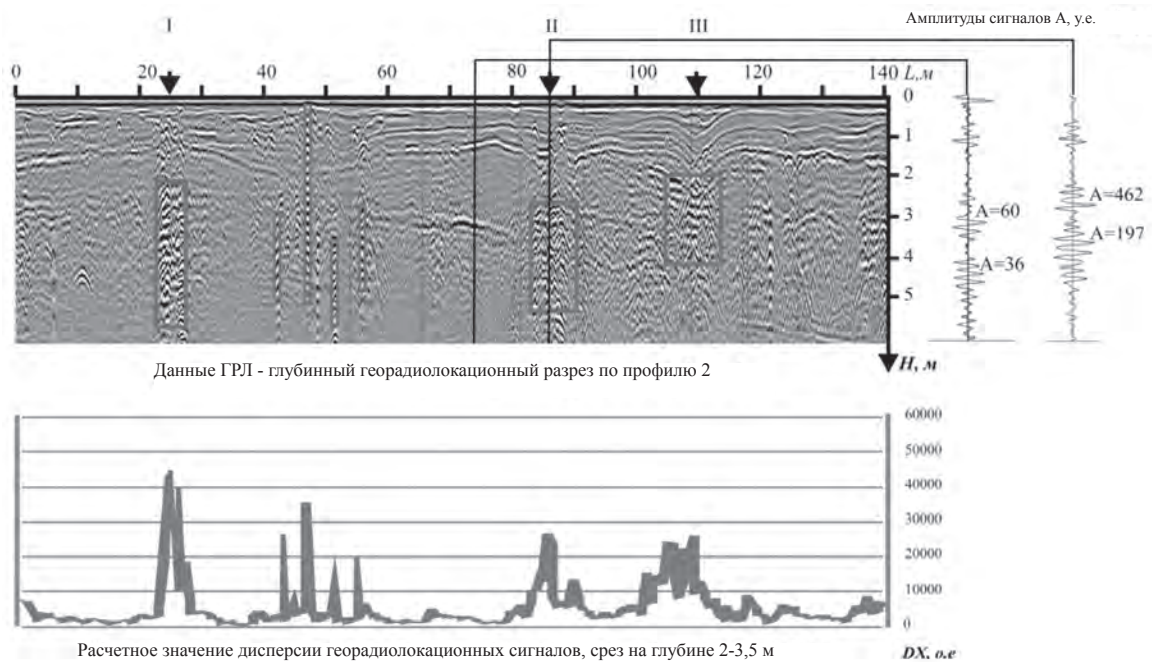


Рис. 2. Пример георадиолокационного выявления зон изменения криогенного состояния.

При горизонтальном расположении границ и ненарушенных структурах пород изменения криогенного состояния не всегда выделяются хаотичным распределением высокоамплитудных сигналов. В сезонные периоды промерзания и протаивания происходит миграция воды в породах. Одна из основных радиофизических характеристик мерзлых горных пород скорость распространения электромагнитных волн, в значительной степени зависит от количества в породе связующего льда или свободной воды. По скоростным параметрам среды возможно определение льдистости и влагонасыщенности грунтов. И появляется возможность интерпретации результатов криогенного состояния грунтов.

Интерпретационная модель позволяет решать некоторые задачи определения параметров (влажносодержание или льдистые) локальных неоднородностей по кинематике и динамике электромагнитных волн при учете параметров поляризации, проводимости и диэлектрической проницаемости исследуемых пород.

#### Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода георадиолокации для выявления, прослеживания по глубине, простиранию и картированию некоторых геокриологических структур и состояния грунтов при техногенном воздействии.



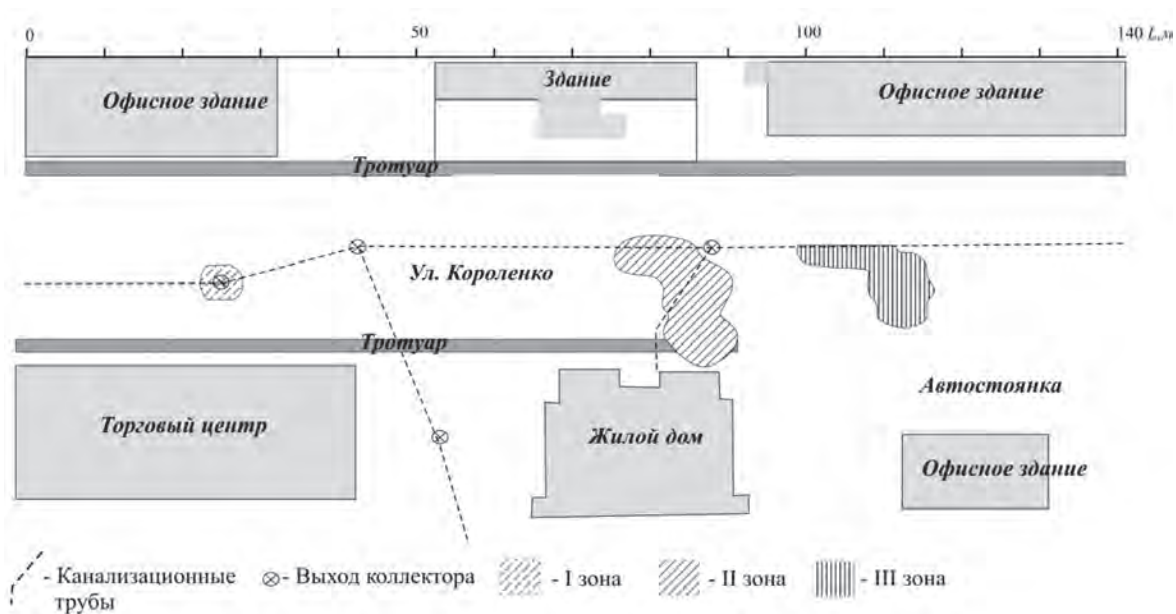


Рис. 3. Результат георадиолокационного обследования криогенного состояния грунтов на участке ул. Короленько, г. Якутск.

### Список литературы

1. Омеляненко, А. В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород / А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова. – Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
2. Омеляненко, А. В. Геофизическое картирование подповерхностных геологических структур криолитозоны / А. В. Омеляненко, Д. В. Саввин, Н. Д. Прудетский // Сборник статей. Отдельный выпуск Горн. информ.-аналит. бюллетеня. – 2009. – № ОВ4. – С. 106–114.
3. Омеляненко, А. В. Возможности георадиолокационного контроля качества строительства грунтовых автомобильных дорог в условиях криолитозоны / А. В. Омеляненко, Л. Л. Федорова, Д. В. Саввин // II Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». – Новокузнецк, 2010. – С. 8–12.

### References

1. Omelyanenko, A.V., Fedorova L.L. 2006. *Investigation of permafrost by GPR*. Yakutsk: Yakutian Scientific Centre SB RAS Press, 136 pp. (in Russian).
2. Omelyanenko, A.V., Savvin D.V., Prudetckiy N.D. 2009. Geophysical mapping of subsurface geological structures of permafrost. *Mining information and analytical Journal* (4): 106-114. (in Russian).
3. Omelyanenko, A.V., Fedorova L.L., Savvin D.V. 2010. Performance capabilities GPR construction quality control of soil roads in permafrost zone. *Perspective of Development motor transport safety complex, Second All-Russian Scientific Conference. Novokuz-netck, Russia*: 8-12

## Near-surface ground temperature variations at the Yakutsk permafrost thermal monitoring site during the last 40 years

Yu. B. Skachkov, P. N. Skryabin, S. P. Varlamov

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia.  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: skachkov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Since 1995, ground temperature observations have been conducted at the Permafrost Institute's site in Yakutsk, as part of the permafrost thermal monitoring program for Central Yakutia. Temperatures are measured within the depth of annual temperature variation (0-15 m) in two characteristic landscapes, meadow and forest. The purpose of the study is to characterize interannual and long-term variations in active-layer and permafrost thermal state in response to recent climate warming. In Yakutsk, air temperatures have noticeably increased during the last 30-35 years, particularly in winter. Moreover, significant year-to-year variations in snow cover have been observed in the first decade of the 21st century. These are the main factors that control the thermal regime within the layer of annual temperature variation. Observations at the Yakutsk site have provided a valuable set of long-term field data and determined the range and extremes of mean annual ground temperature within the depth of zero annual amplitude. The results of 15 years of observations indicate significant short-term variability of mean annual ground temperatures related mainly to anomalously low or high winter snowfall. Comparison of temperature profiles obtained in 1971-1975 and in 2006-2010 shows, however, that the thermal state of the upper permafrost has generally been quite stable. The depth of seasonal thaw exhibits little variability from year to year, with no increasing trend observed. It is thus evident that the permafrost in Central Yakutia remains thermally stable despite the highest climate warming trend in the region.

**Keywords:** active layer; near-surface permafrost; mean annual ground temperature; snow cover.

## Изменения температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплобалансовом стационаре за последние сорок лет

Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрябин, С.П. Варламов

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д.36, ИМЗ СО РАН, e-mail: skachkov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** С 1995 г. в рамках мониторинга теплового состояния горных пород Центральной Якутии в г. Якутске на стационаре Института мерзлотоведения в двух характерных ландшафтах (луг – лес) проводятся температурные наблюдения в слое годовых теплооборотов (0-15 м). Цель исследования заключается в оценке межгодовой и многолетней изменчивости термического режима грунтов при современном потеплении климата. В последние 30-35 лет в Якутске наблюдается заметное повышение среднегодовой температуры воздуха, обусловленное в основном потеплением зимних периодов. Кроме того, в первом десятилетии XXI века отмечается большая межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова. Это основные факторы, формирующие тепловой режим слоя годовых теплооборотов. К настоящему времени накоплена значительная база натурных данных, представляющая научно-практический интерес. Выявлен диапазон изменчивости среднегодовой температуры грунтов и ее экстремумов в слое годовых теплооборотов. Анализ 15-летнего ряда наблюдений показал большую короткопериодную изменчивость среднегодовой температуры грунтов в результате влияния, в основном, аномально много- и малоснежных зим. В целом же, как показывает сравнение температурных разрезов за периоды 1971-1975 гг. и 2006-2010 гг., термическое состояние верхних горизонтов криолитозоны остается достаточно стабильным. Глубина сезонного протаивания характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Отсутствует тенденция ее возрастания. Таким образом, натурные наблюдения свидетельствуют о высокой термической устойчивости криолитозоны Центральной Якутии в современный период, несмотря на наибольшее потепление климата в регионе.

**Ключевые слова:** слой годовых теплооборотов; среднегодовая температура грунта; снежный покров.

# Изменения температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплобалансовом стационаре за последние сорок лет

Ю.Б.Скачков, П.Н.Скрябин, С.П.Варламов

## Введение

Якутский теплобалансовый стационар («Якутск»), организованный в 1968 г. А.В.Павловым, был предназначен для решения задач сельскохозяйственного производства, горного дела, дорожного и гидротехнического строительства в Якутии. Он размещается на II-ой надпойменной террасе р. Лены на территории Института мерзлотоведения СО РАН. Наблюдения на нем были начаты в 1969 г. на 9 специально оборудованных экспериментальных площадках: 1 – с естественным травяным и ненарушенным снежным покровом; 2 – в сосновом лесу; 3 – оголенная; 4 – асфальтированная; 5,6,7 – с покрытиями из синтетических материалов (пенопласт, пленки); 6 – с отмошками из досок в виде навеса; 9 – с искусственным увлажнением. В ходе исследований, которые продолжались до 1979 г., были детально изучены суточный, сезонный и годичный ход теплообмена поверхности с атмосферой, разработан ряд новых математических моделей промерзания-протаивания грунтов. Результаты наблюдений были обобщены в многочисленных публикациях, в том числе в 6 монографиях [1-4 и др.].

## Методы

На стационаре «Якутск» в характерных естественных ландшафтах Центральной Якутии: на разнотравно-злаковом лугу и в сосновом лесу, в период 1971-1975 проводились температурные наблюдения в скважинах глубиной 10-16 м [3].

Площадка «Луг» – участок с лугово-степной растительностью. Литологический разрез: до 0,2-0,3 м дерново-растительный слой; с 0,2-0,3 до 0,6 м – легкий суглинок; далее песок мелкозернистый.

Площадка «Лес» – сосняк толокнянковый. Возраст 100-120 лет, сомкнутость крон 0,3-0,4, средняя высота 10-12 м. Находится на расстоянии 200 м от площадки «Луг».

В 1995 г. по инициативе авторов настоящего доклада в рамках мониторинга теплового состояния горных пород Центральной Якутии температурные наблюдения на территории стационара на этих площадках были возобновлены. Цель исследования заключается в оценке межгодовой и многолетней изменчивости термического режима горных пород при современном потеплении климата.

Измерения температуры грунтов проводятся в двух скважинах глубиной 15 м с использованием терморезисторных гирлянд. Периодичность измерений: 1 раз в месяц (15-е число). В зимнее время параллельно ведутся наблюдения за динамикой снежного покрова на площадках.

С 1995 г. авторы провели на стационаре 15 годовых циклов наблюдений за температурой грунтов слоя годовых теплооборотов и за глубиной сезонного протаивания. Собранный к настоящему времени многолетний статистический материал позволяет оценить амплитуду колебаний температуры грунтов в слое годовых теплооборотов и определить тенденцию изменения термического состояния верхних горизонтов криолитозоны.

## Результаты и обсуждение

В последние 30-35 лет в Якутске наблюдается заметное повышение среднегодовой температуры воздуха, обусловленное в основном потеплением зимних периодов [5]. Кроме того, в первом десятилетии этого века отмечается большая межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова (рис. 1). Это основные факторы, формирующие тепловой режим слоя годовых теплооборотов.

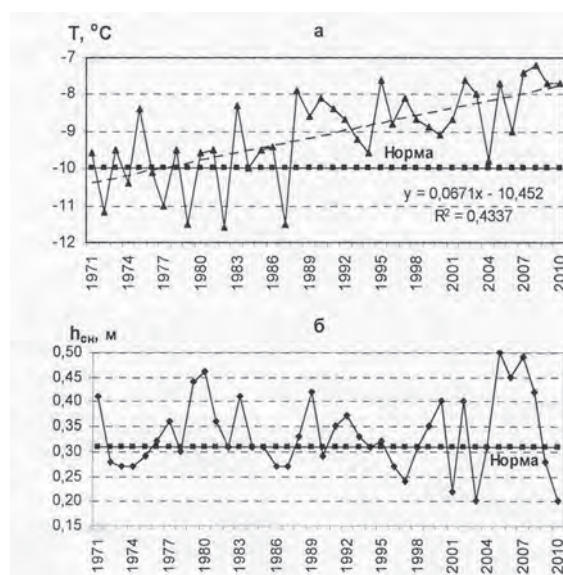


Рис.1. Многолетняя изменчивость среднегодовой температуры воздуха (а) и максимальной среднедекадной высоты снежного покрова (б).

Среднегодовая температура грунта ( $T_{гр}$ ) – один из важнейших параметров температурного поля.  $T_{гр}$  меняется год от года по всему профилю слоя годовых теплооборотов в зависимости от изменчивости вышеназванных факторов. Этот параметр важен не только для мерзлотоведов, занимающихся расчетами и моделированием тепловых процессов в мерзлых грунтах, но также проектировщикам и строителям. Кроме  $T_{гр}$ , необходимо знать амплитуду колебаний температуры, а также ее экстремумы.

К сожалению, данные по температуре

грунтов, получаемых по вытяжным термометрам на метеостанции г. Якутска в последние десятилетия, вследствие обводненности прилегающей территории, не являются кондиционными [2]. Их нельзя использовать при анализе межгодовой изменчивости.

В свете вышесказанного, информация представленная в табл. 1, вызывает определенный интерес. Ряд наблюдений за последние 15 лет позволил расширить диапазон изменчивости температуры грунта по разрезу (0-15 м), установленный А.В. Павловым в период теплорасчетных наблюдений 1971-1973 гг.

Таблица 1. Температура грунтов на стационаре «Якутск» за период 1995-2010 гг., °С

Глубина, м	Среднегодовая			Абсолютный максимум	Абсолютный минимум	Амплитуда
	наибольшая	средняя	наименьшая			
Луг						
1	-1,5	-2,7	-4,0	8,8	-14,5	23,3
2	-1,4	-2,2	-3,2	0,6	-8,1	8,7
3	-1,4	-2,1	-3,0	-0,3	-6,5	6,2
4	-1,4	-2,1	-2,8	-0,5	-5,4	4,9
6	-1,4	-2,0	-2,6	-0,9	-3,9	3,0
8	-1,7	-2,0	-2,4	-1,4	-3,1	1,7
10	-1,8	-2,0	-2,3	-1,6	-2,7	1,1
15	-1,9	-2,0	-2,2	-1,8	-2,3	0,5
Лес						
1	-3,0	-4,5	-6,0	7,4	-18,4	25,8
2	-2,7	-3,6	-4,3	0,2	-8,9	9,1
3	-2,8	-3,5	-4,1	-0,7	-7,6	6,9
4	-2,8	-3,4	-4,0	-1,0	-7,3	6,3
6	-2,9	-3,5	-3,9	-1,8	-5,4	3,6
8	-3,0	-3,4	-3,8	-2,2	-4,7	2,5
10	-3,0	-3,4	-3,7	-2,6	-4,2	1,6
15	-3,4	-3,7	-3,9	-3,2	-4,0	0,8

[1].

Первые же сравнения осредненных данных наблюдений за 2 временных цикла: 1971-1975 и 1995-1999 гг. [6] привели к парадоксальному результату. Оказывается, что, несмотря на вполне очевидное повышение среднегодовой температуры воздуха в Якутске за последние десятилетия, температура грунтов не только не стала выше, но даже, напротив, понизилась: на лугу на 0,2 – 0,5 °С, а в сосновом лесу на 0,1 – 0,2 °С. Следует отметить, что метеорологические условия периода 1971-1975 гг. были более суровыми, чем периода 1995-1999 гг. Среднегодовая температура воздуха и зимние сезоны 25 лет назад были холоднее современных, а снегоотложения примерно одинаковы.

Что же явилось причиной некоторого похолодания грунтов? Наши исследования показали, что в окрестностях Якутска в период с начала 70-х до окончания 20 века происходило явное снижение высоты снежного покрова (см.

рис. 1б), особенно заметное в первую половину зимы и уменьшение его теплоизолирующего влияния. В этот же период отмечалось четко выраженное увеличение высоты снега во второй половине апреля, т.е. в то время, когда радиационный баланс переходит через ноль и снег оказывает на грунты уже охлаждающее влияние. Кроме того, наблюдалась явная тенденция запаздывания схода снега [7].

Все вышперечисленные факторы и стали решающими в формировании температуры грунтов в эти десятилетия, хотя, возможно, и не единственными.

Последующие наблюдения, уже в 21 веке, позволили выявить большие межгодовые изменения температуры грунтов, вызванные серией аномально много- и малоснежных зим.

На редкость малоснежная зима 2002-2003 гг. (средняя декабрьская высота снега составила всего лишь 0,12 м при норме 0,23 м) оказалась к тому же рекордной по продолжительности залегания снежного покрова:



всего 172 суток при норме 202. Как следствие – грунты охладились до наименьших значений всего периода наблюдений [8].

Последовавшие друг за другом аномально многоснежные зимы 2005-2007 гг., что явилось беспрецедентным в истории наблюдений за снежным покровом в Якутске, произвели обратный эффект, повысив среднегодовую температуру грунтов: на лугу на глубинах 2 м – от  $-2,7^{\circ}\text{C}$  до  $-1,6^{\circ}\text{C}$ , на 5 м – от  $-2,3^{\circ}\text{C}$  до  $-1,4^{\circ}\text{C}$  на 10 м – от  $-2,1^{\circ}\text{C}$  до  $-1,8^{\circ}\text{C}$ ; в лесу на глубинах 2 м – от  $-4,1^{\circ}\text{C}$  до  $-2,7^{\circ}\text{C}$ , на 5 м – от  $-3,8^{\circ}\text{C}$  до  $-2,8^{\circ}\text{C}$  на 10 м – от  $-3,6^{\circ}\text{C}$  до  $-3,0^{\circ}\text{C}$  (рис.2).

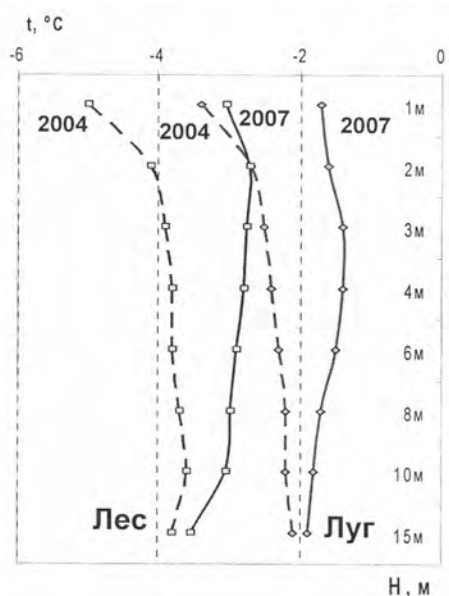


Рис.2. Изменение по глубине среднегодовых температур грунта.

Однако, зимние сезоны 2009-2010 гг., оказавшись аномально малоснежными, практически вернули среднегодовую температуру грунтов во всем разрезе «на круги своя».

Интересно сравнить температурные разрезы, осредненные за периоды, отдаленные друг от друга почти на 40 лет. Обратимся сначала к метеорологическим условиям этих периодов. Как видно из табл.2, в последние годы все месяцы были теплее, чем в 1971-1975 гг., а среднегодовая температура оказалась на  $2^{\circ}\text{C}$  выше, в основном за счет зимних месяцев.

При этом средняя высота снежного покрова в 1971-1975 гг. составила 0,3 м, а в период 2006-2010 гг. – 0,37 м.

На лугу к настоящему времени на глубинах 3-7 м потеплело на  $0,2-0,3^{\circ}\text{C}$ , а на глубинах 8-15 м все лишь на  $0,1^{\circ}\text{C}$  (рис.3). Учитывая значительные колебания температуры, к которым приводит даже одна аномальная зима, можно считать такую разницу малозначительной. В лесу же изменений практически нет.

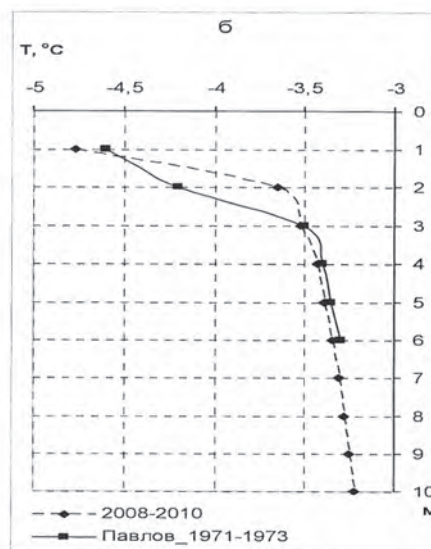
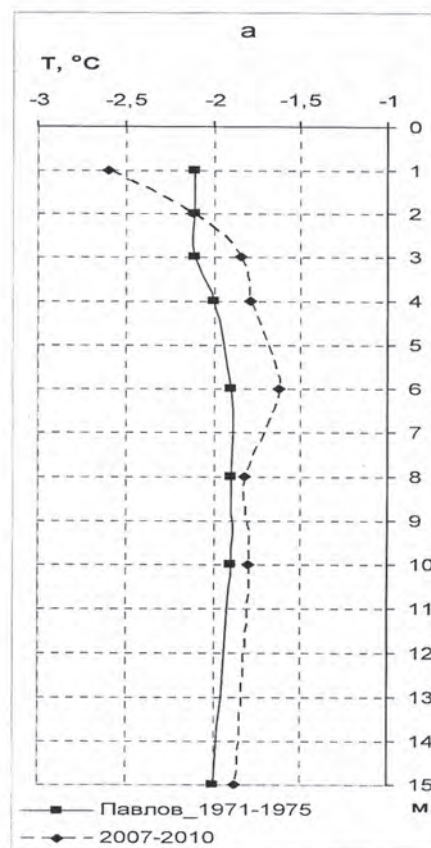


Рис.3. Изменение по глубине среднегодовых температур грунта на лугу (а) и в лесу (б) за различные периоды.

Таким образом, можно констатировать, что температура грунтов в изучаемых естественных ландшафтах за последние сорок лет, испытывая значительные короткопериодные

Таблица 2. Среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха за отдельные периоды в Якутске, °С

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1971-1975 гг.	-40,9	-37,3	-21,2	-6,0	8,2	15,7	19,0	14,5	6,4	-7,5	-30,1	-38,8	-9,8
2006-2010 гг.	-37,1	-34,4	-18,6	-3,9	8,6	17,8	19,4	16,1	6,5	-6,1	-25,8	-36,2	-7,8
Разница	3,8	2,9	2,6	2,1	0,4	2,1	0,4	1,6	0,1	1,4	4,3	2,6	2,0

колебания в слое годовых теплооборотов, практически не изменилась по среднегодовым значениям. На наш взгляд, отсутствие на сегодняшний день тенденции повышения температуры верхних горизонтов криолитозоны в Якутске является важным итогом наших исследований. Особенно в свете высказываний различных специалистов, предрекающих скорую деградацию вечной мерзлоты при глобальном потеплении климата.

Если температура грунтов слоя годовых теплооборотов характеризуется большой межгодовой изменчивостью, то этого нельзя сказать про глубину сезонного протаивания ( $\xi$ ). За последние 15 лет  $\xi$  на лугу варьировала в пределах 1,82 м - 1,89 м, составив в среднем 1,85 м. В лесу  $\xi$  изменялась от 1,77 м - 1,90 м, составив в среднем 1,83 м.

Для сравнения: в период с 1968 г. по 1976 г.  $\xi$  на лугу изменялась от 1,73 до 1,95 м [3].

### Заключение

Основные выводы наших исследований на данном этапе можно свести к следующему.

1. Несмотря на наибольшее потепление современного климата, по сравнению с другими северными регионами России, изменение термического состояния слоя годовых теплооборотов в естественных ландшафтах г. Якутска выражено слабо.

2. Современный период характеризуется в целом достаточной термической устойчивостью. Короткопериодные колебания температуры грунтов последних лет вызваны в основном аномально многоснежными и аномально малоснежными зимами.

3. Глубина сезонного протаивания в естественных ландшафтах является достаточно стабильной и характеризуется малой межгодовой изменчивостью. Отсутствует тенденция возрастания глубины сезонного протаивания.

4. Необходимость дальнейшего продолжения геотемпературного мониторинга очевидна как с научной, так и с практической точек зрения. В связи с увеличением частоты аномальных зимних сезонов в Центральной Якутии амплитуды колебаний температуры

грунтов, и в первую очередь в деятельном слое, значительно выросли, что необходимо учитывать при решении научно-практических задач.

### Благодарности

Авторы глубоко признательны А.В. Павлову, основоположнику современного мониторинга криолитозоны, за многолетнюю поддержку, ценные советы и методическую помощь.

### Список литературы

1. Павлов, А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах СССР / А.В. Павлов. – Якутск : Кн. изд-во, 1975. – 302 с.
2. Павлов, А. В. Мониторинг криолитозоны / А.В. Павлов. – Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2008. – 229 с.
3. Павлов, А.В. Теплофизика ландшафтов / А.В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 284 с.
4. Павлов, А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А.В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1980. – 240 с.
5. Скачков, Ю.Б. Современная изменчивость основных элементов климата г. Якутска / Ю.Б. Скачков // Материалы российской конф. Восьмое сибирское совещание по климатологическому мониторингу, 8-10 октября 2009 г., г.Томск. – Томск: Аграф-Пресс, 2009. – С. 83–84.
6. Скачков, Ю. Б. Термическая устойчивость криолитозоны Якутии при современном потеплении климата / Ю.Б. Скачков, П.Н. Скрыбин, С.П. Варламов // Наука и образование. – 2000. – № 3 (19). – С. 26–31.
7. Скачков, Ю.Б. Оценка современной изменчивости характеристик снежного покрова в Якутии / Ю.Б. Скачков // Материалы Международной конференции «Криогенные ресурсы полярных регионов», 21-24 апреля 2008 г., г. Тюмень, Россия. – Тюмень, 2008. – С. 271–274. – Библиогр.: с. 274.
8. Скачков, Ю.Б. Аномальные зимы и их роль в формировании термического режима грунтов / Ю.Б. Скачков // Материалы Третьей конференции геокриологов России, 31 мая – 3 июня 2005 г., г. Москва. – М. : Изд-во МГУ, 2005, Т. 3. – С. 239–244. – Библиогр.: с. 244.

### References

1. Pavlov, A.V. 1975. Heat Exchange between Soil and Atmosphere in Northern and Temperate Latitudes of the USSR. Yakutsk, 302 pp. (in Russian)
2. Pavlov, A.V. 2008. Permafrost Monitoring. Novosibirsk: Geo Academic Publ., 229 pp. (in Russian).
3. Pavlov, A.V. 1979. Thermal Physics of Landscapes. Novosibirsk: Nauka, 284 pp. (in Russian)
4. Pavlov, A.V. 1980. Calculation and Control of the Soil Cryogenic Regime. Novosibirsk: Nauka, 240 pp. (in Russian)
5. Skachkov, Yu.B. 2009. Recent variations in main climatic elements at Yakutsk. *Proceedings of the Eighth Siberian Workshop on Climate and Ecological Monitoring, Tomsk, Russia, October 8-10, 2009*: 83-84. (in Russian)
6. Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N., Varlamov, S.P. 2000. Thermal stability of Yakutian permafrost under current climate warming. *Nauka i Obrazovanie* 3 (19): 26–31. (in Russian)
7. Skachkov, Yu.B., 2008. Recent variations of snow cover parameters in Yakutia. *Cryogenic Resources of Polar Regions, Proceedings of the International Conference, Tyumen, Russia, April 21-24, 2008*: 271-274. (in Russian)
8. Skachkov, Yu.B. 2005. Anomalous winters and their influence on the ground thermal regime. *Proceedings of the Third Conference of Russian Geocryologists, Moscow, Russia, May 31 – June 3, 2005, vol. 3*: 239–244. (in Russian)

## **Evaluation of the Readiness of a Site for excavation according to GPR Data**

L.L. Fedorova, K.O. Sokolov

Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch Russian Academy of Sciences  
43, Lenin Ave., Yakutsk 677018, Russia, IGDS SB RAS, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

**Abstract.** The paper describes the method of determining the depth of the thawed layer in open pit placer deposits of the permafrost zone. This method allows an effective use of bulldozer equipment in preparation of frozen rock for excavation. In the present study it was found that the boundaries of thawed and frozen soils may be determined according to the time-frequently characteristics of GPR data processed using the wavelet analysis. The technique based on the joint analysis of the 3D wavelet-spectrum and well-drilling data has been developed.

**Keywords:** GPR method; wavelet analysis; open pit mining; placer deposits; permafrost zone.

## **Оценка степени готовности полигона к отработке по данным георадиолокации**

Л. Л. Федорова, К. О. Соколов

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН  
Россия, 677018, г. Якутск, пр. Ленина, д.43, ИГДС СО РАН, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается способ определения глубины оттаявшего слоя на россыпных месторождениях криолитозоны, разрабатываемых открытым способом, для эффективного использования бульдозерной техники при подготовке многолетнемерзлых пород к выемке. В результате проведенных исследований установлено, что определение границы талых и мерзлых грунтов возможно по частотно-временным характеристикам георадиолокационных сигналов. Представлена методика, основанная на комплексном анализе трехмерных вейвлет-спектров георадиолокационных сигналов и данных бурения параметрических скважин.

**Ключевые слова:** георадиолокация; вейвлет-анализ; открытые горные работы; россыпные месторождения; криолитозона.



# Оценка степени готовности полигона к обработке по данным георадиолокации

Л. Л. Федорова, К. О. Соколов

## Введение

Одним из основных технологических процессов открытых горных работ является подготовка горных пород к выемке, от качества выполнения которой зависит производительность работы всего карьера. На сегодняшний день подготовка горных пород к выемке на месторождениях криолитозоны может производиться различными способами, из них наиболее широко применяется оттаивание мерзлых пород под действием естественного тепла (солнечной радиации). Этот способ успешно применяется на карьерах строительных материалов и на угольных разрезах, где в большом объеме присутствуют рыхлые отложения [1]. Для эффективного использования данного метода необходима своевременная и точная информация о глубине слоя протаивания, значение которой зависит от различных факторов (рельефа, физических свойств пород и др.). Информация о глубине залегания границы талых и мерзлых пород может быть получена с помощью геофизических методов. Наиболее оперативным и результативным из них, для решения поставленной задачи, является метод георадиолокации, основанный на способности электромагнитных волн отражаться от границ пород с различными электрофизическими свойствами.

Георадиолокационный метод исследования строения массива горных пород наиболее эффективен при изучении мерзлых пород, характеризующихся малым затуханием электромагнитной энергии. При зондировании сверхширокополосными (СШП) импульсами с поверхности влажных, электропроводящих пород, происходит рассеивание излучения и принимаемый георадиолокационный сигнал становится менее качественным [2] и сигнал, отраженный от границы талых и мерзлых пород, выделяется неоднозначно, вследствие частотно-дисперсионных искажений. Уменьшение их влияния посредством использования более низкочастотных георадаров неэффективно, из-за соответствующего снижения разрешающей способности. Искажения можно также ослабить или убрать с помощью специализированных процедур обработки. Нами предлагается способ обработки георадиолокационных данных на основе анализа локальных особенностей сигналов, что позво-

лит повысить точность георадиолокационных исследований.

## Моделирование распространения СШП-импульсов в мерзлом массиве, перекрытом электропроводящим слоем

Для изучения особенностей влияния структуры исследуемого массива на георадиолокационный сигнал проведено численное моделирование распространения электромагнитной волны (в спектре частот 50..300 МГц) в мерзлом горном массиве с тонким проводящим слоем. Распространение электромагнитной волны в среде, как известно, описывается уравнением:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\varepsilon'}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля (В/м);  $\varepsilon'$  – действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (безразмерная);  $c$  – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве (м/с);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства (Г/м);  $\sigma$  – проводимость (См/м).

Проведена серия расчетов решения этого уравнения с параметрами, соответствующими постепенно оттаивающему в весенне-летний период сезонно-талому слою криолитозоны [3]. Параметры изменялись в следующих пределах: для электропроводящего слоя – диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon'=4-50$ , электропроводимость  $\sigma=10^{-4}-0.12$  См/м; для вмещающей породы  $\varepsilon'=6$ ,  $\sigma=10^{-4}$ .

На рис. 1 представлен типичный пример георадиолокационного сигнала, полученного в результате численного моделирования георадиолокации мерзлых горных пород с электропроводящим слоем ( $\sigma=0.086$  См/м) толщиной от 0.4 м до 0.2 м. При мощности слоя 0.4 м георадиолокационный сигнал состоит из двух импульсов, определяющих верхнюю и нижнюю границы электропроводящего слоя.

Первый импульс расположен на временном отрезке 4-8 нс, второй импульс – 8-12 нс. При уменьшении толщины проводящего слоя до 0.3 м второй импульс частично накладывается на первый, становясь менее различимым, при толщине 0.2 м второй импульс без спе-

циальной обработки выявить нельзя. Таким образом, из результатов численных расчетов следует, что для успешного определения границы талых и подстилающих мерзлых пород метод цифровой обработки сигналов должен предоставлять возможность обнаружения локальных особенностей сигналов.

Особенности спектральных характеристик сигналов, получаемых при зондировании массива, перекрытого электропроводящим слоем, исследованы при физическом моделировании распространения электромагнитной волны в слоистой среде с верхним электропроводящим слоем [4].

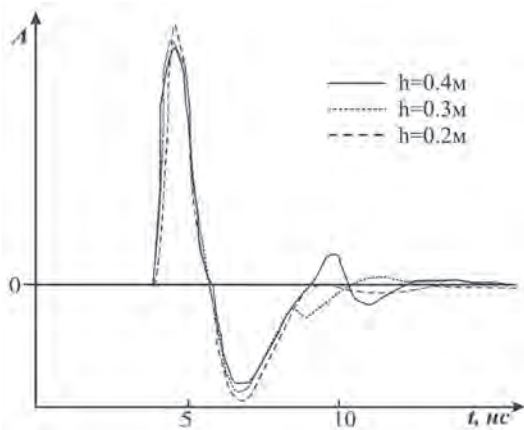


Рис.1. Сигналы, полученные в результате численного моделирования георадиолокации мерзлых горных пород с электропроводящим слоем ( $\sigma=0.086$  См/м) толщиной  $h=0.4-0.2$  м.

В эксперименте использовался георадар с антенным блоком спектра частот 125-650 МГц, разрешающей способностью в свободном пространстве 0.15м. В качестве модели использовалась трехслойная среда: 1 слой - почва, влажность и толщина которой изменялись во время эксперимента ( $h_1=0.15-0.03$  м); 2 слой - мерзлый песок (толщиной 0.3 м); 3 слой - бетонная плита толщиной 0.2 м. Зондирования проводились с поверхности 1-го слоя при различной его влажности, которая менялась от 5 до 50 %.

По результатам физического моделирования установлено, что при георадиолокационных зондированиях мерзлого массива, перекрытого маломощным электропроводящим слоем, происходит эффект маскировки сигналов, отраженных от его нижней границы. Принимаемые георадиолокационные сигналы относятся к нестационарным, т.е. на разных участках сигнала импульсы, соответствующие границам слоев мерзлого горного массива, имеют различные амплитуды частотных сос-

тавляющих вследствие их неравномерного поглощения в горных породах. Это позволяет использовать методы частотно-временного анализа для выявления границы талых и мерзлых пород посредством отслеживания динамики частоты вдоль всего георадиолокационного сигнала. Один из этих методов - непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), которое является частным случаем общего преобразования Фурье и в качестве базисной функции вместо бесконечных синусоидальных гармоник в нем используются ограниченные по времени особые математические функции - вейвлеты, которые можно сдвигать по времени и масштабировать («сжимать» - для анализа высоких частот и «растягивать» - для анализа низких частот), что позволяет получить амплитудно-частотно-временные характеристики сигналов. Для максимальной эффективности обработки георадиолокационных данных необходимо, чтобы форма вейвлета отражала поведение сигнала или его составляющих.

Как показало физическое моделирование, при прохождении электромагнитной волны через тонкий проводящий слой происходит затухание частот, особенно высоких, и искажение формы сигнала в виде увеличения числа гармоник в анализируемом сигнале. Соответственно и базисная функция должна иметь подобные колебания. Этим требованиям отвечает вейвлет «Morlet» (рис.2). Его уравнение:

$$\psi(t, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right) \cos\left(5\left(\frac{t-b}{a}\right)\right) \quad (2)$$

где  $a$ -масштаб вейвлет-функции (аналог частоты в Фурье-анализе),  $b$ -сдвиг вейвлета по времени,  $t$ -длительность георадиолокационного сигнала.

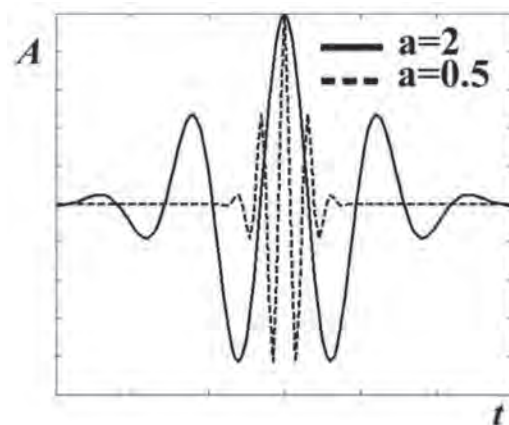


Рис. 2. Вейвлет «Morlet» для анализа данных георадиолокации мерзлых горных пород с электропроводящим слоем (масштабы 0.5 и 2).

Масштаб вейвлета выбирается индивидуально для каждого вейвлета и варьируются в зависимости от георадара, которым производилась съемка, условий конкретного участка и решаемой задачи [4].

### Результаты частотно-временного анализа георадиолокационных сигналов

На рис. 3 представлен пример определения слоистой структуры массива по частотно-временным характеристикам (рис. 3, г) георадиолокационного сигнала (рис. 3.б) в сопоставлении со слоями физической модели (рис. 3, а), тогда, как на Фурье спектре (рис.3, в) особенности слоистой структуры не прослеживаются и фильтрация не достигает положительного результата.

Апробация разработанной методики, обеспечивающей получение достоверной информации о глубине слоя протаивания, проведена на георадиолокационных данных полученных на участке россыпного месторождения ОАО «Алмазы Анабара» сотрудниками лаборатории георадиолокации Института горного дела Севера СО РАН.

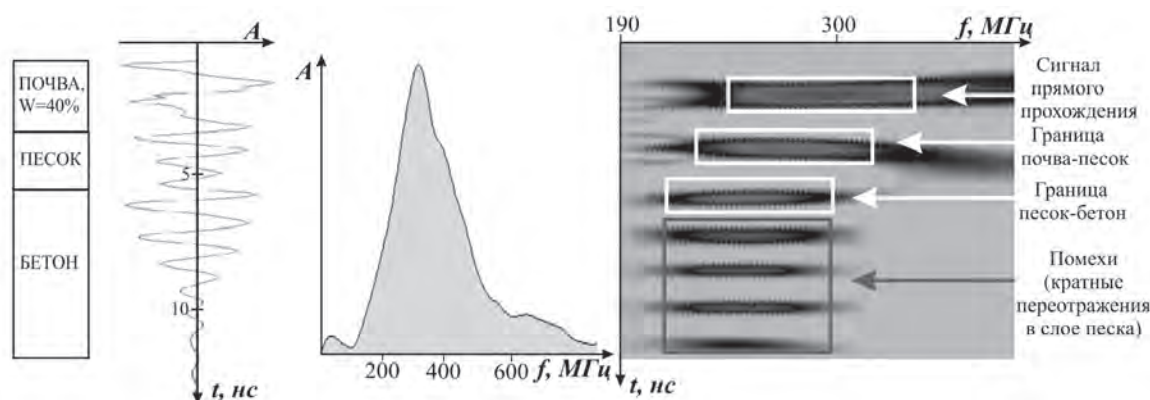


Рис. 3. Пример определения слоистой структуры массива по частотно-временным характеристикам георадиолокационного сигнала: а) физическая модель; б) георадиолокационный сигнал, в) Фурье спектр (а); г) вейвлет-спектр (а).

На рис. 4,а представлен фрагмент верхней части георадиолокационного профиля, полученного в летний период при зондировании георадаром с антенным блоком спектра частот 10-60 МГц. По данным скважинного бурения Ш-6 мощность сезонно-талого слоя (СТС) составляет 0.6 м. На георадиолокационном профиле каждый из сигналов является суперпозицией зондирующего импульса и от-

ражений от границы слоев верхней части разреза, что затрудняет изучение геологической структуры массива. Для выделения полезной информации данные георадиолокационного профиля были обработаны вейвлетом «Morlet» с масштабом  $a=7$ . Результат обработки с использованием вейвлет-преобразования представлен на рис. 4.б.

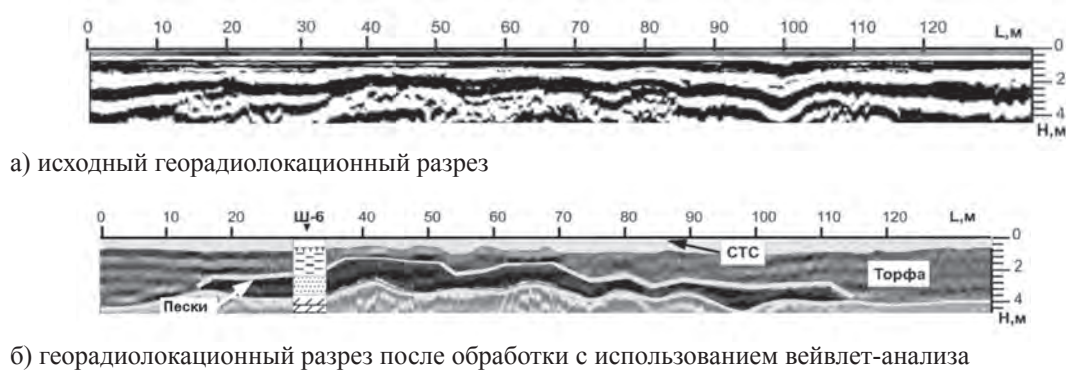


Рис. 4. Результат применения вейвлет-обработки данных георадиолокационного зондирования россыпного месторождения ОАО «Алмазы Анабара».

На разрезе можно четко выделить отражающие границу, которая по данным бурения соответствует СТС - торфа (0.5-0.7 м). На основе этих данных возможно эффективное планирование систематического удаления оттаявшего слоя бульдозерной техникой.

### **Заключение**

В результате проведенных исследований показана возможность эффективного использования разработанной методики обработки георадиолокационных сигналов на основе вейвлет-преобразования для картирования подошвы СТС, что позволяет оценить готовность участка месторождения полезных ископаемых к отработке землеройной техникой.

### **Список литературы**

1. Киприянов, Г. О. Особенности открытых горных работ в условиях многолетней мерзлоты / Г. О. Киприянов. – Якутск : Изд-во Якутского ун-та, 2003. – 78 с.
2. Мачерет, Ю. Я. Радиозондирование ледников / Ю. Я. Мачерет. – М. : Научный мир, 2006. – 392 с.
3. Федорова, Л. Л. Особенности обработки георадиолокационных данных при исследовании

структуры геологических разрезов россыпных месторождений / Л. Л. Федорова, К. О. Соколов // Горный информ.-аналит.бюллетень. – 2009. – Отд. вып. 4. Дальний Восток-1. – С. 99–106.

4. Соколов, К. О. Технология обработки данных георадиолокации россыпных месторождений криолитозоны / К. О. Соколов, Л. Л. Федорова, А. В. Омеляненко // Фундаментальные и прикладные проблемы науки : труды I Международного симпозиума. – М. : РАН, 2010. – Т. 2. – С. 44–83.

### **References**

1. Kipriyanov G.O. 2003. Open pit mining features in conditions of the permafrost zone. Yakutsk: Yakut State University Press, 78 pp. (in Russian)
2. Macheret Yu. Ya. 2006. Radio-echo sounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 392 pp. (in Russian)
3. Fedorova L.L., Sokolov K.O. GPR data processing features on research of placer deposit geologic profile. Moscow: Gornaya Kniga. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal) (8): 99-106 (in Russian) Sokolov K.O., Fedorova L.L., Omelyanenko A.V. Technology of processing of the GPR data of placer deposits. Moscow. RAN. Pure and applied science (2): 74-83 (in Russian)



## Urbansalinity in Yakutsk

V.N. Makarov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: Makarov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Test holes were drilled and soil samples were taken to depths of 24 m for chemical analysis to determine the distribution of saline soils in the city of Yakutsk. Salt concentrations in the perennially frozen alluvium of the low terraces not affected by anthropogenic influences were found to be uniform and range from 0.012 to 0.019%, averaging 0.015%. In the areas affected by urban development, the content of readily soluble salts varies widely, from 0, n – 0.0n% to 2-3%. As salinity increases, the chemical composition of the soils changes from bicarbonate to sulfate-chloride type, with an attendant increase in alkalinity. Saline soils are common in the urban area, but in contrast to natural salinity, they are localized and strongly correlated to anthropogenic impact duration. On average, anthropogenic salinity extends to a depth of 6 m, but may be as deep as 9.0 to 10.0 m in thawed or refrozen zones beneath lakes. Atmospheric deposition of salts is estimated to range from 60-70 t/km<sup>2</sup> yr. Anthropogenic salinity is shown to result from both downward and upward chemical flows.

**Keywords:** salinity; soils; permafrost active layer; urban environment; human impact.

## Засоленность грунтов на территории города Якутска

В. Н. Макаров

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН,  
e-mail: Makarov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Проведено бурение скважин на территории города Якутска. Проанализирован химический состав грунтов до глубины 24 м. Анализируется распространение засоленных грунтов на территории города. Установлено, что концентрация солей в многолетнемерзлых кайнозойских аллювиальных отложениях надпойменных террас, не затронутых антропогенным воздействием, однородна и изменяется в пределах одного порядка – 0,012-0,019 %, в среднем - 0,015 %. Содержание легкорастворимых солей в грунтах зон техногенного воздействия колеблется в широких пределах: от 0, n - 0,0n % до 2-3%. По мере увеличения солености изменяется химический состав грунтов от гидрокарбонатных до сульфатно-хлоридных, одновременно с повышением их щелочности. Засоленные грунты широко распространены на территории города, но, в отличие от природного, не имеют площадного распространения и аномалии солености четко увязываются с продолжительностью антропогенного воздействия. В среднем глубина распространения засоленных грунтов составляет около 6 м, но в местах существующих или промерзших таликов под озерами засоление достигает глубины 9,0 - 10,0 м. Дана оценка поступления солей из атмосферы, которая изменяется в пределах 60-70 т/км<sup>2</sup> год. Показано, что техногенное засоление формируется как за счет нисходящих, так и за счет восходящих токов вещества.

**Ключевые слова:** соленость; грунты; сезонноталый слой; город; техногенез.

# Засоленность грунтов на территории города Якутска

В. Н. Макаров

## Введение

С засоленными мерзлыми породами связан целый ряд инженерно-геологических проблем, особенно важных при промышленном и гражданском строительстве в районах криолитозоны. Засоленные мерзлые дисперсные породы отличаются особыми инженерно-геологическими свойствами, низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям.

Засоленность грунта - отношение массы легкорастворимых солей, содержащихся в единице объема, к плотности сухого грунта в мерзлом состоянии. Засоленность мерзлых грунтов оказывает решающее влияние на их механические свойства. При увеличении солености интенсивно снижается эквивалентное сцепление и при засоленности суглинков свыше 1,5% смерзание грунта с фундаментом практически отсутствует (Аксенов, Докучаев, 1978). Засоленные грунты имеют низкую прочность, которая быстро уменьшается с увеличением времени действия нагрузки - в 10 и более раз [1].

По данным П.И. Панченко и В.И. Аксенова [2, 3] обусловленное засоленностью снижение прочности смерзания мерзлого суглинка происходит уже при засоленности 0,05 - 0,1%, т.е. в том интервале засоленности, где этот грунт считается не засоленным.

По мнению А.В. Брушкова [1] засоленными являются мерзлые породы, содержащие в поровом растворе легкорастворимые соли в количестве, составляющем более 0,05% по весу в отношении к сухой породе.

Классификация грунтов по степени засоленности, учитывающая выше перечисленные мнения и объединяющая различные формации грунта приведена в табл. 1.

Согласно табл. 1, грунт считается не засоленным, если его минерализация составляет менее 0,05%. К слабозасоленным относятся грунты с минерализацией от 0,05 до 0,1%, и сильнозасоленным - грунты с минерализацией более 0,2%.

Данная классификация является наиболее приемлемой для территории города, не учитывающая сложную пестроту распространения различных литологических типов грунтов, но позволяющая выявлять участки общей засоленности грунтов.

Таблица 1. Степень засоленности грунта

Соленость, %	Степень засоленности
Менее 0,05	Не засоленный
0,05-0,1	Среднезасоленный
0,1-0,2	Слабозасоленный
Более 0,2	Сильнозасоленный

## Методы исследования

Для изучения солености грунтов сезонноталого слоя и многолетнемерзлых отложениях на территории г. Якутска были пробурены скважины глубиной до 10-25 м в селитебных и промышленных зонах города. Скважины располагались на ровной поверхности, на удалении от современных локальных источников загрязнения бытовыми отходами. Проходка скважин осуществлялась без промывки, с полным отбором керна.

Химические анализы грунтов выполнены в лаборатории геохимии ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю.Бойцова, Р.М.Петухова и О.В.Шепелева).

## Результаты и обсуждение

Геодинамическая и геохимическая устойчивость толщи нелитифицированных осадков, различающих своими химическими и минеральными составами, строением, физико-механическими свойствами и особенностями миграции химических элементов в них, определяются в основном наличием многолетнемерзлых пород (криолитозонной), мощность которых варьируется от 0,0 до 470 м. По данным ИМЗ СО РАН (2009-2010 гг.) температура мерзлых грунтов на глубине 20 м колеблется в пределах минус 2,0-6,6°C.

Концентрация солей в многолетнемерзлых кайнозойских аллювиальных отложениях надпойменных террас, не затронутых антропогенным воздействием, однородна и изменяется в пределах одного порядка - 0,012-0,019%, в среднем - 0,015%. Химический состав гидрокарбонатный с преобладанием кальция среди катионов [4]. Засоление многолетнемерзлых пород и грунтов сезонно-талого слоя (СТС) обусловлено климатическими и техногенными факторами.

Почвенный покров (почво-грунты) является одним из депонентов веществ-загрязнителей. Первоначальный химический состав почв зависит от состава материнских

пород и развития почвообразовательных процессов. Городские почво-грунты Якутска вблизи поверхности (0,10 – 0,20 м) представлены преимущественно песками и супесями, очень пестрыми по химическому составу. Уровень накопления химических элементов в почвах связан с их концентрацией в выпадениях и стоках, объемами и продолжительностью поступлений. Современный объем поступления из атмосферы составляет около 70 г/м<sup>2</sup>·год (2008 г.). Причем основной объем выпадений – 67% приходится на карбонаты, а на долю хлоридных и сульфатных солей приходится всего около 16% [5]. С тальми водами соли частично удаляются поверхностным стоком, а частично просачиваются в почву. В процессе техногенного воздействия на почвенный покров произошли существенные изменения в химическом составе грунтов. Наиболее высокая интенсивность засоления почвы и грунтов деятельного слоя характерна для сульфатов и уменьшается в ряду:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ . В различных районах города в почво-грунтах могут преобладать хлоридные, сульфатные или карбонатные соли. Степень засоленности почво-грунтов колеблется в широком диапазоне: от незасоленных (0,021%) до сильно засоленных (3,24%), преимущественно в старой части города.

На большей части территории города вблизи поверхности (0,10 – 0,20 м) распространены незасоленные и слабозасоленные почво-грунты (табл. 2).

Таблица 2. Распространение засоленных

Соленость, %	%
Менее 0,1	69
0,1 - 0,2	19
0,2 - 0,5	7
0,5 - 1,0	4
Более 1,0	1

Засоление почв в городе (в отличие от природного) не имеет площадного распространения. На территории города возникли крупные литохимические аномалии, в пределах которых засоление грунтов превышает 1%/100 г.

Для большинства аномалий характерно преобладание хлоридного и сульфатного засоления грунтов с концентрацией  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  более 10-20 мг-экв.

Геохимический мониторинг территории Якутска позволил установить качественные и количественные показатели повышения засоленности грунтов на территории города, главным образом, за счет хлоридных и суль-

фатных солей. Быстрыми темпами происходит и возрастание щелочности грунтов [6].

Наибольшее количество солей приходится на районы «старой» жилой застройки. В зависимости от продолжительности и характера антропогенного воздействия на территории города наблюдается изменение солености грунтов сезонно-талого слоя. Как и на поверхности, соленость грунтов СТС на глубине 1 м на большей части территории города менее 0,2%/100 г. Максимальная концентрация солей и наибольшая глубинность распространения засоленных грунтов отмечены в старой части города, где продолжительность антропогенного воздействия составляет от 150 – 200 до 300 лет (рис. 1). Минимальная соленость грунтов наблюдается в новых районах города с длительностью техногенеза менее 80 лет.



Рис 1. Глубина распространения засоленных грунтов на территории г. Якутска, м.

Засоленные грунты широко распространены на территории города, но, в отличие от природного, не имеют площадного распространения и аномалии солености четко увязываются с продолжительностью антропогенного воздействия. В среднем глубина распространения засоленных грунтов составляет около 6 м (рис. 2), но в местах существующих или промерзших таликов под озерами засоление достигает глубины 9,0-10,0 м.

Характерным для Якутска является высокий темп интенсификация фильтрационно-миграционных процессов, следствием которых является глубинное засоление вечномерзлых грунтов и их переход в пластично-мерзлое и талое состояние. Формируются криопэги и на отдельных участках города минерализация надмерзлотных и межмерзлотных вод увеличивается до 50-100 г/л. Температура за-

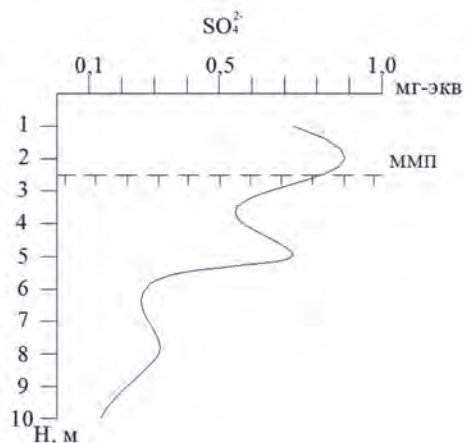


Рис 2. Характер сульфатного засоления грунтов СТС и многолетнемерзлых пород

мерзания грунтов, содержащих воды с такой минерализацией достигает минус 3-5°C, что приводит к возникновению отрицательно-температурных талых грунтов на которых невозможно строительство по 1-му принципу.

### Заключение

При техногенном засолении грунтов Якутска источник солей расположен как над поверхностью почв, так и в надмерзлотных и межмерзлотных водах - криопэгах. Другими словами, техногенное засоление формируется как за счет нисходящих, так и за счет восходящих токов

Недостаток сведений о динамике мерзлотных, геологических и геохимических условий на территории города привел к возникновению ряда острых градостроительных проблем. Основная причина градостроительных проблем – изменение геологических условий, интенсивное засоление грунтов, агрессивность грунтовых вод, повышение уровня и минерализации надмерзлотных вод, широкое формирование криопэгов. Большинство аварийных объектов – около 70%, находится в пределах старой городской территории, существовавшей к началу XX века, где продолжительность антропогенного воздействия достигает 150–200, а местами и 300 лет и для которой характерна максимальная концентрация солей и наибольшая глубина распространения засоленных грунтов. Природно-техногенные геологические и геохимические процессы и явления наносят прямой и косвенный ущерб городскому хозяйству, создают экологические проблемы. Угрожают устойчивости сооружений, вызывают аварии и разрушения жилых зданий, промышленных площадок и транспортных магистралей, служат причиной чрезвычайных ситуаций.

### Список литературы

1. Брушков, А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства / А. В. Брушков. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 332 с.
2. Аксенов, В. И. Критерии пластично-мерзлого состояния засоленных грунтов // Основания и фундаменты жилых и общественных зданий на вечномерзлых грунтах / В. И. Аксенов, В. В. Докучаев. – Л.: ЛенЗНИИЭП, 1978. – С. 13–18.
3. Панченко, В. И. Физико-химический подход к классификации мерзлых грунтов по засоленности / В. И. Панченко, В. И. Аксенов // Засоленные мерзлые породы как основания сооружений. – М.: Наука, 1990. – С. 70–73.
4. Макаров, В. Н. Геохимический атлас Якутска / В. Н. Макаров. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. – 65 с.
5. Макаров, В. Н. Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии / В. Н. Макаров. – Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2007. – 88 с.
6. Makarov, V. N. Active Layer Modification and Its Effect on the Infrastructure of Yakutsk Permafrost Engineering, Fifth International Symposium / V. N. Makarov // Proceedings (Yakutsk, Russia, 2-4 September 2002). – Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 2002. – Vol. 2. – P. 173–178.

### References

1. Brushkov, A. V. 1998. *Saline Frozen Sediments along the Arctic Coasts, Their Origin and Properties*. Moscow: Moscow State University Press, 332 pp. (in Russian)
2. Aksenov, V. I., and Dokuchaev, V. V. 1978. Criteria for Plastic Frozen State of Saline Soils. In: *Foundations of Residential and Public Buildings in Permafrost*. Leningrad: LenZNIIEP, 13-18. (in Russian)
3. Panchenko, V. I., and Aksenov, V. I. 1990. Physico-chemical approach to salinity classification of frozen soils. In: *Saline Frozen Soils as Foundation Materials*. Moscow: Nauka, 70-73. (in Russian)
4. Makarov, V. N. 1985. *Geochemical Atlas of Yakutsk*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 65 pp. (in Russian)
5. Makarov, V. N. 2007. *Geochemical Monitoring of Precipitation in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 88 pp. (in Russian)
6. Makarov, V. N. 2002. Active layer modification and its effect on the infrastructure of Yakutsk. In: R. M. Kamensky (ed.). *Permafrost Engineering, Proceedings of the Fifth International Symposium, 2-4 September 2002, Yakutsk, Russia, vol. 2*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS Press, 173-178.



## Ecological assessment of minor element concentrations in lake sediments in the City of Yakutsk

A. L. Chizhuk

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: chizuk82@mail.ru

**Abstract.** Lake sediments provide information on climatic and geochemical conditions that is useful in assessing the ecological state of the air and water environments. Many contaminants are accumulated in the lake sediments. Besides being indicators of water quality, they can be sources of secondary contamination.

**Keywords:** lake sediments; chemical composition; contamination; salinity.

## Экологическая оценка содержания микроэлементов в донных отложениях озер г. Якутска

А.Л. Чижук

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, chizuk82@mail.ru

**Аннотация.** Донные отложения озер являются важным источником информации о климатических, геохимических и других условиях и позволяют оценить современное экологическое состояние воздушной и водной сред. Многие загрязняющие вещества депонируются донными отложениями и поэтому могут рассматриваться, не только как показатели качества воды, но и как источник вторичного загрязнения.

**Ключевые слова:** донные отложения; химический состав; загрязнение; соленость.

## Экологическая оценка содержания микроэлементов в донных отложениях озер г. Якутска

А. Л. Чижук

При изменении физико-химических условий (рН, Eh, температуры, состава газов) соединения, связанные с донными отложениями могут растворяться, поступать в воду и далее в пищевую цепь. При этом некоторые относительно инертные или безвредные для окружающей среды неорганические вещества могут преобразоваться в растворимые и токсичные формы (например, переход элементарной ртути в метилртуть [Wongatal, 1975]).

Автором поведена оценка геоэкологического состояния озер г. Якутска и интенсивности их загрязнения на основе изучения содержания микроэлементов в донных отложениях (ДО). Были исследованы ДО как крупных (Белое, Сайсар, Сергеляхское, Ытык-Кюель и др.), так и небольших озер. Пробы ДО отбирались в зонах аккумуляции, где создаются условия седиментации мелкодисперсного материала с хорошими сорбционными способностями, из слоя 0-15 см. Концентрация микроэлементов в ДО определялась методами атомно-абсорбционной спектроскопии и приближенно-количественного спектрального анализа. Методика опробования, обработки проб и анализа по [Поликарпочкин, 1976]. Общее количество отобранных ДО - 171 проба.

Для ДО озер характерен значительный диапазон солености, которая изменяется в пределах 0,011- 2,162%. Наибольшее засоление ДО наблюдается в сильно загрязненных озерах (Даркылахское, Жорницкого и др.). На территории города большинство озер с повышенной соленостью ДО (>0,15%) приурочено к 1 надпойменной террасе, где расположены районы с высокой плотностью городской застройки.

Повышение солености ДО озер города, обусловленное как климатическими, так и техногенными причинами, определяется, в первую очередь, возрастанием концентрации ионов хлора, натрия и магния, между которыми наблюдается высокая значимость корреляционных связей. В тоже время повышение солености ДО не сопровождается одновременным возрастанием концентрации микроэлементов.

Содержание большинства микроэлементов в ДО озер г. Якутска значительно ниже кларковых содержаний в осадочных породах

(КОП). В то же время, концентрация группы преимущественно халькофильных элементов (As, W, Ag, Pb, Mo, B, Sn, Zn, а возможно Bi, Cd и Sb) значительно превосходит КОП. Дефицитным в ДО является комплекс халько- и литофильных элементов, концентрация которых заметно ниже кларковых: V, Ni, B, Li, Co, Ga, Nb, Sn, Cr, Cu, Ge, Y, Hg. Категория инертных элементов, концентрация которых в ДО соответствует уровню кларковых (КОП), состоит из комплекса литофильных породообразующих - Ti, Mn, P и La.

Донные отложения являются активными накопителями загрязняющих веществ. Максимальное концентрирование в ДО городских озер, по сравнению с содержанием в почвах города, отмечается у группы халькофильных элементов – Cd, Sn, Ag, Cu.

Для большинства этих элементов преобладает нахождение в твердой фазе донных отложений [Поликарпочкин, 1976].

Содержание большинства химических элементов в донных отложениях и почвах находятся примерно на одном уровне, что предполагает их перенос с водосбора в акваторию озер в твердой фазе в виде первичных и вторичных минералов.

В период исследований (с 1998 по 2009 гг.) отмечалась четкая тенденция повышения концентрации микроэлементов в ДО, особенно интенсивная для Cd, Ag, W, Sn, концентрация которых возросла в 8-19 раз. Вдвое увеличилась концентрация таких токсичных элементов как Pb, Cu и Zn (табл. 1; рис. 1).

Таблица 1. Увеличение концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер г. Якутска, мг/кг (1998-2009 гг.)

Микроэлементы	1998	2003	2009
Cu	н.д.	16	<b>35</b>
Zn	н.д.	65	<b>133</b>
Ag	0,09	0,1	0,24
Cd	3,5	н.д.	<b>66</b>
Sn	0,55	2,4	4,2
W	н.д.	1	8
Pb	н.д.	18	<b>41</b>
Hg	н.д.	н.д.	56,4

Примечание: н.д. – нет данных; жирным шрифтом выделены концентрации >ПДК

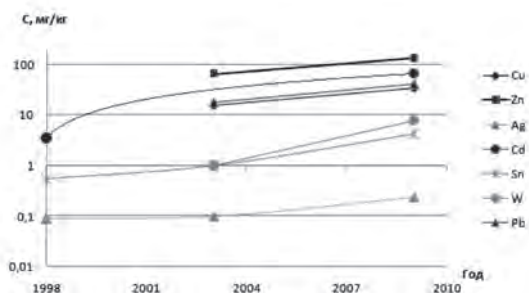
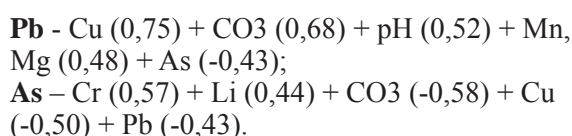


Рис. 1. Динамика изменения концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер г. Якутска (1998-2009 гг.)

Эколого-геохимическая оценка ДО выполнена, с определенной долей условности, путем сравнения с уровнем предельно допустимых концентраций для почв – ПДК, так как санитарные нормы для ДО не разработаны. Степень концентрирования химических элементов (средние и максимальные концентрации) в донных отложениях городских озер по сравнению с санитарными нормами для почв (Перечень..., 1993).

Наибольшее экологическое неблагополучие отмечается по группе халькофильных элементов. Характерно, что содержание этих элементов в ДО городских озер является избыточным не только по отношению к санитарным нормам, но и к кларку земной коры (см. табл. 1).

Характер корреляционных связей наиболее токсичных элементов (свинца и мышьяка), распространенных в ДО озер, иллюстрируется следующими рядами (в скобках значения коэффициента корреляции):



Значимые положительные корреляционные связи свинца наблюдаются с медью, карбонатным ионом и величиной pH, а отрицательные – с мышьяком. Основным источником поступления свинца в озерные системы города служат выбросы автотранспорта (Макаров, 2002). Самые распространенные соединения свинца в природных условиях – это Pb<sup>2+</sup>. Наименее растворимыми среди них и, следовательно, контролирующими концентрацию свинца, являются карбонат PbCO<sub>3</sub> и гидроксид Pb(OH)<sub>2</sub>. Адсорбция ионов Pb<sup>2+</sup>

донными отложениями возрастает с ростом pH и наиболее высока в щелочной среде. Это объясняет приуроченность максимальных концентраций свинца к донным отложениям с преимущественно карбонатной щелочной средой, которые являются геохимическим барьером для этого элемента.

Неорганические соединения свинца (II) в донных отложениях городских водоёмов способны подвергаться метилированию с участием микроорганизмов, образуя соединения типа Me<sub>3</sub>Pb<sup>+</sup> и Me<sub>4</sub>Pb [Wongatal, 1975]. Мобилизация свинца из донных отложений в ходе процессов метилирования представляет серьезную опасность для водной биоты.

Для мышьяка характерны устойчивые отрицательные корреляционные связи с компонентами, взаимосвязанными со свинцом и положительная корреляция с литофильными элементами - хромом и литием. Отсутствие связей мышьяка с компонентами минерализации водной фазы и тесная зависимость с хромом и литием свидетельствуют в пользу того, что основной источник поступления этого элемента в донные отложения городских озер - механический снос с территории водосбора.

Таблица 2. Степень загрязнения донных отложений городских озер по величине суммарного показателя загрязнения (Z<sub>c</sub>)

Категория загрязнения	1. Величина 2. Z <sub>c</sub>	3. Адрес
4. Допустимая	< 16	Большинство озер
5. Умеренная	16-32	Теплое (Дежнева)
		Ытык-Кюель (Борисовка)
6. Опасная	32-128	Теплое (ЯГУ)
		Талое, Хомустах
Чрезвычайно опасная	> 128	Районы городской свалки и объездного шоссе

Оценка степени загрязнения ДО озер показала, что в большинстве озер города степень их загрязнения оценивается как допустимая и умеренная (табл. 2). В некоторых озерах загрязнение достигает опасной и даже чрезвычайно опасной степени.

**Выводы.** Большинство озер с повышенной соленостью находится в пределах 1 надпойменной террасы р. Лена, в «старых» районах города с высокой плотностью застройки.

Донные отложения активно накапливают компоненты-загрязнители – Pb, Cu, Zn, Cd, Sn,

Ag, Cu, W концентрация которых в последнее десятилетие значительно выросла.

Степень загрязнения большинства донных отложений озер города загрязнения оценивается как допустимая и умеренная. В некоторых озерах загрязнение достигает опасной и даже чрезвычайно опасной степени.

#### Список литературы

1. Виноградов, А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры / А. П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555-571.

2. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М. : Мин. охраны окружающей среды РФ, 1992. – 48 с.3. Макаров, В.Н. Свинец в биосфере Якутии / В. Н. Макаров. – Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. – 113 с.

4. Перечень ПДК и ОДК химических веществ в почвах. – М., 1993.

5. Поликарпочкин, В.В. Вторичные ореолы и потоки рассеяния / В. В. Поликарпочкин. – Новосибирск : Наука, 1976. – 407 с.

#### References

1. Vinogradov, A.P. 1962. Average abundances of chemical elements in igneous rocks of the Earth crust. *J. Geokhimia* 7: 555-571. (in Russian)

2. RF Ministry of Environmental Protection. 1992. *Environmental Assessment Criteria for Defining Ecological Emergency Zones and Ecological Disaster Zones*. Moscow: RF Ministry of Environmental Protection, 48 pp. (in Russian)

3. Makarov, V.N. 2002. *Lead in the Biosphere of Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 113 pp. (in Russian)

4. RF Committee on Sanitary and Epidemiological Control. 1993. *The List of Maximum Admissible Concentrations and Relatively Admissible Concentrations of Chemical Elements in Soils*. Moscow. (in Russian)

5. Polikarpochkin, V.V. 1976. *Secondary Dispersion Halos and Flows*. Novosibirsk, Nauka, 407 pp. (in Russian)

6. Wong P.T.S., Chau Y.K., Luxon P.L. Methylation of lead in the environment. - *Nature*, 1975, 253, N 5489, p. 263.



## Geochemical characterization of urban soils in Neryungri

V.N. Makarov, N.V. Torgovkin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: Makarov@mpi.ysn.ru

**Abstract.** Soil sampling was conducted in the residential and industrial areas of the city of Neryungri for chemical testing. Samples were analyzed for a wide array of chemical elements. The main chemical parameters of the atmospheric air and soils harmful to building materials and structures were examined. The soils occurring in the Neryungri area were reassessed for aggressiveness on concrete (the levels of acids, soil pH; carbon dioxide, magnesium, sulphate, chloride), corrosion potential on metal structures, and soil salinity. The results have shown that the surface air meets the Russian Building Code standards for aggressive gases. The urban soils are aggressive in terms of bicarbonate alkalinity and locally they have acidic aggressiveness on common and sulfate-resistant pozzolan cement, as well as on slag Portland cement. The magnesium and chloride levels are low. In general, the chemical composition of the atmosphere and soils in Neryungri are favorable for construction.

**Keywords:** soils; atmosphere; salinity; aggressiveness; construction materials.

## Инженерно-геохимическая характеристика грунтов г. Нерюнгри

В. Н. Макаров, Н. В. Торговкин

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: makarov@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Проведено литохимическое опробование в жилитебной и промышленной зонах г. Нерюнгри. Грунты проанализированы на широкий круг химический элементов. Проведена оценка основных показателей химического состава атмосферного воздуха и грунтов определяющие их агрессивное воздействие на строительные материалы и конструкции. Выполнена инженерно-геохимическая характеристика грунтов распространенных на территории г. Нерюнгри по следующим направлениям: оценка агрессивности (выщелачивающей, общекислотной, углекислотной, магнизиальной, сульфатной, хлоридной) по отношению к бетону; оценка агрессивного воздействия сред на металлические конструкции; засоленность грунтов. Установлено, что концентрация агрессивных газов в приземной атмосфере Нерюнгри не превышает допустимых пределов, предусмотренных строительными нормами. Определено, что грунты города агрессивны в отношении гидрокарбонатной щелочности и на отдельных участках, обладают общекислотной агрессивностью для обычных и сульфатостойких пуццолановых и шлаковых портланд-цементов. Грунты не агрессивны по нормам магнизиальной и хлоридной агрессивностью по отношению к цементу. В целом по химическому составу атмосферы и грунтов территория Нерюнгри благоприятна для строительства.

**Ключевые слова:** грунты; атмосфера; соленость; агрессивность; строительные материалы.

# Инженерно-геохимическая характеристика грунтов г. Нерюнгри

В. Н. Макаров, Н. В. Торговкин

## Введение

Город Нерюнгри (62,3 тыс. жителей на 01.01.2009 г.) раскинулся на правом берегу реки Чульман. Город пространственно разделен на селитебную зону - собственно г. Нерюнгри и промышленный узел (угольный разрез «Нерюнгринский», обогатительная фабрика, завод по ремонту горного оборудования и другие вспомогательные предприятия) - пос. Пионерный, расположенный на левом берегу реки. Разрез «Нерюнгринский» - одно из крупнейших угледобывающих предприятий в России. В геологическом отношении г. Нерюнгри расположен в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья, в пределах Чульманской впадины, выполненной угленосными осадочными породами юры и нижнего мела. В Южной части Чульманского плато (в бассейне среднего течения р. Чульман) на отложениях горкитской свиты согласно залегают отложения холодниканской свиты нижнего мела (песчаники с прослоями и линзами конгломератов, алевролиты, каменный уголь), выполняющие ядро крупной Нерюнгринской синклинали с интенсивными разрывными дислокациями. Особый отпечаток на геологическое строение и криолитозону района оказывает тектонический фактор. Территория города занимает вершину и пологий склон водораздела рек Чульман и Беркамит с высотными отметками рельефа около 800 м. Такие поверхности имеют мягкие мерзлотные условия с широким развитием островной мерзлоты небольшой мощности (20-50 м) и среднегодовой температурой пород близкой к 0 °С. В ходе строительства и эксплуатации зданий естественный температурный режим мерзлого грунтового основания на территории Нерюнгри был нарушен. В результате сочетания теплового воздействия техногенных и природных факторов на некоторых участках городской застройки под домами произошла полная деградация мерзлоты. Преобладают горные мерзлотно-таёжные, подзолистые, сильно щепенистые, каменистые почвы. В понижениях рельефа формируются полуболотные и мерзлотно-болотные почвы, а также каменистые россыпи. На кембрийских известняках развиты мерзлотно-таёжные дерново-карбонатные почвы. В фоновых

районах Южной Якутии с атмосферными осадками на 1 км<sup>2</sup> ежегодно вносится около 0,40-0,50 т растворенных веществ, в основном карбонатов натрия и кальция. В селитебной и промышленной зоне Пионерного и Нерюнгри атмосферное поступление в среднем составляет 21,1 т/км<sup>2</sup> а в пределах угольного разреза достигает 500 т/км<sup>2</sup>, преимущественно карбонаты кальция [1]. В Нерюнгри отмечается очень высокий уровень загрязнения атмосферы, связанный со значительными концентрациями формальдегида, бенз(а)пирена, диоксида азота и взвешенных веществ. Рассмотрим основные показатели химического состава атмосферного воздуха и грунтов определяющие их агрессивное воздействие на строительные материалы и конструкции.

1. *Агрессивность газов в приземной атмосфере.* В соответствии с нормами и техническими условиями СНиП 2.03.11-85 Строительные нормы и правила. Защита строительных конструкций от коррозии [2], соли, аэрозоли и пыли, присутствующие в атмосфере, подразделяются по гигроскопичности (табл. 1), характеру их растворимости в воде.

Таблица 1. Характеристика твердых сред: солей, аэрозолей и пыли [2]

Растворимость твердых сред в воде, гигроскопичность	Наиболее распространенные соли, аэрозоли, пыли
Малорастворимые	Силикаты, фосфаты и карбонаты Mg, Ca, Ba, Pb; сульфаты Ba, Pb; оксиды и гидроксиды Fe, Cr, Al и Si
Хорошо растворимые малогигроскопичные	Хлориды, сульфаты Na, K, NH <sub>4</sub> ; нитраты K, Ba, Pb, Mg; карбонаты щелочных металлов
Хорошо растворимые гигроскопичные	Хлориды Ca, Mg, Al, Zn, Fe; сульфаты Mg, Mn, Zn, Fe; нитраты и нитриты Na, K, NH <sub>4</sub> ; все первичные фосфаты; оксиды и гидроксиды Na и K

Основная масса солей, аэрозолей и пыли в Нерюнгри представлена карбонатами, сульфатами и соединениями азота: от малорастворимых в воде (карбонатов), хорошо растворимых малогигроскопичных (хлоридов, сульфатов

натрия, калия, аммония; карбонатов щелочных металлов) до хорошо растворимых гигроскопичных (хлоридов кальция, магния, алюминия, цинка, железа; сульфатов магния, марганца, цинка, железа; нитратов и нитритов натрия, калия, аммония). Согласно [2] в зависимости от вида и концентрации выделяются следующие группы агрессивных газов (табл. 2).

По официальной информации [3] о присутствии в приземной атмосфере Нерюнгри агрессивных газов: оксидов азота и серы, аммония и сероводорода, их концентрация не превышает допустимых пределов предусмотренных СНиП 2.03.11-85 и, следовательно, газовый состав приземной атмосферы на большей части Нерюнгри не обладает агрессивными свойствами. Исключение представляют высокие концентрации оксидов азота в промышленной зоне и некоторых участках селитебной территории.

Таблица 2. Группы агрессивных газов в зависимости от их вида и концентрации, мг/м<sup>3</sup>

Газы	Бетон				Концентрация в атмосфере Нерюнгри
	A	B	C	D	
CO <sub>2</sub>	> 2000	>2000	-	-	-
NH <sub>3</sub>	> 0,2	0,2-20	20	-	0,065
SO <sub>2</sub>	> 0,5	0,5-10	10-100	200-1000	0,006
HF	> 0,05	0,05-5	5-10	10-100	-
H <sub>2</sub> S	> 0,01	0,01-5	5-100	>100	<0,01
NO <sub>x</sub>	> 0,1	0,1-5	5-25	25-100	0,093
Cl <sub>2</sub>	> 0,1	0,1-1	1-5	5-10	<0,1
HCl	> 0,05	0,05-5	5-10	10-100	<0,05

2. Инженерно-геохимическая характеристика грунтов распространенных на территории г. Нерюнгри выполнена по следующим направлениям:

1) Оценка агрессивности (выщелачивающей, общекислотной, углекислотной, магнизальной, сульфатной, хлоридной) по отношению к бетону;

2) Оценка агрессивного воздействия сред на металлические конструкции;

3) Засоленность грунтов.

2.1. Агрессивность грунтов по отношению к бетону. Оценка качества грунтов по отношению к бетону произведена по нормам и техническим условиям [2], которые применяются: а) для определения по результатам хи-

мического анализа агрессивности воды-среды по отношению к бетону I, II, III и IV классов капитальности, приготовленному на портланд-цементе, пуццолановом, песчано-пуццолановом или шлаковом портланд-цементе (обычных и сульфатостойких их видах), имеющих марку по водопроницаемости не ниже В-4; б) для выбора цемента, обеспечивающего водостойкость бетона в данной воде-среде; в) для установления необходимости повышения водостойкости бетонной конструкции специальными мероприятиями при агрессивности воды-среды.

2.1.1. Выщелачивающая агрессивность. Агрессивность выщелачивания происходит за счет растворения карбоната кальция и вымывания из бетона гидрата окиси кальция. Принятые нормы выщелачивающей агрессивности воды-среды [2] представлены в таблице 3.

Таблица 3. Нормы выщелачивания агрессивности воды-среды

Условия омыwania бетона водой (окружающая среда)	Наименьший попеременный размер (толщина) конструкции, м	Безнапорные сооружения	Обычные и сульфатостойкие пуццолановые и шлаковые портланд-цементы
Грунт с K <sub>ф</sub> от 10 до 0,1 м/сут	Менее 0,5	6,2	6,4
	0,5 - 2,5	5,2	5,5
	Более 2,5	Не нормируется	Не нормируется

При гидрокарбонатной щелочности в мг-экв ниже приведенных величин вода считается агрессивной. Нормами выщелачивающей агрессивности воды-среды [2] предусмотрено, что при гидрокарбонатной щелочности в мг-экв ниже 0,75 (для безнапорных сооружений, грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сутки) вода считается агрессивной.

Все грунты в интервале глубин до 1,0 м обладают агрессивностью в отношении гидрокарбонатной щелочности (табл. 4).

Таблица 4. Средние показатели изменения гидрокарбонатной щелочности грунтов на территории Нерюнгри, мг-экв.:

Населенный пункт	Мин.	Макс.	Среднее
Пионерный	0,103	0,436	0,236
Нерюнгри	0,095	0,564	0,206

2.1.2. Общекислотная агрессивность связана с содержанием свободных водородных ионов. Свободные и поровые воды будут обладать данным видом агрессии при pH ниже 5 (наихудшие условия).



Показатели изменения кислотности-щелочности грунтов на территории Нерюнгри:

Населенный пункт	Мин.	Макс.	Среднее
Пионерный	4,68	7,0	6,16
Нерюнгри	4,98	7,26	6,0

Нормами ГОСТа по общекислотной агрессивности воды-среды предусмотрено, что при значении рН ниже 6,4 (для безнапорных сооружений, грунт с коэффициентом фильтрации от 10 до 0,1 м/сутки) среда считается агрессивной. Грунты в некоторых районах пос. Пионерный и г. Нерюнгри имеют значение рН ниже интервалов 6,2-6,4 и 5,2-5,5, следовательно, почвенные воды на этих территориях обладают общекислотной агрессивностью для обычных и сульфатостойких пуццолановых и шлаковых портланд-цементов с наименьшим поперечным размером конструкции менее 0,5 м (Центральная часть города – ул. Чурапчинская, Южно-Якутская). При наименьшей толщине конструкции выше 0,5 м почвенные воды неагрессивны.

2.1.3. *Магнезиальный вид агрессии* возникает при высоких содержаниях иона магния, предельно допустимое количество, которого колеблется в зависимости от сортов цемента, условий, конструкции сооружения и содержания  $SO_4^{2-}$ . Нормами ГОСТа [2] магнезиальная агрессивность воды-среды устанавливается при содержании  $Mg^{2+}$  в мг/л не менее 1000 мг/л и больше величины, определяемой по формуле  $K-SO_4^{2-}$  мг/л, вода считается агрессивной, а при содержании  $Mg^{2+}$  менее 1000 мг/л, независимо от содержания  $SO_4^{2-}$ , вода считается магнезиально неагрессивной. По данным, приведенным в табл. 5 грунты являются неагрессивными по нормам магнезиальной агрессивности.

Таблица 5. Оценка магнезиальной агрессивности грунтов

Содержание $Mg^{2+}$ , мг/л	Показатель агрессивности жидкой среды для сооружений, расположенных в грунтах с $K_f$ свыше 0,1 м/сут, в открытом водоеме при марке бетона по водонепроницаемости			
		W4	W6	W8
Нерюнгри				
Мин.	0,0043	-	-	-
Макс.	0,295	-	-	-
Среднее	0,105	-	-	-
Пионерный				
Мин.	0,021	-	-	-
Макс.	0,154	-	-	-
Среднее	0,079	-	-	-

2.1.4. *Сульфатный вид агрессивности* возникает при высоком содержании ионов  $SO_4^{2-}$  предельно допустимое значение, которого колеблется в зависимости от сортов цемента, условий, конструкции сооружения и содержания  $Cl^-$ . Нормы сульфатной агрессивности воды-среды для обычного (несульфатостойкого) портланд-цемента и для обычных (несульфатостойких) пуццоланового, песчано-пуццоланового и шлакового портланд-цементов установлены [2]. Для обычного (несульфатостойкого) портланд-цемента и для обычных (несульфатостойких) пуццоланового, песчано-пуццоланового и шлакового портланд-цементов предусмотрено, что при содержании ионов  $SO_4^{2-}$  с учетом ионов  $Cl^-$  (менее 1000 мг/л) больше 250 мг/л вода считается агрессивной.

Распространение грунтов, обладающих сульфатной агрессивностью по отношению к цементу, на территории Нерюнгри приведено ниже. И по данным табл. 6. грунты не обладают сульфатной агрессивностью по отношению к цементу.

Таблица 6. Распространение грунтов обладающих сульфатной агрессивностью

$SO_4^{2-}$ , %	Портланд цемент по СНиП 2.03.11-85	Портланд цемент по СНиП 2.03.11-85	Сульфато стойкий цемент по СНиП 2.03.11-85
Нерюнгри			
Мин	0,002	-	-
Макс	0,019	-	-
Средн.	0,007	-	-
Пионерный			
Мин	0,0025	-	-
Макс	0,025	+	-
Средн.	0,007	-	-
Оценка агрессивности			
Не агрессивная	-		
Слабо агрессивная	+	0,02-0,05	>0,15-0,3
Средне агрессивная	++	0,05-0,1	0,3-0,4
Сильно агрессивная	++	>0,1	>0,4
агрессивная	+		>0,8

2.1.5. *Хлоридный вид агрессивности* возникает при высоком содержании ионов  $Cl^-$  предельно допустимое значение, которого колеблется в зависимости от сортов цемента, условий, конструкции сооружения и содержания.



Нормы хлоридной агрессивности воды-среды для портланд-цемента и для обычных (несульфатостойких) пуццоланового, песчано-пуццоланового и шлакового портланд-цементов по [2] и химический состав грунтов представлены в табл. 7.

Таблица 7. Распространение грунтов обладающих хлоридной агрессивностью по отношению к цементу

Содержание Cl <sup>-</sup> , %		Портландцемент, шлакопортландцемент и сульфатостойкие цементы по [2]	
Нерюнгри			
Мин.	0,001	-	
Макс.	0,008	-	
Среднее	0,002	-	
Пионерный			
Мин.	0,001	-	
Мак.с	0,003	-	
Среднее	0,002	-	
Оценка хлоридной агрессивности			
Неагрессивная	<0,025	-	
Слабоагрессивная	0,025-0,05	+	
Среднеагрессивная	0,05-0,5	++	
Сильноагрессивная	>0,5	+++	

Грунты, распространенные на территории Нерюнгри, не обладают хлоридной агрессивностью по отношению к цементу.

5.3. *Засоленность грунта* - отношение массы легкорастворимых солей, содержащихся в единице объема, к плотности сухого грунта в мерзлом состоянии. Оценка засоленности грунтов на территории города приведена ниже (табл. 8).

Таблица 8. Результаты определения засоленности

Распределение	Соленость, %	Степень засоленности
Нерюнгри		
Мин.	0,010	-
Макс.	0,044	-
Среднее	0,022	-
Пионерный		
Мин.	0,011	-
Макс.	0,059	+
Среднее	0,025	-
Оценка засоленности грунтов		
Не засоленные	<0,05	-
Слабо засоленные	0,05-0,10	+
Средне засоленные	0,10-0,50	++
Сильно засоленные	>0,50	+++

На территории г. Нерюнгри и пос. Пионерный преимущественным распространения

пользуются незасоленные грунты. Слабое засоление отмечается пос. Пионерный у линии теплотрассы и возможно связано с незначительными протечками.

### Заключение

Агрессивное воздействие компонентов природной среды на строительные материалы (бетон, металлические конструкции) оценивалось по степени воздействия газов, химического и солевого состава грунтов.

Концентрация агрессивных газов (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S) в составе приземной атмосферы Нерюнгри и Пионерного, не превышает допустимых пределов, предусмотренных строительными нормами и, следовательно, газовый состав приземной атмосферы не обладает агрессивными свойствами.

Инженерно-геохимическая характеристика грунтов, распространенных на территории г. Нерюнгри и пос. Пионерный выполнена путем оценки агрессивности (выщелачивающей, общекислотной, углекислотной, магниальной, сульфатной, хлоридной) по отношению к бетону и засоленности грунтов.

Установлено, что грунты, распространенные на территории города агрессивны в отношении гидрокарбонатной щелочности и на отдельных участках, преимущественно в центральной части города, обладают общекислотной агрессивностью для обычных и сульфатостойких пуццолановых и шлаковых портланд-цементов с наименьшей толщиной конструкции менее 0,5 м. Однако, при поперечных размерах конструкции выше 0,5 м почвенные воды не агрессивны.

Грунты являются неагрессивными к цементу по нормам магниальной и хлоридной агрессивностью. По предварительным данным грунты, отличающиеся слабой сульфатной и хлоридной агрессивностью по отношению к цементу, распространены локально в пос. Пионерный.

В целом по химическому составу атмосферы и грунтов территория Пионерного и Нерюнгри благоприятна для строительства.

### Список литературы

1. Макаров, В. Н. Геохимия снежного покрова Якутии / В. Н. Макаров, В. И. Федосеева, Н. Ф. Федосеев. – Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1990. - 152 с.
2. СНиП 2.03.11-85/ Защита строительных конструкций от коррозии. – М. : Стройиздат, 1990. – 55 с.
3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей природной среды Республики

Саха (Якутия) в 2006 году / Упр. природ, ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по РС(Я), М-во охраны природы РС(Я). – Якутск : Сахаполиграфиздат, 2007. - 112 с.

### References

1. Makarov, V.N., Fedoseeva, V.I., Fedoseev, N.F. 1990. *Snowpack Geochemistry in Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute Press, 152 pp. (in Russian)

2. USSR State Committee on Construction. 1990. *Building Code SNiP 2.03.11-85. Corrosion Protection of Building Structures*. Moscow: Stroyizdat, 55 pp. (in Russian)

3. Sakha (Yakutia) Environmental Protection Department. 2007. *Report on the State and Protection of Environment in the Republic of Sakha (Yakutia) in 2006*. Yakutsk: Sakhapoligrafizdat, 112 pp. (in Russian)

## New capabilities of the permafrost studies by radioimpedance sounding

V.N. Efremov

Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010

**Abstract.** At high frequencies in the RMT range of 10-1000 kHz, displacement currents become significant in frozen ground. This allows one to use, along with electrical resistance  $\rho$ , the relative dielectric permeability  $\varepsilon$ , the  $\rho/\varepsilon$  relation, and the conductivity to displacement current relation as the recorded effective parameters. These additional parameters increase the capability for delineating the thaw zones and ice bodies during profiling. For two-frequency express sounding to delineate thaw zones and icy bodies, it is proposed to use measurements of the module of a surface impedance (variant 1) and the difference of its phase angles at two frequencies in the high-frequency and low-frequency bands of the working range (variant 2). For estimating the depth to and thickness of different materials, combined interpretation of the frequency dependences of the module and argument (phase angle) of a surface impedance and the express sounding data is proposed. Examples are given describing the application of the registered parameters in profiling, express sounding and frequency sounding on the module and phase angle of a surface impedance at a site with a su-prapermafrost talik in Yakutsk and at a site with wedge ice and ice-rich permafrost at the Amur-Yakutsk railway route.

**Keywords:** permafrost; radio wave impedance sounding; profiling; express sounding; frequency sounding; thaw zone; ice wedges.

## Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зондированием

В. Н. Ефремов

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН

**Аннотация.** На высоких частотах рабочего диапазона 10...1000 кГц, используемого в радиоманнитотеллурическом методе, в мерзлых грунтах становятся значительными токи смещения. Это позволяет использовать в качестве регистрируемых эффективных параметров кроме электрического сопротивления  $\rho$  использовать относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$ , их отношение  $\rho/\varepsilon$ , а также отношение токов проводимости и смещения. Дополнительно взятые параметры усиливают возможности выделения талых зон и льдистых образований в мерзлых породах при профилировании. При двухчастотном экспресс-зондировании для выделения талых зон и высокольдистых образований предлагается использовать данные измерений модуля поверхностного импеданса (1 вариант) и разность его фазовых сдвигов на двух частотах из высокочастотной и низкочастотной областей рабочего диапазона (2 вариант). Для оценки глубины залегания и мощности разных типов грунтов предлагается комплексная совместная интерпретация частотных зависимостей модуля и аргумента (фазы) поверхностного импеданса с учетом данных экспресс-зондирования. Приводятся примеры практического использования регистрируемых параметров при профилировании, экспресс-зондировании и частотном зондировании по модулю и фазе поверхностного импеданса на объекте с надмерзлотным таликом в г. Якутске и на объекте с высокольдистыми образованиями в форме повторно-жильных льдов и ледогрунтов по трассе Амуро-Якутской железнодорожной магистрали.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые грунты; радиоимпедансное зондирование; профилирование; экспресс-зондирование, частотное зондирование; таликовая зона; подземные льды.



# Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зондированием

В. Н. Ефремов

## Введение

Радиоимпедансное зондирование основано на измерении модуля и аргумента (фазы) поверхностного импеданса удаленных радиостанций в рабочем диапазоне частот 10...1000 кГц, охватывающем СДВ, ДВ и частично СВ диапазоны радиоволн [1-3]. Поле источников, находящихся в дальней зоне, наиболее просто и наглядно представляется в теории плоских волн. Из теории следует, что параметры среды, на которую из верхнего полупространства падает плоская электромагнитная волна, определяют величину отношения горизонтальных взаимно-перпендикулярных компонент поля  $E_x$  и  $H_y$  на поверхности раздела. Это отношение по аналогии с теорией длинных линий называют поверхностным импедансом

$$Z = \frac{E_x}{H_y}.$$

Радиоимпедансное зондирование имеет определенные преимущества в применении на мерзлых грунтах. Высокое удельное электрическое сопротивление (УЭС) мерзлых дисперсных отложений, на порядок отличающееся от УЭС талых пород, предоставляет дополнительные возможности для интерпретации данных. Отличие геокриологических объектов в многолетнемерзлых грунтах, имеющих пониженное или повышенное УЭС относительно УЭС вмещающих дисперсных отложений, определяется, в основном, содержанием и фазовым состоянием воды в них. Изменение льдистости отложений приводит к изменению УЭС грунтов и соответствующему изменению в них соотношения токов проводимости и смещения. К относительно проводящим геокриологическим объектам в мерзлых отложениях относятся высокотемпературные тонкодисперсные отложения, таликовые зоны, водоносные горизонты, засоленные отложения и криопэги. К относительно плохо проводящим объектам относятся высокольдистые отложения и подземные льды. При высоком значении УЭС мерзлых пород увеличивается амплитуда горизонтальной электрической составляющей поля, что способствует расширению техниче-

ских возможностей метода. Кроме известных методик профилирования при инженерно-геологическом картировании, позволяющих разграничивать мерзлые и талые породы по эффективному сопротивлению [4], к использованию предлагаются разработанные нами для применения на мерзлых грунтах новые методики профилирования и зондирования.

## Методики исследования

*Радиоимпедансное профилирование (РИП)* на мерзлых грунтах обладает такими преимуществами как широкий динамический диапазон и информативность регистрируемых параметров, применение незаземленных линий приема электрической составляющей поля малой длины.

В радиоимпедансном профилировании измерениями на одной частоте регистрируется изменение по профилю следующих параметров:

- эффективное (кажущееся) сопротивление;
- эффективная толщина скин-слоя;
- эффективный электромагнитный параметр;
- эффективное электромагнитное сопротивление на СДВ.

При определении эффективного сопротивления на практике обычно используют формулу, упрощенную для области преобладания токов проводимости,

$$\rho_{эф} = \frac{127 \cdot |Z|^2}{f}, \quad (1)$$

где  $|Z|$  - модуль поверхностного импеданса, Ом;  $f$  - частота, кГц.

Эффективную толщину скин-слоя определим по формуле

$$l_{эф} = \frac{127 \cdot |Z|}{f \cdot \sin \varphi}, \quad \text{м}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  - аргумент (фаза) поверхностного импеданса, град;  $f$  - частота, кГц.

Эффективный электромагнитный параметр, представляющий собой отношение токов проводимости и смещения, определим по формуле



$$\frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon} = Ig2\varphi. \quad (3)$$

Последний параметр – эффективное электромагнитное сопротивление вводится нами с учетом низкой проводимости мерзлых пород и представляет собой произведение обратных величин проводимости и диэлектрической проницаемости на частоте, для которой существенно влияние токов смещения (ДВ-СВ диапазоны). Другими словами электромагнитное сопротивление – это отношение эффективного сопротивления к эффективной относительной диэлектрической проницаемости

$$r_{эф} = \frac{\rho_{эф}}{\varepsilon_{эф}} = \frac{0.000891|Z|^4}{f \cdot \sin 2\varphi \cdot \cos 2\varphi}. \quad (4)$$

При радиоимпедансном профилировании в пешеходном варианте движения с непрерывным контролем измеряемого параметра, в качестве последнего используется аргумент поверхностного импеданса (фаза) на фиксированной частоте, который может быть пересчитан и в эффективный электромагнитный параметр по формуле (3). В аппаратном плане, предпосылкой выбора в качестве регистрируемого параметра фазы импеданса, является возможность быстрого получения информации о фазе при векторном суммировании амплитуд сигналов, поступающих с магнитной антенны и стелющейся электрической приемной линии. Радиоимпедансное экспресс-зондирование (РИЭЗ) предназначено для повышения информативности оперативно получаемых данных по двухчастотным измерениям на мерзлых грунтах и производится в двух реализациях. В первой реализации – РИЭЗ (М) используем измеренные на двух частотах значения модуля поверхностного импеданса  $Z$ , приведенного к импедансу свободного пространства  $Z_0$ , и записываемого как  $|\delta|$ .

Учитывая сильную зависимость импеданса на поверхности пород высокого сопротивления от подстилающего, гораздо более проводящего горизонта или промежуточного проводящего слоя, в качестве модели мерзлой толщи в первом приближении используем двухслойную горизонтально-слоистую сильно-индуктивную среду. Верхний слой в модели представлен мерзлыми дисперсными отложениями (МДО), а нижний, в зависимости от толщины скин-слоя и весового отношения проводимостей слоев, – мерзлыми коренными

породами (МКП) или тонким проводящим слоем (ТПС). Для данной модели получены формулы [5], по которым приближенно оцениваются два параметра:

а) эффективное сопротивление нижнего слоя

$$\rho_{ниж} = \frac{18 \cdot 10^9}{f_1 f_2} \left( \frac{f_1 |\delta_2| - f_2 |\delta_1|}{\sqrt{f_1} - \sqrt{f_2}} \right)^2, \quad (4)$$

где  $|\delta_1|$  и  $|\delta_2|$  – модули приведенного поверхностного импеданса для частот  $f_1$  и  $f_2$ ;

б) глубина залегания нижнего слоя

$$h_{верх} = \frac{6,67 \cdot 10^7 \left( \Delta |\delta|_{изм} - \frac{\sqrt{\rho_{ниж}} (\sqrt{f_1} - \sqrt{f_2})}{1,34 \cdot 10^5} \right)}{\Delta f},$$

где  $\Delta |\delta|_{изм}$  – разность значений  $|\delta|$ , измеренных на двух частотах;  $\Delta f$  – разность частот  $f_1$  и  $f_2$ .

С помощью формулы (4) и последней формулы по значениям модуля приведенного поверхностного импеданса, измеренного на двух частотах, можно определить величину УЭС нижнего слоя и мощность верхнего слоя двухслойной среды.

При проведении РИЭЗ (М) для оценки УЭС и глубины залегания проводящего слоя, измерения модуля поверхностного импеданса необходимо проводить на двух и более частотах, разнесенных по частоте в области преобладания токов проводимости так, чтобы  $f_n < 1.5 f_{n-1}$ .

Применение полученных формул позволяет автоматизировать приближенную интерпретацию данных экспресс-зондирования и оценить результат оперативно, построив графики изменения величин по профилю на месте работ с помощью портативной компьютерной техники (коммуникатор, ноутбук).

Во второй реализации экспресс-зондирования – РИЭЗ (Ф) использованы измерения аргумента (фазы) поверхностного импеданса на двух частотах, основанные на ниже-следующем.

Численным моделированием установлено, что по характеру фазовых кривых поверхностного импеданса можно судить о типе геоэлектрического разреза мерзлой толщи [6]. Тогда значения аргумента поверхностного импеданса

са, измеренные на частотах, характеризующих наклон частотных кривых, могут использоваться для определения типа геоэлектрического разреза (ГЭР).

Радиоимпедансными зондированиями на ледовом комплексе установлено, что увеличение льдистости отложений приводит к значительному изменению разности фаз импедансов, измеренных на высокой (СВ) и низкой (СДВ) частотах [7]. Вызвано это тем, что наличие сильнольдистого образования в большей степени влияет на фазу импеданса на СВ и в меньшей – на СДВ. Разность фаз увеличивается с появлением подземного льда и почти линейно растет с увеличением его мощности. Эта особенность послужила основой для оперативной интерпретации данных фазовых измерений поверхностного импеданса.

При работе на породах с высокольдистых грунтах, для обнаружения и оконтуривания таких локальных объектов, как повторно-жильные льды, появляется возможность применить приемную линию малого (порядка 1 м) размера.

Интерпретация фазовых данных позволяет с помощью экспресс-определений типа геоэлектрических разрезов на пунктах зондирования выделить расположение льдистых зон и повторно-жильных льдов по площади.

*Радиоимпедансное зондирование* производится измерениями модуля и аргумента (фазы) поверхностного импеданса не менее, чем на трех уверенно принимающихся частотах из СДВ, ДВ и СВ диапазонов радиоволн. Минимально необходимый набор частот – по одной в каждом диапазоне. Это позволяет в сумме получить не менее шести значений модуля и фазы импеданса, что вполне достаточно для интерпретации данных зондирования при совместном рассмотрении их частотных зависимостей. Измерения на каждой частоте производятся приемом горизонтальных составляющих поля: магнитной – на рамочную антенну и электрической – на симметричную приемную линию. Ориентировка рамки и приемной линии при измерениях на каждой частоте зондирования строго по пеленгу на радиостанцию.

Интерпретация частотных зависимостей модуля и аргумента поверхностного импеданса, по данным измерений на всех уверенно принимавшихся частотах, производится в диалоговом режиме на компьютере с помощью пакета прикладных программ «Импеданс» [8].

Пакет решает обратную задачу для поверхностного импеданса слоистой полупроводящей среды методом регуляризации А.Н. Тихонова на основе вводимых данных измерений модуля и аргумента поверхностного импеданса для группы частот и параметров гипотетического геоэлектрического разреза с фиксацией априорно известных. По параметрам гипотетического разреза решается прямая задача для поверхностного импеданса горизонтально-слоистой среды. Результаты расчета сравниваются с измеренными значениями. Решение обратной задачи ищется минимизацией сглаживающего функционала с использованием метода линейаризации Ньютона-Канторовича. Критерием выбора решения является сходимость регуляризирующего алгоритма или минимум среднеквадратичного отклонения (невязок) экспериментальных значений импеданса от рассчитанных.

Чтобы эффективно решить обратную задачу для многолетнемерзлых грунтов предлагается методика, использующая рекуррентный принцип и включающая три этапа. Рекуррентный принцип предполагает возможность замены нескольких перекрывающихся слоев одним, с обобщенным значением какого-либо параметра для оценки параметров подстилающего слоя. Это позволяет на начальном и последующих этапах снизить число варьируемых параметров слоев гипотетического разреза и соблюсти требования формата программного пакета по ограничению числа параметров, вводимых для решения обратной задачи.

I этап. Сначала данные измерений модуля и фазы поверхностного импеданса следует обработать по методикам экспресс-зондирования. Тем самым, будут приближенно определены по модулю – эффективное УЭС МДО, наличие, УЭС и глубина залегания проводящего слоя, а по фазе – тип геоэлектрического разреза. При наличии в нем проводящего слоя, вводится гипотетический двухслойный разрез с относительно проводящим верхним или нижним слоем. Глубина залегания проводящего слоя в основании, либо мощность верхнего слоя берется по результатам РИЭЗ (М). Далее, помимо результатов приближенной экспресс-оценки параметров разреза, следует учесть априорные сведения о разрезе толщи, такие как глубина сезонного оттаивания (измеряется шупом), параметры геолого-геокриологического разреза по данным бурения опорных скважин и т.п. Используя рекуррентный принцип, вводится минималь-



ное число слоев. Начиная с двухслойного разреза, взятого без учета сезонноталого слоя (СТС), переходим к трехслойному (с учетом СТС) или четырехслойному (с учетом СТС и ТПС) разреза. Из полученных в ходе цикла решений вариантов выбираем тот, у которого меньше невязки и по модулю и по аргументу импеданса в области реально ожидаемых, из априорных сведений, значений параметров разреза.

II этап. Уточняем вводимый гипотетический разрез добавлением слоев проводящих, уже относительно имеющихся. Физически наличие ТПС обосновано наличием талых, пластично-мерзлых и засоленных зон в мерзлой толще. Число добавляемых ТПС определим по форме фазовой кривой, характеризующей структуру разреза. Учитывая возросшее число параметров и ограниченность ввода варьируемых параметров, фиксируем те из них, которые при решении не подвержены значительному варьированию. На этом этапе обычно фиксируются параметры верхнего (СТС) и нижнего (опорного) слоев. Проводим цикл решений и снова останавливаемся на том варианте, у которого меньше невязки и по модулю и по аргументу импеданса для диапазонов изменения значений параметров разреза, реально ожидаемых из априорных сведений.

III этап. Уточняем вводимый гипотетический разрез добавлением плохопроводящих, относительно имеющихся, слоев. УЭС плохопроводящего слоя ориентировочно берется на порядок выше УЭС вмещающей толщи. Выбор положения слоя в разрезе осуществляется с учетом результатов РИЭЗ (М), РИЭЗ (Ф) и априорных сведений. Учитывая возросшее число параметров и ограниченность ввода варьируемых, фиксируем уже определенные параметры разреза и те из них, которые на II этапе не подвергались значительному варьированию при поиске решения. Проводим цикл решений и окончательно останавливаемся на том варианте, у которого минимальные невязки и по модулю и по аргументу импеданса для диапазонов изменения значений параметров разреза, реально ожидаемых с учетом априорных сведений. Выбранный вариант и будет являться решением обратной задачи.

### Результаты радиоимпедансного зондирования

*Оконтуривание таликовой зоны* рассмотрим на примере зондирования грунтов строительной площадки в г. Якутске.

Здесь радиоимпедансным профилированием на частоте 171 кГц по значительному снижению электромагнитного сопротивления на участке профиля 17-30 м выделяется таликовая зона (рис.1).

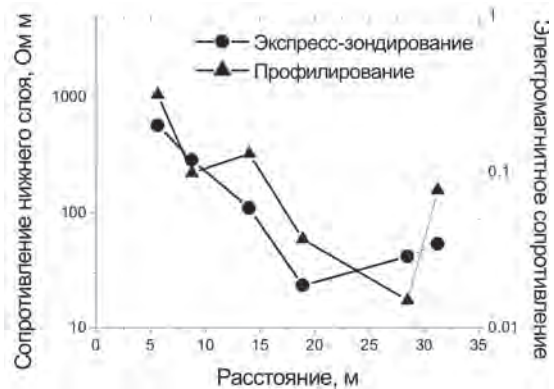


Рис.1. Результаты радиоимпедансного профилирования (электромагнитное сопротивление) и радиоимпедансного экспресс-зондирования РИЭЗ (М) (эффективное сопротивление нижнего слоя) по профилю №2.

Радиоимпедансным экспресс-зондированием по модулю импеданса РИЭЗ (М) на частотах 864 и 549 кГц уточняется его расположение по профилю на участке 17-35 м (рис.1), определяются эффективное сопротивление 20-50 Ом м и глубина залегания 1 м.

Радиоимпедансное зондирование на частотах 22.3; 171; 549; 864 кГц по профилю в результате комплексной интерпретации частотной зависимости модуля и аргумента (фазы) поверхностного импеданса дает более точную и полную картину распространения талой зоны в вертикальном разрезе (рис. 3). Протяженность талой зоны по профилю в ее верхней части увеличивается до размеров участка 5-30 м и определяется ее мощность величиной 9 м, подтверждаемая данными бурения.

Рассмотрение всех данных радиоимпедансного зондирования по исследуемой площади позволяет получить картину пространственного распространения таликовых зон в горизонтальных срезах на определенных глубинах (рис. 2).

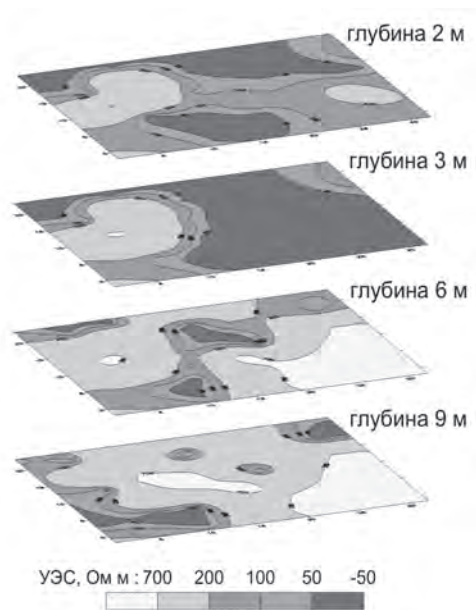


Рис. 2. Горизонтальные срезы распределения УЭС грунта в плане на различной глубине. Талым грунтам соответствует УЭС меньше 100 Ом м.

Здесь уровни глубины 2 и 3 м для горизонтальных срезов выбраны как характеризующие состояние грунтов в подошве сезонноталого слоя.

Совместное рассмотрение изменения УЭС в вертикальном разрезе и горизонтальных срезах позволяет представить объемную картину распространения таликовых зон.

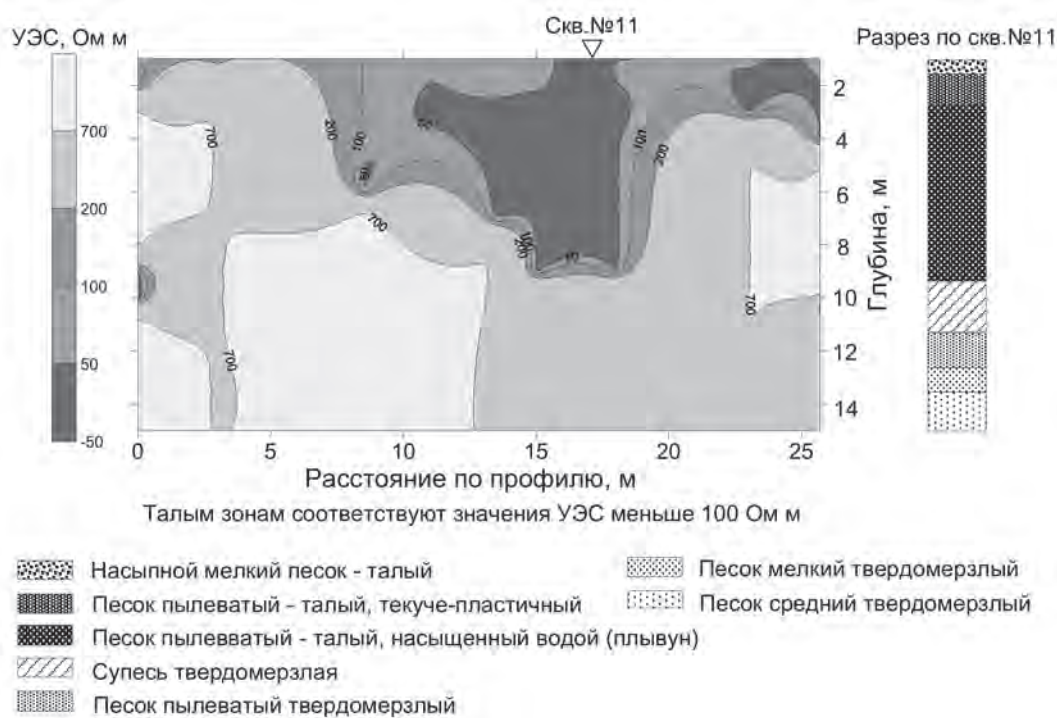


Рис. 3. Вертикальный геоэлектрический разрез по результатам радиоимпедансного зондирования по профилю № 2 на строительной площадке в г. Якутске в сравнении с данными бурения. Талой зоне соответствуют значения УЭС меньше 100 Ом м.

Оконтурирование высокольдистых отложений и повторно-жильных льдов рассмотрим на примере работ на участке ледового комплекса по проектируемой трассе железнодорожной Амуро-Якутской магистрали. Здесь проведены работы радио импедансным зондированием на площадке длиной 230 и шириной 80 м, которую пересекала визирная линия проектируемой

трассы. По результатам площадного радиоимпедансного экспресс-зондирования РИЭЗ (Ф) выделена зона распространения ледогрунтовых отложений и повторно-жильных льдов (рис. 4). Повторно-жильным льдам с большей мощностью соответствует большая величина разности фаз поверхностного импеданса, измеренных на частотах 549 и 22,3 кГц.



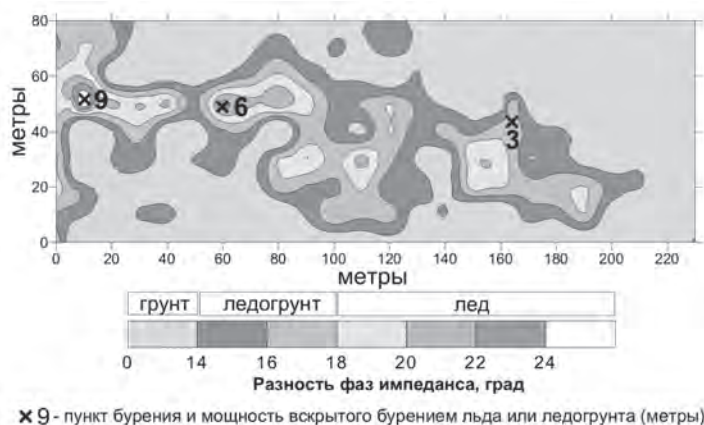


Рис.4. Карта расположения ледогрунтов и повторно-жильных льдов в плане по результатам площадного РИЭЗ(Ф) на участке ледового комплекса (693 км АЯМ).

### Заклучение

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложены методики радиоимпедансного профилирования, экспресс-зондирования частотного зондирования, позволяющие установить параметры распространения и залегания талых, водоносных, высокольдистых отложений и подземных льдов в криолитозоне. Применение предложенных методик позволит повысить эффективность геофизических работ при изысканиях и обследовании геокриологических условий проектируемых, строящихся и эксплуатируемых линейных сооружений, строительных и инженерных объектов на многолетнемерзлых грунтах.

### Список литературы

1. Тархов, А. Г. Основы геофизической разведки методом радиоклип / А. Г. Тархов. – М.: Госгеолгиздат, 1961. – 174 с.
2. Вешев, А. В. О методике наблюдений и интерпретации результатов изучения полей радиовещательных станций / А. В. Вешев, В. А. Егоров // Вопросы геофизики. Ученые записки ЛГУ. – 1966. – № 329, вып.16. – С. 172–189.
3. Zacher, G. Radiomagnetotellurics: a powerful tool for waste site exploration / G. Zacher, G. Tezkan, F. M. Neabauer, A. Hordt and I. Muller // European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1966. – 1. – P. 139–159.
4. Сикорский, В. А. Определение параметров среды и методом радиоклип / В. А. Сикорский // Известия ВУЗ. Геология и разведка. – 1975. – № 7. – С. 97–104.
5. Ефремов, В. Н. Теоретические и экспериментальные аспекты интерпретации результатов радиоимпедансного зондирования мерзлых толщ / В. Н. Ефремов // Наука и образование. – 2007. – № 4 (48). – С. 97–103.
6. Ефремов, В. Н. Некоторые результаты исследования поверхностного импеданса мерзлых толщ в радиоволновом диапазоне / В. Н. Ефремов // Наука и образование. – 2008. – № 4 (52). – С. 68–72.

7. Ефремов В. Н. Картирование и мониторинг состояния сильнольдистых грунтов радиоимпедансным зондированием / В. Н. Ефремов // Наука и образование. – 2009. – № 4 (56). – С. 81–86.

8. Ангархаева Л. Х. Пакет программ «Импеданс» для решения задач радиоимпедансного зондирования / Л. Х. Ангархаева. – Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610893. Выдано РОСПАТЕНТом 6 июня 2002 г.

### References

1. Tarkhov, A.G. 1961. *Fundamentals of Geophysical Prospecting by the Radioklip Method*. Moscow: Gosgeoltechizdat, 174 pp. (in Russian)
2. Veshev, A.V. and Egorov, V.A. 1966. On observation procedure and interpretation of results of study of fields of broadcasting stations. *Voprosy Geofiziki, LGU Transactions* 329 (16): 172-189. (in Russian)
3. Zacher, G., Tezkan, G., Neabauer, F.M., Hordt, A. and Muller, I. 1996. Radiomagnetotellurics: a powerful tool for waste-site exploration. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1: 139-159.
4. Sikorsky, V.A. 1975. Determination of Subsurface Parameters and by the Radioklip Method. *Izvestia VUZ, Geologia i Razvedka* 7: 97-104. (in Russian)
5. Efremov, V.N. 2007. Theoretical and experimental aspects of interpretation of results of radioimpedance sounding of permafrost. *J. Nauka i Obrazovanie* 4(48): 97-103. (in Russian)
6. Efremov, V.N. 2008. Some results of research of superficial impedance of permafrost in the radiowave range. *J. Nauka i Obrazovanie* 4(52): 68-72. (in Russian)
7. Efremov, V.N. 2009. Mapping and monitoring of condition of permafrost by radioimpedance sounding. *J. Nauka i Obrazovanie* 4(56): 81-86. (in Russian)
8. Angarhaeva, L.H. *The Impedance Software Package for Radioimpedance Sounding*. RF Patent 2002610893 of June 6, 2002. (in Russian)

## Experimental study on temperature dependence of GPR signals in Mirny, western Yakutia

L.G. Neradovsky<sup>1</sup>, M.L. Vladov<sup>2</sup>, M.S. Suvorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, Russia 677010, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Abstract.** An experimental study conducted in western Yakutia has proved the effect of the temperature field on attenuation of impulse electromagnetic energy in permafrost within the depth of annual temperature variation. The study was performed in a residential area of the city of Mirny in a wide temperature range (0.0°C to -7.0°C) and demonstrated that the GPR signal attenuation parameter increases nonlinearly with increasing temperature of the frozen foundation materials. The monotonic rate of increase in attenuation changes to an extreme rate at temperature near freezing point ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Similar behavior is observed, both in the laboratory and in the field, in the temperature dependence of electrical conductivity and seismic wave velocity in permafrost and soil materials. From the analogy principle it follows that the temperature dependence of electromagnetic wave attenuation is a universal physical law acting in permafrost. Important for practice are the inverse mathematical models of the temperature dependence which allow calculation of the temperature field parameters around pile foundations with an accuracy of  $\pm 0.3\text{-}0.6^\circ\text{C}$ . GPR thus holds promise as a means of remote detection, control and prediction of subsurface temperature changes induced by climate change or construction activity.

**Keywords:** thermometry; permafrost layer of annual temperature variation; ground probing radar; GPR signal attenuation parameter; temperature field parameters; mathematical models.

## Экспериментальное изучение температурной зависимости сигналов георадиолокации в г. Мирном Западной Якутии

Л. Г. Нерадовский<sup>1</sup>, М. Л. Владов<sup>2</sup>, М. С. Суворова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН  
Россия 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

**Аннотация.** Экспериментально доказано влияние температурного поля на затухание энергии импульсного электромагнитного поля в слое годовых теплооборотов криолитозоны Западной Якутии. Оно изучено в жилом секторе города Мирного в широком температурном диапазоне (0,0°C - минус 7,0°C) и показывает нелинейное нарастание показателя затухания амплитуды сигналов георадиолокации при повышении температуры мёрзлых грунтовых оснований общественных зданий. Монотонный темп нарастания затухания сменяется на экстремальный темп при температуре в окрестности фазовых переходов ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Аналогичным образом ведут себя в лабораторных и натуральных условиях температурные зависимости электропроводности и скорости распространения упругих сейсмических волн в мёрзлых породах и грунтовых средах. Из принципа аналогии следует, что температурная зависимость амплитуды затухания электромагнитной волны относится к общим физическим законам природы, действующим в вечной мерзлоте. Практическое значение имеют обратные математические модели температурной зависимости, позволяющие вычислять с точностью  $\pm 0,3\text{-}0,6^\circ\text{C}$  характеристики температурного поля в зоне работы свайных фундаментов инженерных сооружений. Благодаря этому, георадиолокация выступает в качестве радиометода дистанционной диагностики, контроля и прогноза изменений температурного поля, происходящих под влиянием климата и техногенеза.

**Ключевые слова:** термометрия; слой годовых теплооборотов; георадиолокация; показатель затухания сигналов георадиолокации; характеристики температурного поля; математические модели.

# Экспериментальное изучение температурной зависимости сигналов георадиолокации в г. Мирном Западной Якутии

Л. Г. Нерадовский, М. Л. Владов, М. С. Суворова

## Введение

Практическая точность термометрии находится на уровне  $\pm 0,1$  °С и в большинстве случаев удовлетворяет требованиям науки и практики. Проблема состоит в том, что применение метода термометрии невозможно без бурения скважин. Такие работы даже при бурении неглубоких скважин (глубиной 10-20 м) стоят дорого и не везде выполнимы. К тому же, в редких случаях удаётся сохранить скважины в режимной сети термометрии в течение всего срока эксплуатации зданий и сооружений, т.е. в среднем около 50 лет. Особенно остро обозначенная проблема говорит о себе при безуспешных попытках организовать на северных территориях России сеть температурного контроля равномерно покрывающую точками скважин всю площадь жилой и промышленной зоны.

## Решение проблемы

Рациональное технико-экономическое решение обозначенной проблемы найдено в объединении возможностей термометрии с методом георадиолокации. С его участием методика построения сетей теплового мониторинга мёрзлых грунтовых оснований инженерных сооружений выглядит следующим образом.

В узлах сети бурятся опорные точки скважин на всю мощность слоя годовых теплооборотов. Узлы сети задаются таким образом, чтобы при минимизации объёмов буровых работ, избирательно покрыть проблемные участки площади городской застройки с аварийными зданиями и сооружениями. “Пустые” промежутки между точками скважин термометрии по возможности равномерно заполняются точками георадиолокационного зондирования. В них температура грунтов вычисляется по математическим моделям.

## Опыт решения проблемы

Экспериментальное изучение температурной зависимости сигналов георадиолокации опирается на положительные результаты пионерного эксперимента, проведённого в 2007 г. Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в центре алмазодобывающей промышленности Западной Якутии – г. Мирном [1]. Эксперимент не имеет аналогов

ни в России, ни за рубежом. Он доказал ранее выдвинутую Л.Г. Нерадовским гипотезу о влиянии температурного поля криолитозоны на затухание импульсной электромагнитной энергии в слое годовых теплооборотов (СГТ).

## Обоснование эксперимента

Идея использовать георадиолокацию, как радиометод определения температуры мёрзлых грунтов, возникла в середине 80-х годов

XX века при проведении межведомственных испытаний аппаратуры 17ГРЛ-1, когда было замечено, что при переходе мёрзлых грунтов в талое состояние их волновые характеристики изменяются. Немалое время понадобилось, чтобы прийти к пониманию главного - связующий ключ георадиолокации и термометрии скважин надо искать в СГТ. Интуиция подсказывала, что фактор затухания энергии электро-магнитного поля играет не последнюю роль в достижении термодинамического равновесия, показателем которого по энциклопедическому определению является температура. Факты, добытые из опыта изыскательских работ, доказывают, что это действительно так. Однако связь поглощения энергии с температурой явно не проявляет себя. Она существует в скрытом виде, где её посредником выступает величина электропроводности.

Цепочка причинно-следственной связи следующая: температура – электропроводность – поглощение. Последнее звено цепочки в свою очередь проявляет себя в показателе скорости затухания амплитуды электромагнитной волны (сигнала георадиолокации).

Зависимость электропроводности от температуры хорошо изучена теоретически и практически, как для электротехнических материалов, так и для пород и грунтовых сред. Она давно и успешно используется в разных областях науки, техники и производства. Яркий тому пример – определение температуры пород и грунтовых сред полупроводниковыми датчиками – терморезисторами.

Теоретически связь затухания и электропроводности закреплена в структуре величины комплексной диэлектрической проницаемости. Мнимая её часть, определяющая тангенс угла энергетических потерь, содержит

в себе величину электропроводности. Из этого следует, что электропроводность одновременно является и источником искомой связи, и обоснованием постановки натурального эксперимента.

### **Методика эксперимента**

Количество скважин термометрии, вошедших в матрицу эксперимента, составило 103 точки. Условия проведения эксперимента определялись требованиями хозяйственных работ и потому их нельзя было заранее планировать. Такие условия имеют свою ценность. Они изначально повышают чистоту в части независимого выбора объектов из генеральной совокупности - застроенной части г. Мирного.

Все объекты эксперимента (10 общественных зданий) находятся на пологой склоновой поверхности южной экспозиции левого берега долины р. Ирелях.

По данным изыскательских работ грунтовыми основаниями зданий служат осадочные породы нижнего ордовика. В разрезе, изученном до 10-15 м, породы образуют переслаивающуюся толщу мергелей, известняков, доломитов, песчаников. Она перекрыта плащом элювия делювия в виде суглинков, супесей с различным содержанием крупнообломочного материала. Степень льдистости толщи пород редко превышает 15-30%.

### *Термометрия*

Она выполнялась в скважинах с интервалом по глубине через 1 м. Показания терморезисторов "ММТ-4" записывались логгерами, а затем пересчитывались по программам-макросам в значения температур с точностью 0,01 °С.

Термометрия 2007 г. показывает, что на объектах экспериментов температурное поле сохранило черты, присущие ему до начала массового строительства: залегание нижней границы СГТ на глубине 8-10 м и высокие горизонтальные градиенты (1 °С на 100 м).

Осенью все основания зданий за исключением здания администрации (кривая с индексом "10"), находились в мёрзлом состоянии. Экстремальные значения температуры на глубине 10 м наблюдаются в основании школы №№12, 26 (-5 °С) и школы №1 (-1,0 °С). Остальные основания зданий близки по температурам, которые при наиболее вероятном значении минус 2,8 °С (кривая с индексом "0") варьируют в диапазоне минус 1,8-3,6 °С.

### *Георадиолокация*

Этот метод изучал затухание амплитуды сигналов георадиолокации в СГТ до глубины 10 м. Записи сигналов выполнялись георадаром "SIR-2000" с антенной "D-200" при температуре воздуха минус 30-40 °С по линиям профилей, пересекающих точки скважин режимной термометрии.

Обработка сигналов состояла в определении среднего показателя затухания амплитуды импульсов. За неимением компьютерных программ, обработка выполнялась ручным способом. Для этого в окрестности каждой скважины избирательно делалась выборка 3-7 трасс сигналов. Выборки делались из нормального волнового поля, не искажённого влиянием помех.

Не касаясь деталей алгоритма вычислений, отметим лишь принципиальные условия, выполнение которых, как показывает опыт, в большинстве случаев гарантирует получение достоверных оценок показателя затухания.

Во-первых, запись сигналов надо освободить от искажающего влияния автоматической амплитудной коррекции. Она применяется для визуализации отражающих границ, но не допустима для определения показателя затухания.

Во-вторых, из выборок трасс нужно убрать избыточную информацию. Речь идёт о визуальном распознавании и считывании только тех импульсов, которые имеют амплитудную выразительность и фазовую разрешённость. Этот подход заимствован из военной радиолокации [2] и основан на распознавании зрительных образов от целей (самолётов и пр.).

Несмотря на существование элемента субъективности, зрительное распознавание полезных отражений и их избирательная выборка обладают ценными качествами экспертных систем. При достаточном опыте они при минимуме затрат времени дают информационно значимые и достоверные результаты. Авторы имели возможность не раз в этом убедиться, распознавая отражения импульсов от верхней границы подземных льдов, уровня грунтовых вод и кровли коренных осадочных пород.

В-третьих, избирательную выборку отражённых импульсов нужно, как говорят геофизики, "схлопнуть", т.е. удалить из неё нулевые значения. После этого дискретную запись амплитуды импульсов пересчитывают в значения децибелов по отношению к динамическому диапазону георадара.



Приготовительные операции завершались преобразованием временных трасс сигналов в масштаб глубин до уровня среза 10 м. Необходимые для этого скорости распространения импульсов пришлось не вычислять по данным параметрических скважин, а оценивать по крутизне ветвей гипербол [3]. Объясняется это нежеланием заказчика дать материалы по изысканиям и строительству.

Опыт определения скорости в условиях Западной Якутии по углу наклона ветвей гипербол показывает, что этот приём даёт ошибку в определении глубины залегания границ, редко превышающую 30%.

Поиск корректной аппроксимации затухания амплитуды электромагнитной волны в многофазных и анизотропных средах, какими являются мёрзлые грунты, показал, что наиболее приемлемой для этих целей является степенная функция. В отличие от своих конкурентов – экспоненты и гиперболы, она лучше сглаживает случайные вариации импульсов и описывает закономерную составляющую общих потерь энергии сигналов в ближней и дальней зоне.

#### Статистический анализ

На всех стадиях анализа использовались такие известные программы, как Microsoft Excel, "Stadia", "Statistica6.0".

После разведочного анализа и отбраковки значений, выходящих за границы 95%-ного доверительного интервала, в матрицу эксперимента вошли 97 скважин с тремя числовыми переменными:

1. Безразмерный показатель скорости затухания амплитуды импульсов в слое годовых колебаний температур до глубины 10 м - переменная  $k$ ;
2. Температура грунтов на проектной глубине (10 м) установки острия свай-стоек – переменная  $t_z$  (°C);
3. Средняя температура мёрзлых грунтов ниже сезонноталого слоя (СТС) в зоне работы боковой поверхности свай за счёт сил смерзания - переменная  $t_3$  (°C).

Показатель  $k$  отрицателен, но в матрицу включён с положительным знаком, чтобы его можно было использовать в качестве аргумента трансцендентных функций при построении математических моделей.

Выбор  $t_z$  и  $t_3$  для исследования температурной зависимости мотивирован тем, что они входят в формулы расчёта несущей способности грунтовой среды при проектировании объектов строительства в криолитозоне по I принципу [4]. Кроме этого, на начальном

этапе в модель эксперимента лучше не включать много переменных. Несоблюдение этого правила приводит к неоднозначности принимаемых статистических решений [5].

Включённые в матрицу эксперимента данные репрезентативны, т. е. представляют поле температур в широком диапазоне значений. По критериям Колмогорова и омега-квадрат  $t_z$  и  $t_3$  описываются законом нормального распределения в диапазоне плюс 3,6°C – минус 6,8°C. Средние показатели  $t_z$  и  $t_3$  различаются по критерию Стьюдента:  $t_z = -3,1^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = -2,6^\circ\text{C}$ . Близость средних показателей с высоким коэффициентом линейной корреляции ( $r=0,975$ ) говорит о предсказуемом характере температурного поля в СГТ в осенний период года, что создаёт благоприятные условия (минимум помех) для изучения связи с переменной  $k$ .

По трём критериальным статистикам закон нормального распределения для описания  $k$  неприменим. Вместо него необходимо применять закон гамма распределения адекватно описывающий вариации  $k$  в диапазоне 0,09-1,41 со средним значением  $0,291 \pm 0,062$ .

По непараметрической оценке между показателем затухания  $k$  и характеристиками температурного поля  $t_z$  и  $t_3$  существует равная и тесная нелинейная связь с коэффициентом корреляции  $r=0,88$ . Для её описания наиболее подходят уравнения полиномов степени 2-3.

#### Результаты эксперимента

##### Прямая математическая модель

Графики этой модели - полиномиальной регрессии, показывают, что в зоне заглубления свайных фундаментов при повышении температуры твёрдомёрзлых грунтов наблюдается сначала монотонное, а затем, начиная с минус 1,0°C, стремительное увеличение темпа роста показателя затухания  $k$  с достижением максимума в области фазовых переходов, т.е. около нуля градусов (рис. 1).

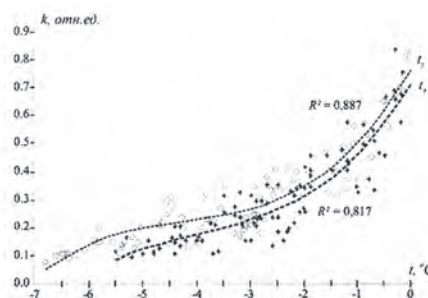


Рис. 1. Графики экспериментальной зависимости показателя затухания  $k$  от характеристик температурного поля  $t_z$  и  $t_3$ . См. пояснения в тексте.

Нелинейность петрофизической связи  $k=f(t_z; t_3)$  обусловлена сложной природой взаимодействия электромагнитного и температурного поля, вероятностный характер которых описывается разными законами.

Минимум чувствительности  $k$  наблюдается в интервале минус 2,5-4,5°C. За его границами на участках с экстремальными температурными режимами чувствительность  $k$  возрастает. Аномальный всплеск значений  $k$  происходит вблизи границы перехода мёрзлых грунтов в талое состояние ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ).

Такая же закономерность наблюдалась в прошлом многими исследователями при изучении электропроводности и диэлектрической проницаемости на образцах и массивах пород и грунтов в лабораторных и полевых условиях. Из этой аналогии следует важный вывод: показатель *степенной функции  $k$  правдоподобно описывает процесс затухания электромагнитной энергии в мёрзлых грунтовых средах.*

Обратная задача регрессии состояла в нахождении  $t_z$  и  $t_3$  по  $k$ . Решалась она перестановкой мест переменных с использованием математической модели натурального логарифма следующего вида:

$$t_z; t_3 = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(k) \quad (1)$$

Обоснование выбора математической модели даётся ниже. Пока же отметим, что определение  $t_z$  и  $t_3$  можно делать графически. Для этого данные эксперимента нужно аппроксимировать кривой регрессии, применив метод наименьших квадратов (МНК) с традиционным решением системы обычных алгебраических уравнений.

Метод МНК не даёт формул, но по точности и корректности аппроксимации ему нет равных. В дальнейшем аналитический и графический метод решения обратной задачи регрессии можно объединить в виде номограмм и пользоваться ими без использования компьютерной техники для определения  $t_z$  и  $t_3$  в полевых условиях в разных местах освоенных районов криолитозоны.

#### *Обратная математическая модель.*

Искомая модель построена по выборке скважин, которая описывает в осенний период года мерзлотное состояние грунтовых оснований зданий в широком спектре температур.

Первый вариант модели предназначен для широкой апробации с целью изучения и прогноза температурного поля в тех освоенных районах, где часто происходит смена

мёрзлых и талых пород (островная мерзлота), а также в местах застроек, где под инженерными сооружениями возникли техногенные талики.

Для этого варианта модели подобраны следующие рабочие формулы:

$$t_z = 0,580 + 2,725 \cdot \ln(k); R^2=0,851 \quad (2)$$

$$t_3 = 0,833 + 2,509 \cdot \ln(k); R^2=0,825 \quad (3)$$

где,  $\ln(k)$  – натуральный логарифм показателя затухания; цифровые значения – коэффициенты модели  $a_0$  и  $a_1$ , определяющие её положение и кривизну в системе декартовых координат;  $R_2$  – коэффициент детерминации модели.

В силу того, что область положительных температур грунтов изучена слабо (всего несколько определений) формулы (2) и (3) имеют больше научный интерес.

Второй вариант модели предназначен для диагностики, контроля и прогноза температурного состояния мёрзлых грунтовых оснований зданий в системе комплексного мониторинга с применением метода динамической георадиолокации. Для этого варианта модели подобраны следующие формулы:

$$t_z = 0,525 + 2,688 \cdot \ln(k); R^2=0,800 \quad (4)$$

$$t_3 = 0,505 + 2,297 \cdot \ln(k); R^2=0,784 \quad (5)$$

Оба варианта модели дают приемлемые для практики ошибки вычислений и, самое главное, устойчивы по своим параметрам. Это качество проверено поэтапным построением модели с увеличением числа точек скважин из имеющегося объема экспериментальных данных. Выборка объектов эксперимента, включаемых в модель, производилась наугад.

Результат стохастического возбуждения матрицы эксперимента поучителен. Он показывает, что частные модели отдельных зданий, построенные по 10-15 скважинам, нельзя считать вполне надёжными, хотя их точность случайным образом может быть высокой и достигать уровня термометрии.

Вообще говоря, истинная точность любой модели проявляет себя в сходимости статистической оценки средней ошибки к асимптотическому значению.

В конкретном случае этот момент наступает при включении в модель более 60 точек скважин. При таком объёме модель способна вычислять температуру со средней ошибкой около 0,6 °C.

Из графиков огив (рис. 2) следует, что

обратная модель в большинстве случаев с равной вероятностью завышает-занижает данные термометрии скважин с ошибкой  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Доля таких высокоточных определений в общей структуре ошибок занимает 38-39%. Более низкие, но всё ещё приемлемые ошибки ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ), встречаются в 50-55% случаев. Грубые ошибки (более  $\pm 1,0^\circ\text{C}$ ) составляют 20%. Часть из них связана с низкой чувствительностью модели в диапазоне минус 2,5-4,5 $^\circ\text{C}$ .

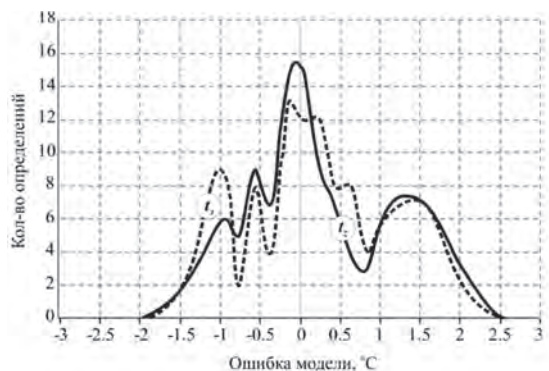


Рис. 2. Графики огиба ошибок вычисления температуры грунтов по обратной математической модели температурной зависимости г. Мирного.

Примерно такую же картину распределения ошибок (см. рис.) даёт модель полинома 3-го порядка, но центральный лепесток ошибок у неё сложнее по форме, шире по дисперсии и сдвинут относительно нулевого значения, что указывает на присутствие в вычислениях систематической ошибки. Поэтому вместо неё для описания вычисления  $t_z$  была выбрана модель натурального логарифма.

Список частных моделей натурального логарифма (табл.) говорит об их состоятельности учитывать индивидуальные особенности инженерно-геокриологических условий эксплуатации общественных зданий г. Мирного.

Параметры частных моделей

Название объекта	Модель: $t_z = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln(k)$		
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$R^2$
Школа №1	0,778	1,358	0,886
Школа №2	1,137	2,255	0,976
Школа №7	0,287	2,309	0,731
Школа №8	1,903	3,177	0,927
Школа №12	0,913	2,772	0,908
МРУНО	0,433	2,802	0,903
Школа №26	2,192	1,661	0,905
Детсад №6	0,404	2,270	0,807
Детсад №8	2,290	5,345	0,912
Администрация	1,478	5,664	0,865

## Заключение

Модели температурной зависимости имеют вероятностный характер. Именно поэтому они эффективно работают при массовых определениях характеристик температурного поля в системе мониторинга на тех участках городской застройки, где по ряду причин получить нужные сведения по термометрии скважин не представляется возможным.

В таких условиях использование георадиолокации, как радиометода определения температуры грунтов, не только оправданно, но и необходимо.

Уступая по точности методу термометрии скважин, метод георадиолокации способен по средним показателям затухания амплитуды сигналов строить карты изотерм и по ним фиксировать не случайные особенности, а основные закономерности или, лучше сказать, тенденции изменения температурного поля, происходящие во времени и пространстве под влиянием климата и техногенеза.

## Список литературы

1. Нерадовский, Л. Г. Влияние температуры многолетнемёрзлых грунтов на затухание электромагнитной энергии / Л. Г. Нерадовский // Геофизика. – 2009. – № 2. – С. 57–67.
2. Шестов, Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех / Н. С. Шестов. – М.: Советское радио, 1967. – 347 с.
3. Владов, М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М.: МГУ, 2005. – 153 с.
4. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 56 с.
5. Кулаичев, А. П. Методы и средства комплексного анализа данных. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 512 с.

## References

1. Neradovsky, L.G. 2009. The effect of permafrost-temperature on electromagnetic energy attenuation. *Geofizika* 2: 57–67. (in Russian)
2. Shestov, N.S. 1967. *Separating Optical Signals in the Presence of Random Noise*. Moscow: Sovetskoe Radio, 347 pp. (in Russian)
3. Vladov, M.L., and Starovoitov, A.V. 2005. *Introduction into Ground Radar Prospecting*. Moscow: Moscow State University Press, 153 pp. (in Russian)
4. USSR Gosstroy. 1990. Building Code SNiP 2.02.04-88, *Foundations in Permafrost*. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 56 pp. (in Russian)
5. Kulaichev, A.P. 2006. *Methods and Tools for Integrated Data Analysis*, 4th ed. Moscow: FORUM: INFRA-M, 512 pp. (in Russian)



# Cryogenesis investigation at the Tiksi by radar interferometry ALOS PALSAR

V.L. Mironov<sup>1</sup>, M.N. Grygoriev<sup>2</sup>, A.I. Zakharov<sup>3</sup>, T.N. Chymitdorzhiev<sup>4</sup>,  
M.E. Bykov S.V<sup>4</sup>. Shibaev<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Kirensky Institute of Physics of SB RAS,  
Russia 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/38, Institute of Physics,  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup> Permafrost Institute of P.E.Melnikov SB RAS, Russia, Yakutsk.

<sup>3</sup>Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Russia, Fryzino, Mosk. Region.

<sup>4</sup> Institute of Physical Materials Science, Russia, Ulan-Ude.

<sup>5</sup> Yakutian Branch of Geophysical Survey SB RAS, Russia, Ulan-Ude.

**Abstract.** On the basis of radar differential interferometry conducted with the use of radar images taken by the ALOS PALSAR, there was detected surface deformation occurring over the area of about 3 km<sup>2</sup>, which is located at the coastal site near Tiksi. During the period of time from February 6, 2008 to March 29, 2010, the surface of this area was shown to have moved towards the sea coastline, simultaneously undergoing some subsidence. The coastal zone landslides were found to be maximal at the coastline, where the slope of surface was estimated to be about 5-6%, and they eased at the distance of about 1 km from the coastline. The deformations observed were supposedly linked to cryo morphogenetic processes, namely, marketplace cryo solifluction. At the same time, on the basis of additional seismic observations, the observed landslide of the upper layers of permafrost was suggested to be induced and enhanced by a seismic event of the 14th energy class, which took place at a distance of 62 km from the site of observation, with its epicenter being located at (71.7 ° N, 127.6 E). This seismic event occurred just between two consecutive radar surveys, namely, on December 22, 2010. It has been concluded that, in some areas adjacent to the coast line, cryo morphogenetic processes may be enhanced by seismic events.

**Kewwords:** arctic coastal zone; cryo morphogenesis at the coastal line; radar differential interferometry.

## Исследование криоморфогенеза в районе Тикси при помощи радарной интерферометрии ALOS PALSAR

В.Л. Миронов<sup>1</sup>, М.Н. Григорьев<sup>2</sup>, А.И. Захаров<sup>3</sup>, Т.Н. Чимитдоржиев<sup>4</sup>,  
М.Е. Быков<sup>4</sup>, С.В. Шибяев<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН  
Россия 660036, г. Красноярск, Академгородок д.50, стр.38. ИФ СО РАН.  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Россия, г. Якутск.

<sup>3</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН им. В.А. Котельникова,  
Россия, г. Фрязино, Моск. Обл.

<sup>4</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, Россия, г. Улан-Удэ.

<sup>5</sup> Якутский филиал Геофизической службы СО РАН, Россия, г. Якутск.

**Аннотация.** На основе метода радиолокационной дифференциальной интерферометрии ALOS PALSAR обнаружена деформация поверхности береговой зоны в районе Тикси площадью около 3 км<sup>2</sup>. Показано, что поверхность данного участка за время с 06.02.2008 г по 29.03.2010 г. сместилась в сторону моря с соответствующей просадкой по вертикали. Сползание береговой зоны максимально вблизи кромки воды, где уклон достигает 5-6%, и уменьшается при удалении от берега до 1 км в сторону суши. Сделано предположение, что данная деформация связана с криоморфогенезом, а именно, площадной криосолифлюкцией. В тоже самое время, на основе дополнительных сейсмических наблюдений было сделано предположение, что обнаруженное оползневое явление для верхнего слоя вечной мерзлоты могло быть вызвано и усилено в результате землетрясения 14 энергетического класса с эпицентром (71.7 с.ш.; 127.6 в.д. ), которое произошло в 62 км от участка наблюдения. Это сейсмическое событие произошло как раз в промежуток времени между радарными съемками, а именно, 22 декабря 2010. Сделан вывод, что процессы криоморфогенеза на некоторых участках береговой зоны может усиливаться при сейсмических событиях.

**Ключевые слова:** арктическая прибрежная зона; криоморфогенез берега; радиолокационная интерферометрия.



# Исследование криоморфогенеза в районе Тикси при помощи радарной интерферометрии ALOSPALSAR

В. Л. Миронов, М. Н. Григорьев, А. И. Захаров, Т. Н. Чимитдоржиев,  
М. Е. Быков, С. В. Шibaев

## Введение

В связи с хозяйственным освоением арктического шельфа представляется актуальным привлечение методов космической дифференциальной радарной интерферометрии для изучения ареалов развития и количественной оценки деформаций рельефа. Данный метод был ранее применен нами в районах повышенной природной и техногенной сейсмической активности [1, 2], а также для изучения криогенных деформаций поверхности почвенного покрова [3]. Известно, что значительные деформации рельефа происходят в прибрежных зонах арктического шельфа [4].

В настоящем докладе радарная интерферометрия применена для изучения явлений деформации участка земной поверхности, расположенного на севере Якутии в районе пос. Тикси (рис. 1, а). Этот район арктического побережья характеризуется существенной скоростью отступления береговой линии вследствие оттаивания вечной мерзлоты и последующей водной эрозии [4]. Вместе с тем известно, что указанный район располагается в сейсмически активной зоне [5–10], что дает основание полагать, что отступления берега могут происходить, в частности, вследствие просадок или сползания геологических структур различного уровня и морфологии. В качестве инструмента радарной интерферометрической съемки поверхности использовался космический радар ALOS PALSAR, который имеет длину волны 24 см и разрешает участки местности с размерами (7,5 x 7,5) м<sup>2</sup>. Такие элементарные участки местности на радарном изображении называются пикселями. Радиолокационная интерферометрия поверхности Земли использует информацию о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных при съемках одного и того же участка местности одноантенной радиолокационной системой с повторяющихся орбит носителя (интерферометр с мягкой базой) или двухантенной системой с одной орбиты (интерферометр с жесткой базой). Метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии дает детальную карту смещений земной поверхности в пределах радиолокационного снимка.

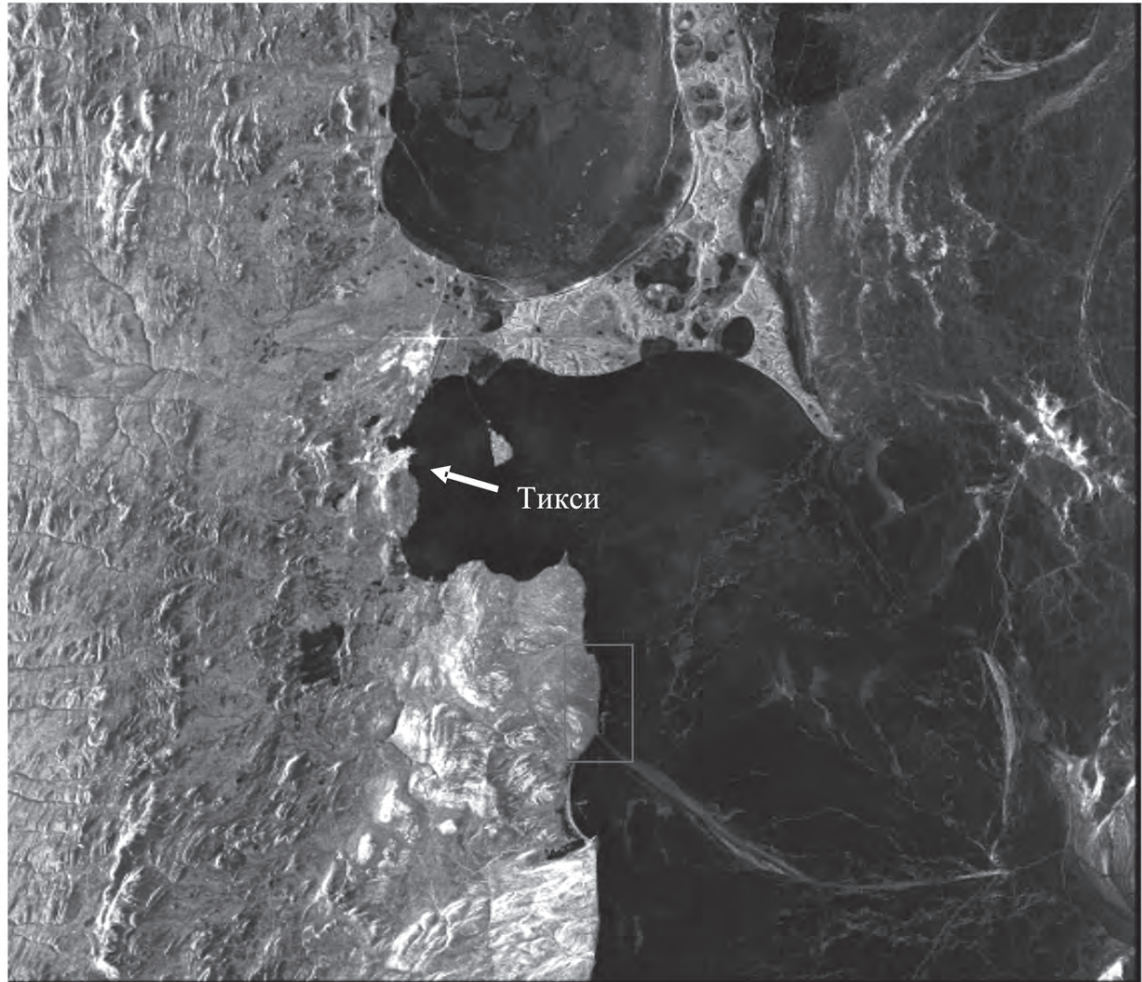
## Методы

В нашем исследовании были использованы совокупности данных космического радара ALOS PALSAR, полученные при съемках с трех последовательных орбит (трехпроходная дифференциальная интерферометрия) за следующие даты съемки (год месяц день):

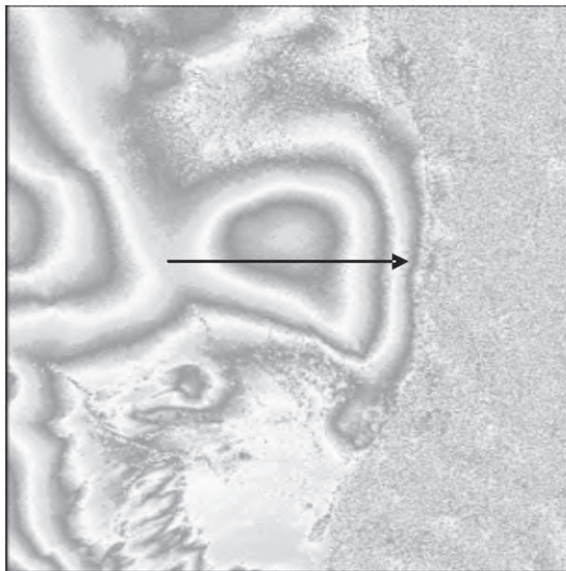
- 1) 2007.12.22 – 2008.02.06 – 2010.03.29,
- 2) 2008.01.08 – 2008.04.09 – 2010.04.15,
- 3) 2008.04.09 – 2008.01.08 – 2011.01.16.

Интерферометрические базы съемок определялись расстояниями между положениями радара во время первой и третьей даты в каждой тройке и составляли порядка 50 м, 200 м и 300 м, соответственно. Ниже на рис. 1, б представлена интерферограмма для прибрежного участка, схематично выделенного прямоугольником на рис. 1-а. Интерферограмма, представленная на рис. 1-б, была получена с использованием двух съемок 2007.12.22 и 2008.02.06. Она соответствует рельефу, существовавшему в период времени с 22.12.2007 г. по 06.02.2008 г. Здесь псевдоцветами показана разность фаз принятого радарного сигнала, изменяющаяся в пределах одного цикла от 0 до 2π. Одинаковым цветом показаны участки местности, для которых разность фаз кратна 2π. Рельеф местности может быть восстановлен с использованием полной разности фаз, которая получается с применением процедуры «развертки» фазы.

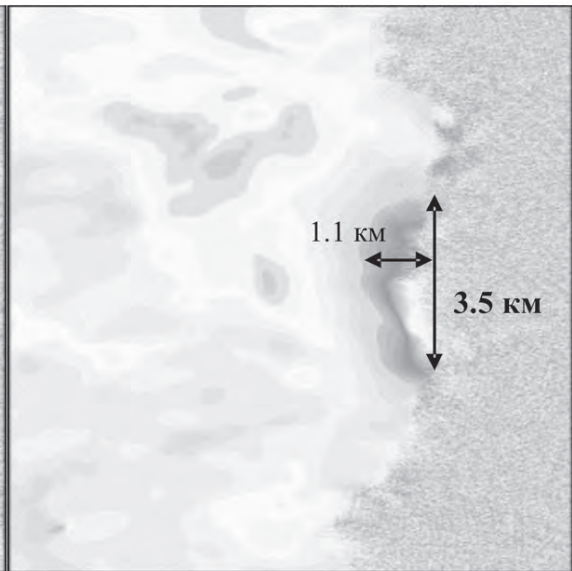
В качестве примера, на рис. 2 приведен профиль изменения полной разности фаз. Этот профиль соответствует на местности стрелке, показанной на рис. 1, б. По осям ординат и абсцисс здесь отложены полная разность фаз в радианах и номера пикселей радарного изображения, соответственно. При этом геометрическая длина одного пикселя равна 7.5 м. Красной стрелкой на рис. 1, б указана граница между сушей и морем, зеленой стрелкой – вершина холма. Изменение полной разности фаз в пределах между первым пикселем (указан зеленой стрелкой) и береговой линией (красная стрелка) соответствует перепаду высот около 160-170 м. При этом длины проекций склонов равны около 2,5 км, а уклоны составляют около 1-2%.



а



б



в

Рис. 1. Радарные изображения ALOS PALSAR.

а – амплитудное изображение за 2010.03.29; б – фрагмент интерферограммы, полученный с использованием радарных пар: 2007.12.22 – 2008.02.06 и 2008.02.06 – 2010.03.29; в – фрагмент интерферограммы, полученный с использованием двух радарных пар: 2007.12.22 – 2008.02.06 и 2008.02.06 – 2010.03.29.

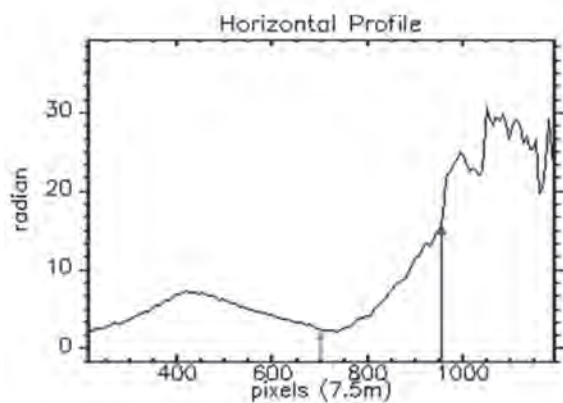


Рис. 2. Горизонтальный профиль интерферометрической разности баз.

Такая же интерферограмма была получена для пары 2007.12.22 – 2010.03.29. Восстановленный по ней рельеф соответствует периоду времени с 22.12.2007 по 29.03.2010. Наконец, на рис. 1-в приведена интерферограмма, которая показывает разность фазы между интерферограммами, соответствующими парам радарных съемок 2007.12.22 – 2008.02.06 и 2007.12.22 – 2010.03.29. Эта разность фазы, возникает за счет деформаций рельефа произошедших за время с 06.02.2008 г. по 29.03.2010 г. Как видно из рис. 1-в, часть территории, прилегающей к береговой линии, общей площадью 3,2 км<sup>2</sup>, характеризуется интерференционными полосами различного цвета, расположенными параллельно береговой линии. Это означает, что данная территория за время с 06.02.2008 г. по 29.03.2010 г. сместилась в сторону моря с соответствующей просадкой по вертикали. Просадки максимальны вблизи кромки воды и уменьшаются с удалением от нее. Аналогичный результат со сходной динамикой и площадью зафиксирован при использовании радарных пар 2007.12.22 – 2008.02.06 и 2008.01.08 – 2010.04.15.

### Результаты и обсуждение

Данные оползневые явления, вероятно, связаны с криоморфогенезом, а именно площадной криосолифлюкцией. Как указывается в [4], в береговой зоне криоморфогенез наиболее активно проявляется в областях распространения льдонасыщенных берегов. Здесь самыми распространенными и динамичными являются процессы термоабразии и термоденудации берегов. Термоденудация обычно сопровождается склоновой блоковой или площадной криосолифлюкцией (быстрой

и медленной), овражной термоэрозией (глубинной, боковой и регрессивной), а также термокарстовыми просадками. Кроме того, исследования, проведенные на ключевых участках на побережье центральной части моря Лаптевых [4], относящихся к наиболее изученным и достаточно долго наблюдаемым, показали, что темпы криогенных береговых процессов в 2005-2007 годы заметно изменились. Это выразилось в массовой активизации склоновых процессов, прежде всего солифлюкции (криосолифлюкции) на прежде стабильных, задернованных берегах. Это нашло отражение и в резком усилении темпов разрушения термоабразионных и термоабразионно-термоденудационных берегов. Таким образом, обнаруженный эффект оползания может быть связан с площадной криосолифлюкцией на участке побережья, который выдается в море и расположен между двумя заливами.

В тоже время мы обнаружили, что использование радарной пары 2008.04.09 – 2011.01.16 для построения рельефа местности на участке, показанном на рис. 1-в оказалось затруднительным из-за низкой когерентности, которая возникает в случае существенных изменений микрорельефа на уровне отдельных пикселей изображения. Последнее, как правило, связано со значительными, более 12 см (половины длины волны) вертикальными и горизонтальными сдвигами поверхности. По нашему мнению, обнаруженное разрушение когерентности было связано с тем, что границы оползней совпадают с линеаменами в этой области [11], а также с усилением оползневых явлений в результате землетрясения 14 энергетического класса с эпицентром (71.7 с.ш. 127.6 в.д.) в 62 км от участка наблюдения. Это сейсмическое событие произошло как раз в промежуток времени между съемками, а именно, 22 декабря 2010 в 23-34-05 по Гринвичу.

### Заключение

Таким образом, радарные интерферометрические измерения дают основание утверждать, что обнаруженный оползень, на участке берега длиной 3.5 км, площадью 3.2 км<sup>2</sup>, связан площадной криосолифлюкцией, при этом катализатором, этого процесса, вероятно, являлось сейсмическое событие. В дальнейшем мы планируем провести сравнительную геодезическую съемку на местности в районе оползней, обнаруженного в результате радарных измерений.



## Благодарности

Авторы выражают благодарность японскому космическому агентству Жаха за представленные в рамках научного проекта радиолокационные данные ALOS PALSAR.

## Список литературы

1. Эпов, М. И. Исследование локальной геодинамики в районах повышенной сейсмической активности на территории Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOSPALSAR / М. И. Эпов, В. Л. Миронов, Т. Н. Чимитдоржиев и др. // Радиолокация и радиосвязь : мат. 4 Всерос. конф., 29 ноября – 3 декабря 2010 г. – М. : ИРЭ РАН. – С. 9699.
2. Zakharov, A. PALSAR Interferometry Studies of Surface Deformations in Bakal Lake Coastal Area / A. Zakharov, T. Chimitdorzhiev, G. Tatkov // Abstract Book of the 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Tokyo, November 15-17, 2010. – 2010. – P. 50.
3. Чимитдоржиев, Т. Н. Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования / Т. Н. Чимитдоржиев, А. И. Захаров, Г. И. Татков и др. // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 4.
4. Григорьев, М. Н. Криоморфогенез и литоди-намика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири : дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.08 / Григорьев Михаил Николаевич ; Ин-т мерзлотоведения СО РАН. – Якутск, 2008. – 38 с.
5. Оперативный каталог Якутского филиала геофизической службы СО РАН [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ceme.gras.ru>. – Яз. рус.
6. Григорьев, М. Н. Геология, сейсмичность и криогенные процессы в арктических районах Западной Якутии / М. Н. Григорьев, В. С. Имаев, Б. М. Козьмин и др. // Якутский научный центр СО РАН. – Якутск, 1996.
7. Drachev, S. S. Structure and geology of the conti-nental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic / S. S. Drachev // *Tectonophysics* 298. – 1998. – P. 357–393.
8. Геологическая карта Якутии. Западно-Верхоянский блок. Масштаб 1:500 000 / В. С. Прокопьев, А. С. Урзов // Национальный Якутский комитет геологии и ресурсов. – Якутск, 1999.
9. Имаев, В. С. Сейсмоструктура Якутии / В. С. Имаев, Л. П. Имаева, Б. М. Козьмин. – М. : Геос, 2000.
10. Тектоника, геодинамика и металлогенез территории Республик Саха (Якутия) / Под. ред. Л. М. Парфенова. – М. : МАИКНаука/ Интерпериодика, 2001.
11. Grosse, G. Geological and geomorphological

evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary / G. Grosse, L. Schirrmeister, Ch. Siegert, V. V. Kunitsky, E. A. Slagoda, A. A. Andreev, A. Y. Dereviagyn // *Geomorphology*. – 2007. – 86 (1/2). – P. 25–51.

## References

1. Epov M. I., Mironov V. L., Chimitdorzhiev T.N. The local geodynamics research in areas of high seismic activity in the Kuzbass according to the radar interferometry by ALOS PALSAR // *Radiolocation and Radi-ocomunications. Proceedings of the fourth All-Russian conf., 29 November – 3 December 2010, Moscow*. 96-99 pp. (in Russian)
2. A. Zakharov, T. Chimitdorzhiev, G. Tatkov. 2010. PALSAR Interferometry Studies of Surface Deformations in Bakal Lake Coastal Area. *Abstract Book of the 4th Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Tokyo, November 15-17, 50 pp.*
3. Chimitdorzhiev T.N. 2011. Investigation of cryogenic deformation of soil in the delta of the Selenga River using SAR interferometry and GPR sensing / Chimitdorzhiev T.N., Zakharov A.I., Tatkov G.I. et. al. // *Study of Earth*, 2011, № 4 (in Russian)
4. Grigoriev M.N., 2008. The cryomorphogenesis and the dynamics of the lithosphere of coastal shelf zone of the East Siberia seas. *Doctor of Science Thesis*.
5. Operation catalog of Yakutsk Branch of Geophysic service of SB RAS, 2010. : <http://www.ceme.gras.ru>.
6. Grigoriev M.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Kunitsky V.V., 1996. Geology, Seismicity and Cryogenic Processes in the Arctic Areas of Western Yakutia. *Yakutian Scientific Centre SB RAS, Yakutsk*. (in Russian)
7. Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Bruni I.E., 1998. Structure and Geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic. *Tectonophysics* 298, 357-393 pp.
8. Ursov A.S., Prokop'ev B.S., 1999. Geological Map of Yakutia, 1:500000 West Verkhoyansky Blok. National Yakutian Committee of Geology and Resources, Yakutsk. (in Russian)
9. Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M., 2000. Seismotectonics of Yakutia. *GEOS, Moscow*. (in Russian)
10. Parfenov L.M.(Ed.), 2001. Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha (Yakutia). *Nauka Interperiodika, Moscow*. (in Russian)
11. Grosse, G., Schirrmeister, L., Siegert, Ch., Kunitsky, V.V., Slagoda, E.A., Andreev, A.A., Dereviagyn, A.Y., 2007. Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary. *Geomorphology* 86 (1/2), 25–51.



# Characteristics of soil moisture movement and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone

Chang-lei DAI<sup>1,2</sup>, Shao-min DU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Water Conservancy & Electric-power, Heilongjiang University, Harbin, China 150080

<sup>2</sup>Institute of Frigid Zone Groundwater, Heilongjiang University, Harbin, China

**Abstract.** The soil moisture movement and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone, two of the most important parts and symbols of hydrologic cycle in cold regions, are crucial to the researches on generation and confluence process of spring runoff, agricultural irrigation and groundwater simulation and management in cold regions. Conceptual model is considered as one of the crucial and essential methods for scientific research on cold region hydrology. However, graphical conceptual model that integrates with a variety of influencing factors and specializes in describing soil moisture dynamic and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone has never occurred in any related researches, due to which the study on mechanism of frozen soil moisture movement has been delayed in a certain degree. Firstly, the processes of soil moisture movement and snowmelt water infiltration in season frozen unsaturated zone have been idealized into 5 and 4 phases respectively. The process of soil moisture movement can be divided into 5 phases which are: the Stage of Freezing (Instable Freezing Stage and Stable Freezing Stage), the Stage of Thawing (Instable Thawing Stage and Stable Thawing Stage) and the Stage of Freeze-free. Snowmelt water infiltration can be reduced to 4 phases: infiltration in snow cover; infiltration in soil melting layer; infiltration in soil frost layer; and infiltration in unfrozen aeration zone. Secondly, the characteristics of each phases of the 2 process have been analyzed. And thirdly, 2 sets of symbolic conceptual models comprehensively describe the entire processes and the factors relationships of soil moisture movement and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone. These models are expected to provide scientific basis for practical work in cold areas, such as hydrologic and hydraulic calculation in cold seasons, assessment and utilization of frozen area water resources and agricultural irrigation in cold regions, and also to provide references to the development of mathematical or experimental models in related research fields.

**Keywords:** seasonal frozen soil; unsaturated zone; soil moisture movement; snowmelt infiltration; conceptual model; cold regions.

## Характеристика движения почвенных вод и инфильтрации талых вод в сезонномерзлом слое зоны аэрации

Чанлэй ДАЙ<sup>1,2</sup>, Шаоминь ДУ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Факультет гидромелиорации и гидроэнергетики Хэйлунцзянского университета, Китай 150080, г. Харбин

<sup>2</sup>Институт гидрогеологии холодных регионов Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай

**Аннотация:** Изучение двух основных компонентов гидрологического цикла в холодных регионах - движения почвенных вод и инфильтрации талых вод в слое сезонного промерзания зоны аэрации важно для исследований формирования и увеличения весеннего стока, моделирования гидрогеологических процессов, для решения задач сельскохозяйственной мелиорации и рационального использования ресурсов подземных вод. Одним из основных методов в гидрологии холодных регионов является построение концептуальных моделей. Однако, графической концептуальной модели, которая бы учитывала все разнообразие определяющих факторов и описывала динамику почвенной воды и инфильтрации талых вод в сезонномерзлом слое зоны аэрации, до сих пор нет, что в некоторой степени затрудняет изучение механизма движения воды в мерзлых грунтах. В предлагаемой схеме процесс движения почвенной воды в сезонномерзлом слое зоны аэрации разделен на 5 фаз: фаза промерзания (фазы неустойчивого и устойчивого промерзания), фаза протаивания (фазы неустойчивого и устойчивого протаивания) и талая фаза. В процессе инфильтрации талых вод выделены 4 фазы: инфильтрация в снежном покрове, инфильтрация в протаивающем слое грунта, инфильтрация в мерзлом слое и инфильтрация в талом слое зоны аэрации. Проанализированы характеристики всех фаз обоих процессов. Эти концептуальные модели позволяют всесторонне описать процессы движения почвенной воды и инфильтрации талых вод в сезонномерзлом слое зоны аэрации и выявить связи между определяющими их факторами. Предложенные модели могут послужить основой для решения практических задач гидрологии и гидрогеологии холодных регионов, например, гидрологических и гидротехнических расчетов, оценки и рационального использования водных ресурсов, мелиорации сельскохозяйственных земель, а также при разработке математических и экспериментальных моделей в гидрологических и гидрогеологических исследованиях.

**Ключевые слова:** сезонномерзлые грунты; зона аэрации; движение почвенных вод; инфильтрация талых вод; концептуальная модель; холодные регионы.

# Characteristics of soil moisture movement and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone

Chang-lei DAI, Shao-min DU

Influencing by periodic temperature gradient, seasonal frozen soil presents a complex regulation of “one-way freezing and two-way thawing” which leads to state transition of soil (freezing and thawing phenomenon) that greatly changes soil moisture movement. Due to the change of soil moisture, frozen soil not only becomes an aquitard but also plays an important role in hydrologic process such as water storage and regulation, restraining evaporation and so on, which will directly influence the 4-water relationship (relationships among atmospheric water, surface water, groundwater and soil water) in cold area and will eventually intervene the hydrologic cycle in cold area [1, 2]. The mechanics of soil moisture movement in seasonal frozen unsaturated zone is considered as a crucial research field, because it is the major distinction from that in warm area and lack of experimental data and study achievement due to the slow development of this discipline and the arduous researching condition, which has delayed the researching process to some extent [3-5]. Aiming at building the conceptual model for soil moisture movement in seasonal frozen unsaturated zone, three stages of freezing and thawing process are divided and analyzed in this article. Also, the changing regulations of groundwater table, groundwater storage and soil surface evaporation under freezing and thawing condition have been explained to serve to construct figure model for further research in this field.

## 1 Subsections and characteristics of freezing and thawing process

Freezing and thawing process can be divided in three stages (Fig.1): Curve ABCDEF is the freezing or thawing process in seasonal frozen soil which reflects the variation regulation of state transition under temperature distribution in time and space. As Fig.1 illustrates, the characteristic of seasonal frozen process can be described as “one-way freezing, two-way thawing”.

### 1.1 Stage of freezing

Stage of freezing (Curve AC) includes Instable freezing stage (Curve AB) and Stable freezing stage (Curve BC).

Instable freezing stage (IFS) refers to the period of “freezing at night and thawing in day” happening in surface soil. When winter comes, temperature starts to fluctuate above and below

0°C and freezing and thawing alternately happens night and day [6,7]. This stage usually starts from late Oct. to early Dec., and lasts until soil heat absorption in day becomes lower than soil heat dissipating at night. In IFS, as snow cover accumulates, groundwater table falls down, and water storage is increased by the infiltration of snow. The characteristics of IFS are: a) the structure of frozen layer is granular and ice crystals gather around soil particles but separate from each other; b) the thickness of frozen layer which forms at night and melts at noon is very thin in this stage

Stable freezing stage (SFS) mainly refers to the period that the thickness of frozen layer increases steadily. When the temperature keeps falling down and negative accumulated temperature increases, both thickness and soil moisture of frozen layer increase. This stage usually starts from early Dec. to Mar. in the following year. In this stage, snow cover accumulates, frozen layer becomes thicker, and the volume of freezing water comes from the freezing frontal surface assembled by evaporation of deeper soil layer and phreatic water (groundwater). The characteristics of SFS are: a) the structure of frozen layer is tight; b) moisture of surface soil is low because most water has been moved to freezing frontal surface.

### 1.2 Stage of thawing

Stage of thawing (Curve CDEF) includes Instable thawing stage (Curve CD) and Stable thawing stage (Curve DEF).

Instable thawing stage (ITS) refers to the period of “freezing at night and thawing in day” happening again in spring. When it gets warmer in spring, in day time, temperature above 0°C takes longer while at night it drops below 0°C again. This is the second time that freezing and thawing alternately happens night and day and the freezing frontal surface still moves downward inertially. This stage usually starts from late Mar. or early Apr. to late May. When daily average temperature rises above 0°C, snow cover starts to melt and finally disappears. Just at this moment, the thickness of frozen layer achieves the top which is called “the max frozen depth” and the water storage volume also achieves the largest. The characteristics of ITS are: a) On account of the surface soil begins to evaporate, the surface soil moisture decreases and the structure of frozen

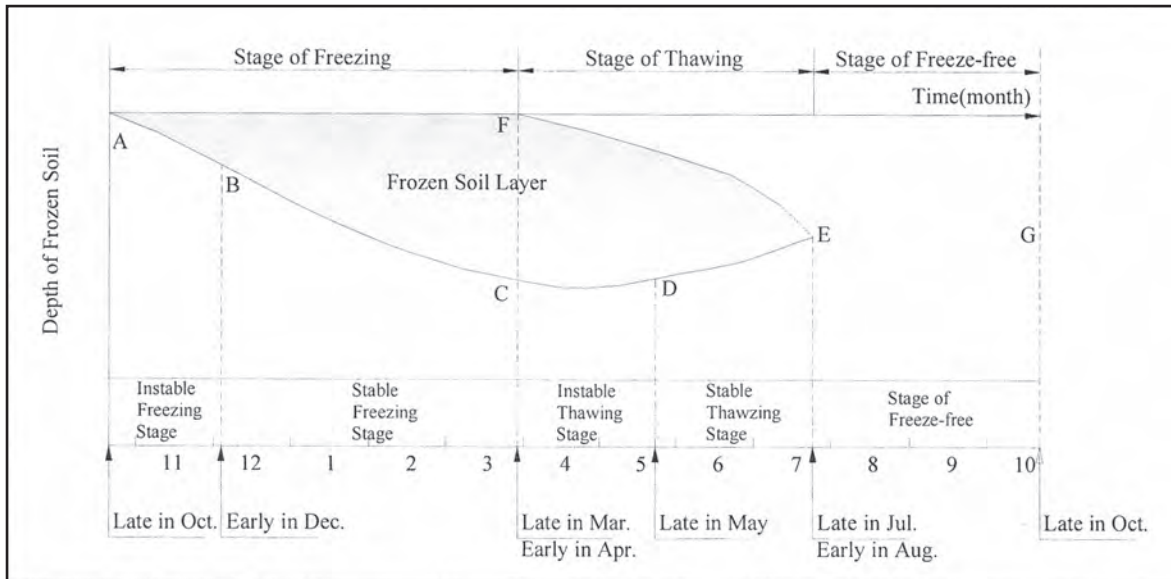


Fig.1. Sketch map of seasonal freezing and thawing process divided by different stages.

layer appears granular or dry; b) the thickness of thawing layer gradually increases.

Stable thawing stage (STS) mainly refers to the period that the thickness of thawing layer increases steadily and finally disappears. When the temperature keeps going up, the thawing layer gradually becomes thicker. Under the effect by solar radiation and geothermal energy respectively, the upper and lower frozen layer keep melting in two directions, until it finally disappears. This stage usually starts from late Mar. and ends in late Jul. or early Aug. The characteristics of STS are: a) as the thickness of frozen layer decreases, evaporation keeps increasing until it hits the top when STS is over; b) there forms a layer of unfrozen water over the upper side of frozen layer called water over frozen layer. As frozen layer gets thinner, groundwater table goes higher. Meanwhile, water table over frozen layer falls down gradually and water storage in soil decreases.

### 1.3 Stage of freeze-free

Stage of Freeze-free (Curve EG) usually starts from late Jul. or early Aug. and ends in late Oct. when new frozen layer begins to form.

## 2 Conceptual model of soil moisture movement in seasonal frozen unsaturated zone

During the freezing process, snow cover keeps the soil warm which slows down the speed of soil freezing. This action ends up affecting the water movement process [8, 9]. During the freezing period, it is very clear that all water tends to move to the freezing frontal surface:

The quantity of moved water is little during the instable freezing stage (IFS) while it is larger, faster and deeper in stable freezing stage (SFS) [10]. When the frozen depth is stable, water storage increases significantly. After entering into instable thawing stage (ITS), the water stuck in frozen layer starts to melt from the ice surface. Under the radiation of sun, water moves upward to soil surface and evaporates even faster. While water under the frozen layer is also melted by thermal energy and leaking itself to the groundwater. After entering into freeze-free stage (FFS), since the frozen layer has already melted through and the soil surface evaporation reaches the peak, the amount of water storage in soil drops to bottom. Accordingly, groundwater table hits the top then return to steady. From the figure below, the increased amount of water stored in frozen layer can be calculated by the equation below:

$$W(t) - W(0) = \left[ \int f(t)dt + \int q(t)dt \right] - \left[ \int e(t)dt + \int r(t)dt + \int f_a(t)dt \right]$$

where,  $W(0)$ ,  $W(t)$  respectively are the beginning and end of the calculation interval;  $f$  is the average infiltration ability of calculation region;  $q$  is the amount that groundwater evaporates to recharge the soil moisture;  $e$  is the average soil surface evaporation of calculation region;  $r$  is the runoff quantity that runs out of the calculation soil;  $f_a$  is the infiltration that frozen layers leaks to groundwater.

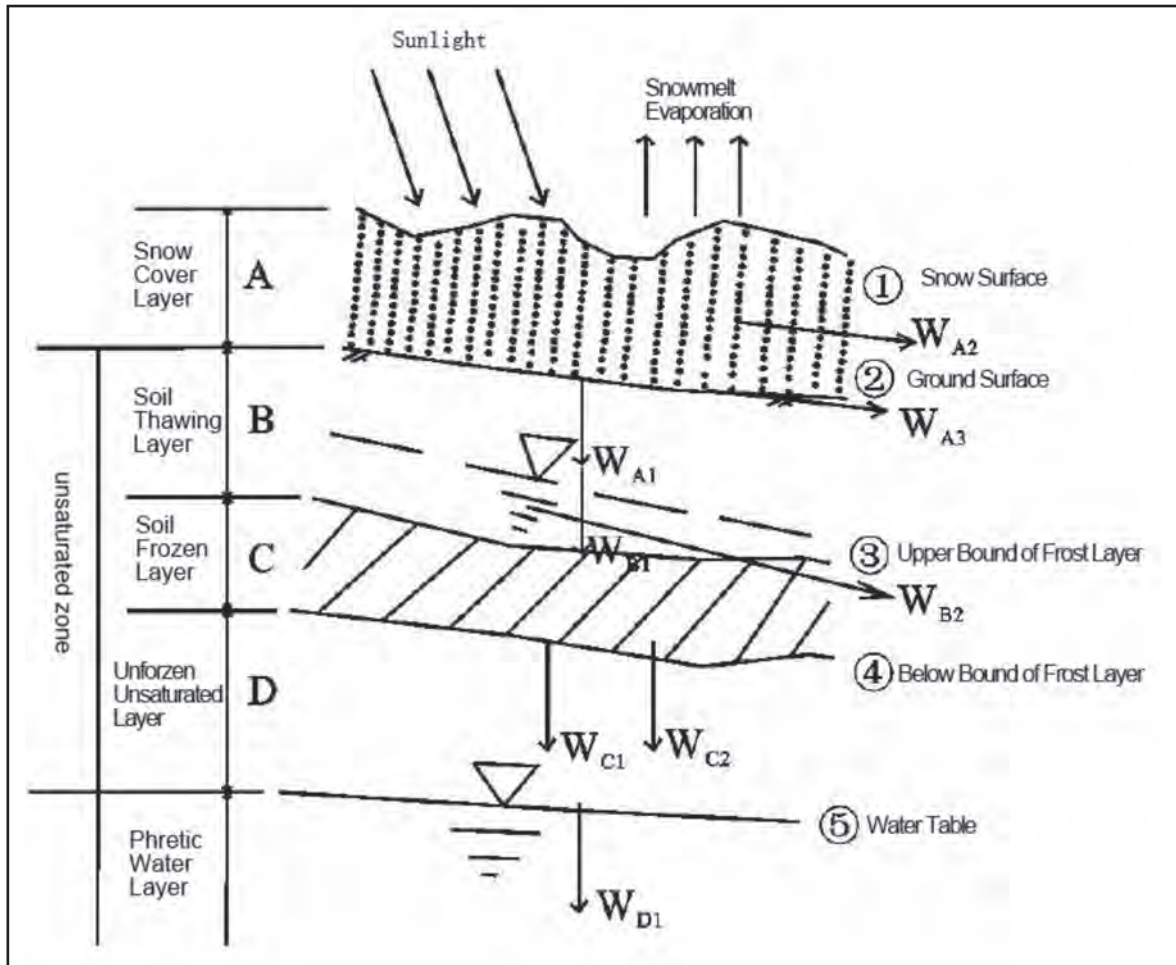


Fig. 2. Process of snowmelt water infiltration in the unsaturated frozen soil.

### 3 Characteristics and conceptual model of snowmelt water infiltration

The snowmelt water infiltration in the unsaturated frozen soil can be identified to 4 phases: infiltration in snow cover [11-13]; infiltration in soil melting layer; infiltration in soil frost layer; and infiltration in unfrozen aeration zone, as Figure 2 shown.

#### 3.1 Infiltration of snow cover layer

Under the coaction of such factors as solar radiation, temperature and wind, the snow cover starts to thaw from both surface and inside. Part of the snowmelt water evaporates, while part of it accumulates to form runoff which runs sidewise or downward: On the one hand it forms a lateral flow of snow, on the other hand the snowmelt water runs through the snow cover with the help of gravity, infiltrates itself to the ground surface which locates between snow cover layer and unsaturated layer. This is the first stage when snowmelt water starts to infiltration in spring. The water balance equation of this stage is as followed.

$$W_A = W_{A1} + W_{A2} + W_{A3} \quad (1)$$

Where  $W_A$  represents the total amount of melt water both inside the snow cover and above the snow surface ( $L^3$ );  $W_{A1}$  represents the amount of melt water that infiltrates into the lower layer ( $L^3$ );  $W_{A2}$  represents the amount of melt water inside the snow cover that runs sidewise (similar to interflow) ( $L^3$ );  $W_{A3}$  represents the amount of melt water runs sidewise near the ground surface ( $L^3$ ).

#### 3.2 Infiltration of soil thawing layer

As the snow melts in spring, the unsaturated zone starts to thaw from the top to the bottom with the increasing temperature. Yet the snow above ground surface has not melt through, the melting layer beneath the ground surface forms a layer of thawing called soil thawing layer. If there is plenty of melting water in this layer and even more than the seepage capacity of soil, part of the snowmelt water will become runoff yield under excess which runs along the surface. On account



of the seepage capacity of frozen layer is weaker than that of the soil thawing layer, when the speed of snow melting is higher than that of infiltration, water accumulates at the bottom of the soil thawing layer where part of the water becomes interflow and part of the water penetrates above the ground becomes stored-full runoff when the soil thawing layer is saturated. The water balance equation of this stage is as followed:

$$W_B = W_{A1} = W_{B1} + W_{B2} \quad (2)$$

Where  $W_B$  represents the total amount of the infiltration of melt water from the above layer, which is equal to  $W_{A1}$  (the amount of melt water that infiltrates into the lower layer) ( $L^3$ );  $W_{B1}$  represents the amount of the infiltration from the bottom of soil thawing layer to the lower layer ( $L^3$ );  $W_{B2}$  represents the amount of interflow ( $L^3$ ).

### 3.3 Infiltration of soil frozen layer

From the beginning till the end of the thawing process, the frozen layer and thawing layer usually coexists for 12 months. Due to the cementation of ground ice, the permeability of frozen layer is weaker than the thawing layer. Meanwhile, before the frozen layer freezes, the soil layer belongs to the saturated zone which means after freezing there is still pores inside this layer. So, the frozen layer is still permeable. On one hand, the stored melting water at the bottom of thawing layer accelerates the melting process of the frozen layer by transferring heat; on the other hand some of the melting water infiltrates through the frozen layer surface into the frozen layer. On account of the factors of gravity and heat, some of the infiltrating water freezes in the frozen layer, while others brings heat to melt some of the frozen layer into water which increases the amount of infiltrating water. Eventually, there is some water which runs through the whole frozen layer before the heat depletes. The water balance equation of this stage is as followed.

$$W_C = W_{B1} = W_{C1} + W_{C2} \quad (3)$$

where  $W_C$  represents the total amount of the infiltration of melt water from the upper thawing layer which equals to  $W_{B1}$  (the amount of the infiltration from the bottom of soil thawing layer to the lower layer) ( $L^3$ );  $W_{C1}$  represents the amount of the infiltration of melt water from the bottom of frozen layer to the lower layer ( $L^3$ );  $W_{C2}$  represents the amount of the exchange water

between ground ice and infiltrating water (can be positive or negative) ( $L^3$ ).

### 3.4 Infiltration from the frozen layer to unfrozen unsaturated layer

Under gravity, the snow melting water goes on infiltrating until it reaches the saturated zone. In this process, usually, side runoff does not happen. The water balance equation of this stage is as followed:

$$W_D = W_{C1} + W_{C2} = W_{D1} \quad (4)$$

where  $W_D$  represents the total amount of the infiltration of melt water from the upper frozen layer, which equals to the sum of  $W_{C1}$  and  $W_{C2}$  ( $L^3$ );  $W_{D1}$  represents the amount of infiltration from unfrozen unsaturated layer to phreatic water layer ( $L^3$ ).

## 4 Conclusions

(1) Freezing and thawing process have been divided into 3 stages: the Stage of Freezing (Instable freezing stage and Stable freezing stage), the Stage of Thawing (Instable thawing stage and Stable thawing stage) and the Stage of Freeze-free, the characteristics of which have been generalized. Based on different stages above, 3 characteristics and the relationships have been explained which include relationship between freeze-thaw-action and groundwater table, relationship between freeze-thaw-action and groundwater storage, relationship between freeze-thaw-action and soil surface evaporation.

(2) The infiltration of snowmelt water into ground, one of the most important parts and symbols of hydrologic cycle in cold area, is crucial to the researches on generation and confluence process of spring runoff, agricultural irrigation and groundwater simulation and management in cold regions. It can be reduced to 4 phases: infiltration in snow cover; infiltration in soil melting layer; infiltration in soil frost layer; and infiltration in unfrozen aeration zone. Those 4 phases are corresponding to 5 surfaces which are: the snow surface, ground surface, upper bound of frost layer, below bound of frost layer and water table.

(3) Summarizing all factors above, 2 conceptual models and relevant water quantity equation for soil moisture movement and snowmelt infiltration in seasonal frozen unsaturated zone have been built and to serve to construct figure model for further research in this field.

### Acknowledgement

- (1). Scientific Funds for Distinguished Young Scholars in Heilongjiang University (No: QT01)
- (2). Doctors' Initializing Fund in Heilongjiang University.

### References

1. Xiao Di-fang. 2008. The analysis of frozen soil hydrology method and questions. *Water Resources Research in Frigid Zone*. Harbin: Heilongjiang University Press. (in Chinese)
2. Chen Xiao-fei, Tian Jing, Zhang Xueping, et al. 2006. An overview of the researches on the coupled transport of water, heat and solute in the accumulating and melting processes of Snowpack. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28(2): 288-292. (in Chinese)
3. Shang Song-hao, Lei Zhi-dong, Yang, Shi Xiu, Wang Yi-zhao, Dong Mei. 1999. Study on soil water movement with changeable groundwater level during soil freezing and thawing. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (2): 70-74. (in Chinese)
4. Zheng Xiu-qing, Fan Gui-sheng, Xing Shuyan. 2002. *Water Movement in Seasonal Frozen Unsaturated Soil*. Geological Publishing House. (in Chinese)
5. Bian Xiao-lin, He Ping, Shi Ye-hui. 2007. The research advance in the relationship between soil frost heave and groundwater. *China Rural Water and Hydropower* (4): 24-27. (in Chinese)
6. Liao Hou-chu, Zhang Bin, Xiao Di-fang. 2008. Frozen earth hydrology characteristic in the cold area and influence to groundwater supply from frozen earth. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering* (3): 123-126. (in Chinese)
7. Lei Zhi-dong, Shang Song-hao, Yang Shi-xiu, Wang Yi, Zhao Dong-mei. 1999. Simulation on phreatic evaporation during soil freezing. *Journal of Hydraulic Engineering* (6): 8-12. (in Chinese)
8. Xiao Di-fang, Liao Hou-chu, Guo Feng. 2009. The frozen soil hydrology method and question discussed. *Research on Hydrologic Cycle and Ice Engineering in Frigid Zone*. China Water Power Press. (in Chinese)
9. Guo Zhan-rong, Jing En-chun, Nie Zhen-long, Jiao Pengcheng, Dong Hua. 2002. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period. *Advances in Water Science* (3): 298-302. (in Chinese)
10. Wei Dan, Chen Xiao-fei, Wang Tie-liang, et al. 2007. Regulation of status of frozen soil and water movement under different snow cover. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (12): 3570-3572. (in Chinese)
11. Zhou Shi-qiao, Zhong Wei Zheng-xi, Ban Jingya-gui-zi, et al. 2001. Refining measured water content values of wet snow - correcting errors arising from air temperature in the measurement by Akitaya calorimeter. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University* 24(2): 80-83. (in Chinese)
12. Zhou Shi-qiao, Zhong Wei Zheng-xi, Qiao Benzong-jiang, et al. 2001. Mathematical modeling of water percolation in snow. *Journal of Hydraulic Engineering* 32(1): 6-10. (in Chinese)
13. Zhou Shi-qiao, Zhong Wei Zheng-xi, Qiao Benzong-jiang, et al. 2004. Field measurements of the irreducible water saturation in snow. *Journal of Hydraulic Engineering* 35(2): 29-33. (in Chinese)

## Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 5 km scale in Northeast European Russia and Western Greenland

Martin Stendel<sup>1,2</sup>, Sergei Marchenko<sup>3</sup>, Jens Hesselbjerg Christensen<sup>1,2</sup>, Vladimir Romanovsky<sup>3</sup>, Ronald Daanen<sup>3</sup>, Annette Rinke<sup>4</sup>, Heidrun Matthes<sup>4</sup>, Peter Kuhry<sup>5</sup>, Felix Rivkin<sup>6</sup> and Dmitri Kaverin<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Danish Meteorological Institute, Lyngbyvej 100, Copenhagen, Denmark, 2100, mas@dmi.dk

<sup>2</sup>Greenland Climate Research Centre, Nuuk, Greenland, <sup>3</sup>Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, USA, <sup>4</sup>Alfred-Wegener-Institut für Polarforschung, Potsdam, Germany,

<sup>5</sup>Dept. of Physical Geography and Quaternary

Geology, Stockholm University, Sweden, <sup>6</sup>Open Joint-Stock Company Fundamentprojekt, Moscow, Russia,

<sup>7</sup>Institute of Biology, Komi Science Center, Ural Branch of RAS, Syktyvkar, Russia

**Abstract.** Observations and model studies indicate warming of frozen ground in many northern regions and as a consequence degradation of ice- and carbon-rich permafrost, with potentially far-reaching consequences on infrastructure and possible release of large amounts of greenhouse gases. We address these processes by using a very high resolution (4-5 km) double-downscaling version of the HIRHAM5 regional climate model (RCM). Instead of the traditional degree-day approach, we use the RCM to create boundary conditions for an advanced permafrost model, the University of Alaska GIPL2 parallel transient model. This means that the permafrost model can be run on the RCM grid, i.e. in an unprecedentedly high resolution. We compare time-slice integrations for present-day climate and two future evolutions for the PechoraRiver basin and for south-western Greenland. Temperature increase is locally much higher than in coarse resolution simulations, and late-Holocene permafrost in the Pechora River watershed is projected to thaw actively at all locations at the end of the century, whereas carbon-rich late-Pleistocene permafrost could also start to thaw at some locations.

**Keywords:** permafrost; climate change; Greenland; Russia; Pechora; regional climate model.

## Моделирование криолитозоны Северо-Востока европейской части России и Запада Гренландии с очень высоким (5 км) разрешением

Мартин Стендел<sup>1,2</sup>, Сергей Марченко<sup>3</sup>, Йенс Хессельбьерг Кристенсен<sup>1,2</sup>, Владимир Романовский<sup>3</sup>, Рональд Даанен<sup>3</sup>, Анете Ринке<sup>4</sup>, Хайдрун Маттес<sup>4</sup>, Петер Кухри<sup>5</sup>, Феликс Ривкиев, Дмитрий Каверин<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Датский метеорологический институт

Дания 2100, г. Копенгаген, ул. Лунгбувай, д. 100, e-mail: mas@dmi.dk

<sup>2</sup>Гренландский центр климатических исследований, г. Нуук, Гренландия,

<sup>3</sup>Геофизический институт Аляскинского университета, г. Фэрбенкс, США,

<sup>4</sup>Институт полярных исследований им. Альфреда Вегенера, г. Потсдам, Германия,

<sup>5</sup>Факультет физической географии и четвертичной геологии Стокгольмского университета,

Швеция, <sup>6</sup>ОАО «Фундаментпроект»,

г. Москва, Россия, <sup>7</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

**Abstract.** Данные наблюдений и моделирования указывают на повышение температуры мерзлых пород во многих северных регионах и, как следствие, деградацию криолитозоны. Оттаивание многолетнемерзлых пород с высоким содержанием льда и углерода может иметь далеко идущие последствия для инфраструктуры, а также может вызвать высвобождение большого количества парниковых газов. Эти процессы изучены нами с использованием региональной климатической модели HIRHAM5 после двойного преобразования масштаба до разрешения 4-5 км. Вместо традиционного метода градусо-дней, мы использовали региональную климатическую модель для постановки граничных условий для усовершенствованной модели криолитозоны – Параллельной Динамической Модели GIPL2, разработанной в Аляскинском университете. Это означает, что модель криолитозоны может запускаться в сетке региональной климатической модели, т.е. с беспрецедентно высоким разрешением. Мы сравнили обобщенные временные срезы геокриологических характеристик, соответствующие современным климатическим условиям и двум сценариям предполагаемых климатических изменений в бассейне р. Печоры и юго-западной части Гренландии. Результаты моделирования показывают более существенное повышение температуры для некоторых районов, чем расчеты с разрешением 25 км. В конце столетия позднеголоценовые мерзлые породы в бассейне р. Печоры будут активно оттаивать повсеместно, а местами может начаться оттаивание позднеплейстоценовых мерзлых пород, содержащих большое количество углерода.

**Ключевые слова:** криолитозона; изменение климата; Гренландия; Россия; Печора; региональная климатическая модель.

# Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 5 km scale in Northeast European Russia and Western Greenland

Martin Stendel, Sergei Marchenko, Jens Hesselbjerg Christensen, Vladimir Romanovsky, Ronald Daanen, Annette Rinke, Heidrun Matthes, Peter Kuhry, Felix Rivkin and Dmitri Kaverin

## Introduction

There is ample observational evidence for recent warming in high latitudes. Observed changes include air [1] and soil temperature [2]-[5], vegetation cover [6], sea ice [7], glacier mass balance [8] and ice sheets [9]. Many of these changes affect the permafrost body (perennially frozen ground) and the seasonally thawed layer between it and the surface, the active layer. Climate change scenarios (e.g., [10]) indicate that warming due to anthropo-genic activities will be largest in polar regions. Changes involving permafrost may affect infra-structure and regional ecosystems due to thawing of the ground and development of thermokarst depressions [11], or they may contribute to the release of large amounts of greenhouse gases from partly decomposed organic material presently frozen in the ground.

Model studies with comprehensive coupled ocean-atmosphere general circulation models (AOGCMs) show that the area of the Northern Hemisphere underlain by permafrost could be reduced substantially in a warmer climate [12]-[15]. However, thawing of permafrost, in particular if it is ice-rich, is subject to a time lag due to the large latent heat of fusion of ice which implies that permafrost in relict form can persist in deep layers for centuries or even millennia, as in western Siberia. State-of-the-art AOGCMs are unable to adequately model these processes for three reasons: (a) even the most advanced subsurface schemes rarely treat depths below 5 m explicitly, (b) soil thawing and freezing processes cannot be dealt with directly due to the coarse resolution of present AOGCMs, and (c) the required simulations covering millennia cannot be conducted due to computer power limitations.

Any attempt to model subsurface processes needs information about soil properties, vegetation and snow cover, but these are hardly realistic on a typical GCM grid. Furthermore, simulated GCM precipitation is often underestimated due to the coarse underlying topography, and as a consequence, the spatial distribution of precipitation and the proportion of rain and snow is incorrect (e.g., [16]). Fig. 1 shows as an example the topography and summer precipitation in south-west Greenland for different resolutions.

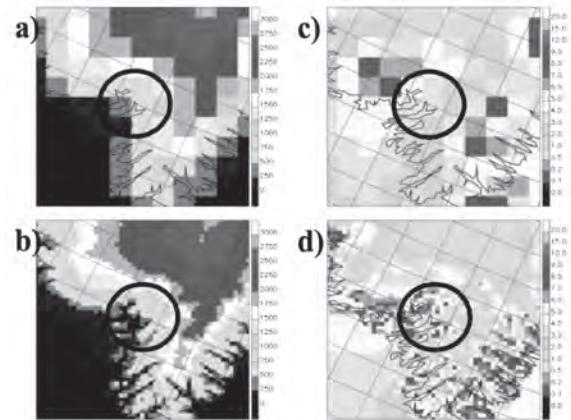


Fig. 1: Topography (m) close to Narsarsuaq in south-western Greenland for resolutions of (a) 25 and (b) 5 km. Average summer (JJA) precipitation for the period 1989-2007 for HIRHAM5 simulations with resolutions of (c) 25 and (d) 5 km. Precipitation in the fjords and valleys only starts to be resolved at 5 km (Lucas-Picher, 2011).

One possibility to overcome resolution-related problems is to use regional climate models (RCMs). Such a state-of-the-art RCM, HIRHAM5 [17],[18], has been used in this study. No specific treatment of soil freezing and thawing is done in HIRHAM, so the same limitations as for the GCM apply, and so far only studies based on frost indices have been conducted. As for coarser-scale models, these simulations also lack sufficient information about soil properties.

Therefore, instead of calculating the traditional degree-day based frost index from RCM data, we use the regional model to create boundary conditions for an advanced permafrost model. This approach, described in [19] in a proof-of-concept study, is novel in two aspects. Firstly, the RCM (and therefore the permafrost model) is run on an unprecedented horizontal resolution of 4 to 5 km for two regions covering the south-western two thirds of Greenland and the Pechora basin in north-east European Russia, respectively. Due to computer limitations using this extremely high resolution on rather large domains, we restrict ourselves to “time-slices” for present-day (1980-1999) and two future periods in the mid- (2046-2065) and end-21<sup>st</sup> century (2080-2099).



### Model hierarchy and downscaling procedure

The models used in this study are briefly described below. The driving AOGCM is the state-of-the-art coupled ocean-atmosphere model ECHAM5/MPI-OM1 [20]-[22]. All the forcing data for the Greenland simulation have been taken from a transient simulation with this model [23] at T63 resolution ( $\sim 1.8^\circ$  by  $1.8^\circ$ ). ECHAM5 does no longer require a flux correction, as opposed to previous versions of this model. [24] found in a comparison study between 14 of the CMIP3 participating models, that ECHAM5 is a top ranking model with respect to simulate present day conditions in the Arctic, including seasonal sea ice distributions.

The regional model is HIRHAM5 [17], [18], which is based on the adiabatic part of the HIRLAM (High-Resolution Limited Area Model) short-range weather forecast model [25]. For climate modeling purposes, the standard physical parameterisation of HIRLAM was replaced by that of ECHAM5, so that HIRHAM5 can be thought of as a high resolution limited area version of ECHAM5. It is not possible to directly downscale from the GCM to the 5 km grid. Therefore, the GCM data was first downscaled to 25 km [26], and HIRHAM run in a transient mode on a circumpolar domain, and then the model output was further downscaled to the target 5 km grid. The boundary forcing from the GCM is updated every six hours in a region 10 grid points wide with a simple relaxation of all prognostic variables. HIRHAM5 has been upgraded in several aspects with regard to the predecessor versions. The surface scheme has an improved interactive snow model over ice sheets and glaciers, and an ice sheet model has been added. Further planned upgrades to the snow scheme include compaction, melting and refreezing within the snow pack, snow redistribution by wind and the effect of different types of vegetation on snow accumulation.

Varying concentrations of well-mixed greenhouse gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC-11 and CFC-12) as well as ozone ( $\text{O}_3$ ), and sulphate aerosols ( $\text{SO}_4$ ) were prescribed from observations over the period 1861-2000 and according to the SRES A1B scenario [27] thereafter. In this scenario, the  $\text{CO}_2$  concentration in 2100 is near 700 ppm, and the globally averaged warming with respect to present-day climate is  $3.5^\circ\text{C}$ .

To model regional permafrost we have used the GIPL 2 model (Geophysical Institute Permafrost Lab) of the University of Alaska Fairbanks [28], which is a one-dimensional, spatially distributed, physically based, multi processor numerical model for the solution of

the non-linear heat transfer equation. The model solves for ground temperatures and active layer thickness, the input data are air temperature, snow water equivalent and density, soil composition, water content and thermal properties as well as characteristics of vegetation cover, geomorphologic features and the geothermal flux as a bottom boundary.

### Future evolution of permafrost

As discussed above, the driving GCM for the HIRHAM simulation is a coupled atmosphere-ocean model, i.e. the atmosphere is forced by modelled SSTs and sea ice concentrations rather than by observed ones. This implies that in order to assess variability and change, the considered periods need to be long enough, i.e. cover several decades. We consider two twenty year averages for periods in the 21st century (2046–2065 and 2080–2099) with respect to modelled present-day conditions (1980–1999). These time slices can be compared to results from the transient 25 km simulation mentioned above [26].

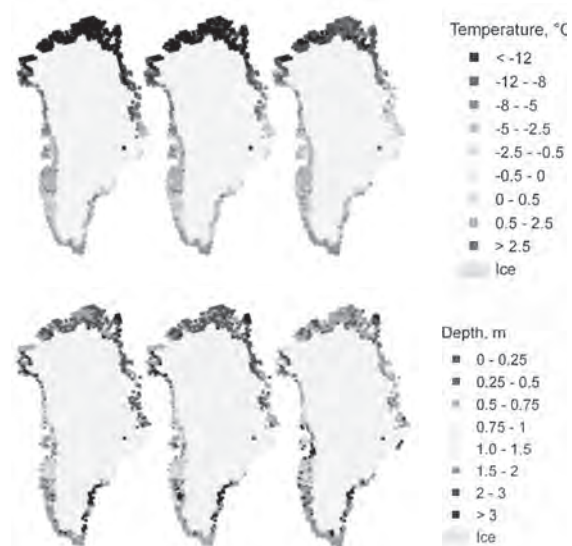


Fig. 2: Top: Annual average ground temperature distribution at 2 m depth. Bottom: Active layer depths. Values for sediment with organic matter. Average over the periods 1955-1965, 1995-2005, and 2065-2075, 25 km run.

The evolution of ground temperatures depends on the thermal properties of the subsurface material. As an example, Fig. 2 shows the temperature distribution and active layer depth on the 25 km scale for sediment with organic matter, which is generally found in Greenland in between the areas of bedrock. Due to the offset as a result of thermal conductivity differences between thawed and frozen porous media, the

sediment run (all cells have sediment properties) is generally colder than the bedrock run. For the period 2065-2075, compared to 1995-2005, the temperature at 2 m depth in sediment is projected to increase by 2 K.

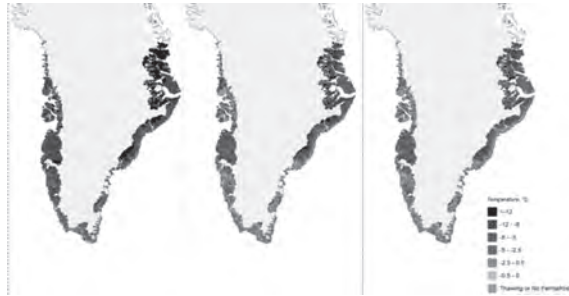


Fig. 3. Top: Mean annual temperature distribution at 1 m depth over the periods 1980-1999, 2046-2065 and 2080-2099, 5 km run.

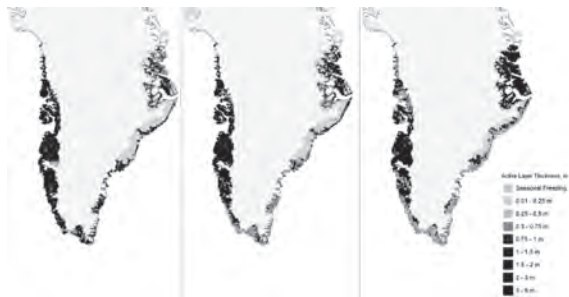


Fig. 4. Top: Active layer thickness over the periods 1980-1999, 2046-2065 and 2080-2099, 5 km run.

Figures 3 and 4 show results from the new 5 km simulation, which is covering the southern parts of Greenland. Analysis of these results reveals a small cold bias compared to present-day observed data. More remarkably, the high resolution results show much stronger degradation of permafrost by the end of the 21<sup>st</sup> century. This degradation is much more pronounced in coastal areas than further inland and decreases towards the ice sheet. Such a feature is completely absent in the results using lower resolution (25 km) forcing.

Another striking difference between the low and the high resolution simulation is the considerably more substantial degradation of permafrost along the west coast of Greenland, even in higher latitudes. These results indicate that permafrost degradation may already be ongoing by the end of the 21<sup>st</sup> century as far north as Upernavik. Active layer depths show a strong gradient decreasing from the coastal regions towards the ice sheet, in particular along the east coast. Also these features do not at all show up in the 25 km resolution. In particular along the west coast, the degradation

of permafrost is probably still underestimated, since part of the sediment is marine silty clay, in particular around Ilulissat and Sisimiut. This material is much more sensitive to warming even at relatively low temperatures just below the freezing point.

A similar comparison for the Pechora river basin in north-eastern European Russia is underway, so that we can present a comparison of the situation in Russia and in Greenland.

### Conclusions

We can define a permafrost thaw potential as the potential active layer depth increase from present to future conditions. Fig. 5 shows that most of the not-ice covered part of Greenland is at risk of permafrost degradation, with decreasing risk from south to north.



Fig. 5. Permafrost thaw potential for Greenland. High thaw potential corresponds to an active layer depth increase of more than 2.5 m.

For Sisimiut and Ilulissat, the assessment gives rather realistic results. In Sisimiut, permafrost within the marine silty clay will be, with an increase of the active layer depth of ca. 4.5 m, actively degrading. For Ilulissat, the increase of active layer depth will as well likely not support the construction of larger buildings on sediment.

The approach will be extended to the modelling site in north-east European Russia. We conclude that there is a considerable potential in very high resolution permafrost modeling.

### Acknowledgments

The ECHAM/MPI-OM and HIRHAM simulations were conducted on DMI's supercomputers (NEC-SX6 and Cray XT5, respectively). The Greenland simulation was sponsored by the Danish Environment Agency (Miljøstyrelsen) under grant no. M127/001-0237.

## References

1. Moritz, R.E., C.M. Bitz, and E.J. Steig. 2002. Dynamics of recent climate change in the Arctic. *Science* 297: 1497-1502.
2. Majorowicz, J.A., Skinner, W.R. 1997. Potential causes of differences between ground and surface air temperature warming across different ecozones in Alberta, Canada. *Glob. Plan. Change* 15: 79-91.
3. Osterkamp, T.E., Romanovsky, V.E. 1999. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska. *Permafrost. Perigl. Proc.* 10: 17-37.
4. Romanovsky, V.E., Burgess, M., Smith, S., Yoshikawa, K., Brown, J. 2002. Permafrost temperature records: indicator of climate change. *Eos* 83: 593-594.
5. Osterkamp, T.E. 2003. A thermal history of permafrost in Alaska. In: Phillips, M., Springman, S.M., Arenson, L.U. (Eds.), *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Permafrost, July 21-25, 2003, Zurich, Switzerland*. A.A. Balkema: The Netherlands, pp. 863-868.
6. Sturm, M., Racine, C., Tape, K. 2001. Climate change: increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411: 546-547.
7. Bjorgo, E., Johannessen, O.M., Miles, M.W. 1997. Analysis of merged SMMR/SSM/I time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978-1995. *Geophys. Res. Lett.* 24: 413-416.
8. Arendt, A.A., Echelmeyer, K.A., Harrison, W.D., Lingle, C.S. and Valentine, V.B. 2002. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level. *Science* 297: 382-386.
9. Rignot, E. and P. Kanagaratnam. 2006. Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science* 311: 986-990.
10. Christensen, J.H. et al. 2007. Regional climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (Ed. by Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L.), Cambridge University Press.
11. Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W., Gavrillov, A.V., Tumskoy, V.E., Tipenko, G.S. and Grigoriev, M.N. 2000. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea region, Russia. *Permafrost. Periglac. Proc.* 11: 137-152.
12. Smith, S.L., Burgess, M.M. 1999. Mapping the sensitivity of Canadian permafrost to climate warming. *Proc. IUGG 99 Symp. HS2, vol. 256*. IAHS Publications, pp. 71-80.
13. Anisimov, O. et al. 2001. Polar Regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability Panel on Climate Change, Contribution of Working Group II of the Intergovernmental, Third Assessment Review*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 801-841.
14. Nelson, F.E., O.A. Anisimov and N.I. Shiklomanov. 2001. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature* 410: 889-890.
15. Stendel, M. and Christensen, J.H. 2002. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM. *Geophys. Res. Lett.* 29, 10.1029/2001GL014345.
16. Christensen, J.H. and Kuhry, P. 2000. High-resolution regional climate model validation and permafrost simulation for the East European Russian Arctic. *J. Geophys. Res.* 105, 29647-29658.
17. Lucas-Picher, P. 2011. Very high-resolution regional climate modelling over Greenland with HIRHAM5. In preparation.
18. Mottram, R.H., G. Adalgeirsdottir, P. Lucas-Picher, M. Stendel, O.B. Christensen, J.H. Christensen and K. Steffen. 2011. Surface mass balance of the Greenland Ice Sheet 1989-2005 using the regional climate model HIRHAM5. In preparation.
19. Stendel, M., Romanovsky, V.E., Christensen, J.H. and Sazonova, T. 2007. Global warming and permafrost: Closing the gap between climate model simulations and local permafrost dynamics. *Glob. Plan. Change*, 56, 203-214.
20. Roeckner, E. et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description. *Max Planck Institute for Meteorology Report* 349, 127 pp.
21. Marsland, S.J., Haak, H., Jungclaus, J.H., Latif, M. and Roeske, F. 2003. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling* 5: 91-127.
22. Jungclaus, J.H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.-J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U. and Roeckner, E. 2006. Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *J. Climate* 19: 3952-3972.
23. May, W., 2007. Climatic changes associated with a global "2°C-stabilization" scenario simulated by the ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Clim. Dyn.* 31: 283-313.
24. Walsh, J.E., W.L. Chapman, V. Romanovsky, J.H. Christensen, and M. Stendel. 2008: Global Climate Model Performance over Alaska and Greenland. *J. Climate* 21, 2156-2174, doi: 10.1175/2008JCLI2163.1.
25. Källén, E. (ed.), 1996. *HIRLAM Documentation Manual, System 2.5*. Swed. Meteorol. and Hydrol. Inst., Norrköping, 126 pp.
26. Stendel, M., J.H. Christensen and D. Petersen, 2008. Arctic climate and climate change with a focus on Greenland. In: Meltofte, H., T.R. Christensen, B. Elberling, M.C. Forchhammer and M. Rasch (eds.): *The dynamics of a High Arctic ecosystem in relation to climatic variability and change - Ten years of monitoring and research at Zackenberg Research Station, Northeast Greenland*. *Adv. in Ecol. Res* 40, 13-43, doi: 10.1016/S0065-2504(07)00002-5., Elsevier.
27. Nakicenovic, N. et al., 2000. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599 pp.
28. Sergeev, D.O., G.S. Tipenko, and V.E. Romanovsky. 2003. Mountain permafrost thickness evolution under influence of long-term climate fluctuations (results of numerical simulations). In: Phillips, Sringman, and Arenson (eds). *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Balkema, Zurich: 1017-1021.

## Understanding retrogression behaviour of thaw slumps

Baolin Wang

Geological Survey of Canada  
601 Booth St., Ottawa, ON, Canada, K1A 0E8, e-mail: [bwang@nrcan.gc.ca](mailto:bwang@nrcan.gc.ca)

**Abstract.** Understanding the behaviour of retrogressive thaw slumps is important for mitigation of such slumps and for proper design of cut slopes in permafrost of fine sediments. A study has been carried out to monitor the retrogression rate of 18 thaw slumps. The results indicated that the retrogression rate increases with the increase of the height of the scarp walls up to certain limit. The retrogression diminishes where the scarp walls decrease to below certain height. A correlation between the thaw slump retrogression and scarp wall height is presented. The study result also confirmed that thaw slump retrogression rate does not have preference over slope facing direction.

**Keywords:** thaw slump; retrogression; scarp height; slope orientation; permafrost.

## Изучение закономерностей отступления оползней протаивания

Баолинъ ВАН

Геологическая служба Канады  
Канада K1A 0E8, Онтарио, г. Оттава, 601 Бут Ст., e-mail: [bwang@nrcan.gc.ca](mailto:bwang@nrcan.gc.ca)

**Аннотация.** Понимание закономерностей формирования и развития отступающих оползней протаивания необходимо для разработки мер по уменьшению их негативного влияния на инженерные сооружения, а также для расчетов устойчивости откосов выемок в мелкодисперсных многолетнемерзлых грунтах. Нами проводятся мониторинговые наблюдения за скоростью отступления 18 оползней протаивания. Выявлено, что скорость отступления оползней протаивания возрастает с увеличением высоты их уступа до определенного значения. При уменьшении высоты уступа оползнь ниже определенного значения отступление замедляется. Представлена корреляционная зависимость между скоростью отступления оползней от высоты ее уступа. Результаты наблюдений подтвердили полученный ранее вывод об отсутствии зависимости скорости отступления оползней протаивания от экспозиции склона.

**Ключевые слова:** оползень протаивания; отступление; высота уступа; экспозиция склона; криолитозона.



# Understanding retrogression behaviour of thaw slumps

Baolin Wang

## Introduction

A retrogressive thaw slump consists of a steep headwall and a debris flow. The headwall retreats in a retrogressive fashion due to thawing. The debris flow is formed by the mixture of thawed sediment and meltwater that slides down the face of the headwall and flows away [1]. Such slope failures constantly occur in the Mackenzie Valley, Northwest Territories, Canada. Wang et al. [2] reported 97 active slope failures counted during a single site reconnaissance trip to the northern part of the Mackenzie Valley in June 2005. The majority of those failures were retrogressive thaw slumps. Fig. 1 shows a typical example. Thaw slumps may start from a slope failure as small as a few meters diameter and retrogress over a distance as large as a few hundred meters. They alter local landforms and have caused damage to facilities, e.g., pipelines or highways [3].

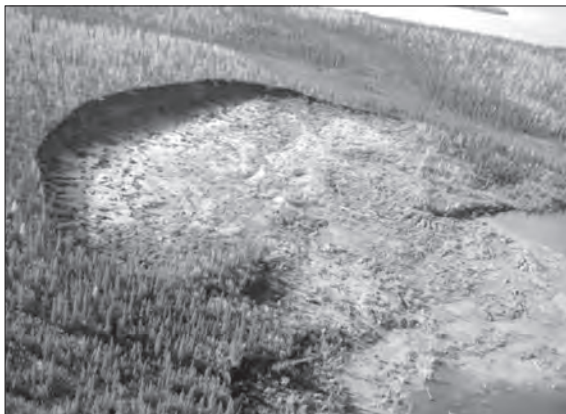


Fig. 1. A typical retrogressive thaw slump.

Understanding the failure processes and documenting the retrogression rate are important for developing appropriate mitigation measures. A field monitoring program was started at the Geological Survey of Canada (GSC) in 2007 to investigate the retrogression behaviour of the thaw slumps in the Mackenzie Valley. A total of 18 locations at 13 thaw slump sites were monitored during the first year 2007. Survey stakes were installed at locations towards where the scarp walls were retrogressing. The distances of the scarps from the stakes were measured at the beginning and end of the summer thawing season. The first year (2007) monitoring data demonstrated a promising trend and pattern that was published in paper [4]. The monitoring

program continued for two more years in 2008 and 2009. Additional five thaw slumps were monitored in 2008 and 2009 for a total of 18 slumps monitored. This paper presents the updated results.

## Study Sites

The thaw slumps monitored are located in the northern part of the Mackenzie Valley, Northwest Territories, Canada (Fig. 2). The sites are representative of the retrogressive thaw slumps observed in the region. Seven of the sites were in north of Inuvik, and 12 were in south of Inuvik. The northern sites are in Inuvialuit Settlement Region and are depicted as I1 to I5. The southern sites are in Gwich'in Settlement Region and are depicted as G1 to G12. Most of the thaw slumps were monitored with one survey stakes installed above the head scarp with exemptions at I1 where two locations were monitored around the scarp wall and at G1 where three locations were monitored around the scarp.



Fig. 2. Locations of the study sites.

Most of the northern sites (I Series) were in tundra area with few or no trees, whereas the southern sites (G series) were in forested areas. The ground in the northern region is typically covered by a layer of organic mat of about 15 to 30 cm thick (locally thinner or thicker) that consists of roots or moss. The materials exposed from the scarps of the slumps are clayey silt or silty clay with trace sand and gravel and occasional cobbles (glacial till deposit). The active layer is about 0.5 m thick underlain by ice-rich permafrost.

The southern sites (G series) were in forested areas. However, most of the sites were burned and trees and vegetation were destroyed by forest fires about a decade ago. There was no sign of any recent fire activity at sites G4 and G8 where mature trees were observed (e.g., Fig. 1). The soil materials from the scarps were mostly silty clay. The active layer was about 1 m thick in the burned areas and thinner in the unburned areas where undisturbed vegetation provided better insulation to the subsurface soils.

All the sites monitored are in continuous permafrost region, where permafrost extends to a great depth (in the order of hundred meters according to Taylor et al. [5], and Smith and Burgess [6]. The fine-grained permafrost soils are usually ice-rich.

Historical weather data in Inuvik are available from Environment Canada [7]. The weather stations are about 30 km from the nearest site in the north and about 90 km from the nearest site in the south. A total of 52 years (1958 to 2009) data were obtained. The minimum and maximum Mean Annual Air Temperatures (MAAT) and air thawing indices ( $I_{at}$ ) are provided in Table 1. The MAAT and  $I_{at}$  for the study years of 2007, 2008 and 2009 are given in Table 2.

Table 1. Historical weather data (1958-2009)

Description	MAAT (°C)	$I_{at}$ (°C·day)
Minimum	-11.8	939
Average	-8.8	1,309
Maximum	-4.5	1,822

Table 2. Weather data of study period (2007-2009)

Description	MAAT (°C)	$I_{at}$ (°C·day)
2007	-7.6	1,376
2008	-7.7	1,212
2009	-7.7	1,306

As noted in Tables 1 and 2, the air temperature conditions in 2007, 2008 and 2009 were around the historical normal conditions. The MAAT was slightly lower by 0.1°C for 2008 and 2009 than for 2007. The  $I_{at}$  was also slightly lower for those two years. However, the differences are marginal compared to the historical variations shown in Table 1.

### Retrogression Rate vs. Scarp Height

The annual thaw retrogression rates of the slumps were measured with survey stakes for three consecutive years from 2007 to 2009. The distance between the survey stakes and the scarp

walls were measured with measuring tap twice a year: once at the beginning of the summer thaw season and another at the end of the thaw season. Also measured were the heights of the scarp walls each time when the distances to the survey stakes were measured.

Fig. 3 presents the annual retrogression rates measured during the three-year study period. The retrogression rates are plotted against the height of the scarp walls. As noted from this figure, the distribution of the later 2008-2009 data follows the pattern established from the 2007 data. The upper limit of the data increased from about 10 m/year for the 2007 data to about 15 m/year for the 2008 and 2009 data. The three-year data are more scattered than the first year data, which was expected with more data becoming available.

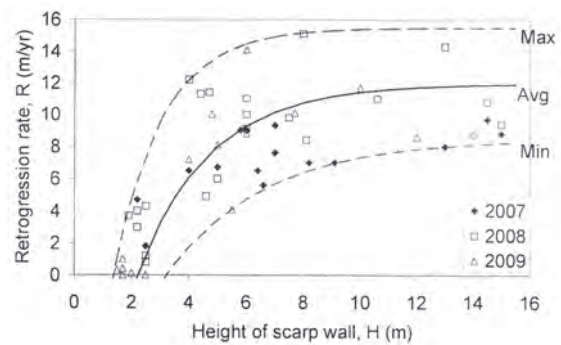


Fig. 3. Retrogression rate vs. scarp height.

As noted earlier, the average annual air temperatures for 2008 and 2009 were very close to that of 2007. It is therefore unlikely that the air temperature contributed to the increase of the upper limit of the data. Based on the slightly lower air thawing indices in 2008 and 2009 (Table 2), the retrogression rates should have dropped slightly, which was actually not the case. The increase of the upper data limit should therefore be considered as normal data scattering. Nevertheless, given the three-year duration of measurements and normal air temperature conditions, the retrogression rates measured are believed to be representative of normal rates in the region. Based on this set of data, the preliminary correlation presented by Wang et al [4] based on the 2007 data has been updated using the current three year data as follows:

$$R = a - b * e^{(-H/c)} \quad (1)$$

Where R denotes distance of scarp wall retrogression rate (m/year); H is height of scarp wall (m); and a, b, and c are fitting constants with values given in Table 3.

Table 3. Correlation constants in Eq. 1

Constant	Lower Bound	Average	Upper Bound
a	8.5	12.0	15.5
b	22.0	28.5	35.0
c	3.4	2.6	1.7

A correlation between thaw retrogression and slope angle was presented in Wang et al. [4]. However, it was pointed out that the correlation with slope angle was less meaningful than that with scarp wall height. The new data confirmed this point. Further correlation with slope angle was not found from the extended monitoring data.

Thaw retrogression is associated with melting of ice-rich permafrost exposed. Ablation continues along the scarp wall in summer as long as there is enough ice-rich material in the wall. Depending on the water content, the ablated materials build up at the toe of the wall covering part or the entire ice-rich surface. Lower scarp walls tend to retreat slower because in most of those cases, the ice-rich materials are covered or partially covered by the debris. The materials from the active layer have lower water content compared to those from the permafrost where soil contains high water/ice content. The ice-rich soil behaves like a “slurry” when melted and flows away relatively quickly from the scarp [2]. When the “slurry” is mixed with the materials fallen off from the upper active layer, its fluidity decreases resulting in a decreased flow rate of the debris. This causes the debris to aggrade at the toe of the scarp. The debris build-up reduces the amount of ice-rich permafrost being exposed and therefore a reduced amount of “slurry” generated. This further decreases the fluidity of the “slurry mix” and hence more aggradation. On the other hand, as the debris builds up, its weight increases. When the build-up is high enough, the mass slides away driven by its own weight. Thus, the covered ice-rich permafrost along the toe of the wall is re-exposed, and melting is accelerated until it is covered again. The cycle repeats throughout the summer.

In summary, the retrogression rate is higher with higher scarp walls. The reasons are: (a) the accumulating debris cannot build up high enough at the toe of the scarp wall to block the ice-rich permafrost from melting; (b) the materials falling off the scarp wall may have overall higher water content and, therefore, can flow more easily. This can be due to a higher ratio of ice-rich permafrost to active layer (about 0.5 to 1 m thick in the study region) materials in the mixed mass. This process explains that once the scarp wall reaches a certain height, ablation is at its full

potential throughout the summer and a maximum retrogression occurs.

Fig. 3 indicates that the maximum retrogression may occur for scarp walls higher than about 6 m.

#### Retrogression Rate vs. Slope Orientation

The orientations of the scarp walls were also measured where retrogression was monitored. The relationship between retrogression and wall facing direction is shown in Fig. 4. A trajectory drawn from the coordinate origin to any data point indicates the direction and distance of retrogression at that point. As indicated by Wang et al. [4], the retrogression was not influenced by the slope orientation observed from the first year (2007) data. This conclusion was strongly supported by the extended monitoring data from 2008 and 2009. As shown in Fig. 4, the retrogression rates are fairly evenly distributed in all directions.

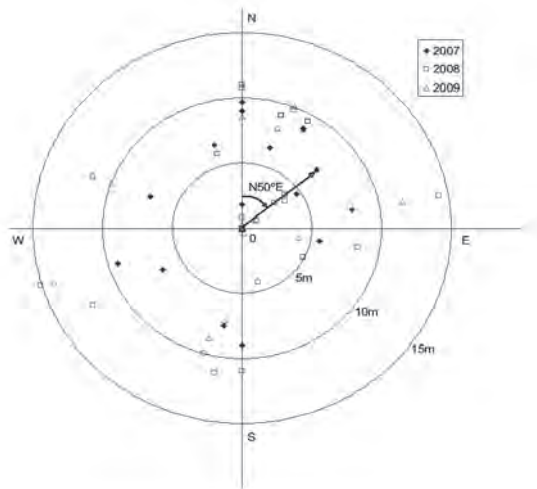


Fig. 4. Retrogression rate vs. slope direction.

#### Conclusions

Retrogression behaviour of 18 thaw slumps in the Mackenzie valley was monitored for three years (2007-2009). The thaw slump retrogression rate increases with the increase of scarp wall height. The retrogression rate starts to reach its maximum when the scarp wall is about 6 m or higher. The maximum retrogression can be as high as 15 m/year. The average air temperatures during the three monitoring years were very close to the historical average conditions. The three-year monitoring data are believed to be representative.

The monitoring data confirmed that the thaw slump retrogression has no preference over slope facing direction. There is strong evidence showing that north facing slopes do

not necessarily retrogress slower than the south facing slopes.

### Acknowledgement

The author would like to thank B. Paudel and H. Li for their assistance on installation and measurements of the survey stakes in 2007. They co-authored the earlier paper for the first year data. They also participated in some field works and assisted field measurements in 2008.

### References

1. Everdingen, R.V. 2002. *Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology.
2. Wang, B, Nichol, S, Su, X. 2005. Geotechnical field observations of landslides in fine-grained permafrost soils in the Mackenzie Valley, Canada. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G. (eds). *Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides*. Washington, DC, Chapter 25, 203-212.
3. Ma, W., Niu, F., Akagawa, S., Jin, D. 2006. Slope instability phenomena in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Landslides* 3: 260-264.
4. Wang, B., Paudel, B. and Li, H. 2009. Retrogression characteristics of landslides in fine-grained permafrost soils, Mackenzie Valley, Canada. *Landslides* 6: 121-127.
5. Taylor, A.E., Burgess, M.M., Judge, A.S., Allen, V.S. 2000. Deep ground temperatures. In: Dyke, L.D., Brooks G (eds). *The Physical Environment of the Mackenzie Valley, Northwest Territories: A Base Line for the Assessment of Environmental Change*. Geological Survey of Canada, Bulletin 547, pp. 105-109.
6. Smith, S.L., Burgess, M.M. 2002. A digital data-base of permafrost thickness in Canada. *Geological Survey of Canada*, Open File 4173; 38 pages, 1 diskette.
7. Environment Canada 2011. [http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada\\_e.html](http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_e.html) [accessed Feb. 11, 2011].



# Influences of vegetation degradation on the ground moisture and thermal regimes at the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau

Junfeng WANG, Qingbai WU

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences

Donggang West Road 320, Lanzhou, Gansu, China 730000, E-mail: wangjf2008@lzb.ac.cn

**Abstract.** In permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau, the vegetation degradation would change the surface energy balance and consequently influence the moisture and thermal regimes in the active layer significantly, leading to the positive or negative feedbacks to the carbon cycling. This paper aims to clarify the interactions by considering different spatial (intra-site with different degraded vegetation) and temporal (seasonal versus annual) scales with reference to wet meadow with different degraded vegetations. For this reason, the non-degraded and severely degraded wet meadows were instrumented and monitored at the Fenghuoshan region on the Qinghai-Tibet Plateau to measure the ground temperatures and soil moistures at different depths during one complete year. The results demonstrate that the active layers underlying different degraded vegetations have significant differences of the freezing and thawing start time and freezing duration. The vegetation degradation has shifted the thawing start time to an earlier date, thus shortened the freezing duration, meanwhile the twoway migration processes of soil moistures and the capability of accumulating cold energy of the active layer also weakened, resulting in the rise of accumulated temperature in the active layer and the decrease of the stability of the permafrost. The vegetation degradation has become one of the main factors of causing the permafrost degradation.

**Keywords:** wet meadow; degradation; active layer; moisture and thermal regimes; Qinghai-Tibet Plateau

## Влияние деградации растительности на температурный и влажностный режим грунтов в криолитозоне Цинхай-Тибетского нагорья

Цзюньфэн ВАН, Цинбай У

Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов АН КНР  
Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: wangjf2008@lzb.ac.cn

**Аннотация.** Предполагается, что деградация растительности в криолитозоне Цинхай-Тибетского нагорья может привести к изменению условий теплообмена на поверхности. Это в свою очередь будет оказывать существенное влияние на тепловой и влажностный режимы грунтов деятельного слоя, ведя к положительным или отрицательным обратным связям с кругооборотом углерода. Целью данной работы является выявление таких взаимодействий в различных пространственных (участки с разной степенью деградации растительности) и временных (сезонные и годовые) масштабах на примере влажных лугов. В районе Фэнхошань на Цинхай-Тибетском нагорье были оборудованы площадки на участке с исходной растительностью и на участке, где наблюдается деградация растительности. В течение одного годового цикла измерялись температура и влажность грунтов на разных глубинах. Результаты исследований показали, что на площадках с разной степенью деградации растительности начало промерзания и оттаивания, а также продолжительность периода промерзания деятельного слоя существенно различаются. Деградация растительности вызвала более раннее начало протаивания грунтов и соответственно сократила период промерзания. Также наблюдалось ослабление процессов двусторонней миграции влаги и способности аккумуляции запасов «холода» деятельного слоя, что привело к повышению температуры грунтов деятельного слоя и снижению устойчивости многолетнемерзлых пород. Таким образом, деградация растительности явилась одним из основных факторов деградации многолетней мерзлоты.

**Ключевые слова:** влажные луга; деградация; деятельный слой; температурный и влажностный режимы; Цинхай-Тибетское нагорье.

# Influences of vegetation degradation on the ground moisture and thermal regimes at the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau

Junfeng WANG, Qingbai WU

## Introduction

On the Qinghai-Tibetan Plateau, the alpine meadow ecosystems mainly distributed in the headwater areas of the Yellow, Yangtze and other major river systems and, its ecological barrier function is very important for the protection of the ecological environments. However, the alpine meadow ecosystems are fragile and have undergone degradation seriously in recent years with the intensification of global warming and disturbances from natural and human [1]. From analyzing the satellite remote sensing data of 1969, 1986, 2000 and 2004, it can be found that the vegetation degradation is universal on the plateau [2], and the trend of degradation is exacerbating.

As a linkage between the permafrost and atmosphere for exchanging material and energy, the active layer plays an important role on the surface energy balance in permafrost regions, plant growth and ecosystems, hydrological cycle and the carbon dioxide fluxes [3]. Its development and preservation were of great importance to maintain the ecological balance on the Qinghai-Tibetan Plateau [4]. Vegetation condition is one of the most important components of the surface features and it must be clarified that the influences of the vegetation change on the soil moisture and thermal changes in the active layer of permafrost.

The active layer of permafrost and the surface vegetation interacted basing on "water and heat" as a linkage. Therefore, the present paper aims to demonstrate the soil moisture and thermal changes in the active layer and to reveal the influences of the vegetation degradation on them through a data set collected over a complete year.

## Study site

The study area (34°43'N, 92°53'E) is located in the Fenghuoshan region on the Qinghai-Tibet plateau. At this region, the continuous permafrost occurs with an active layer ranging between 1.2m and 2.0m. The annual temperature of permafrost is between -1°C and -4°C, and the depth of permafrost is between 50m and 130m [5]. The climate is characterized by a plateau monsoon climate, with mean annual air temperatures of around -5.5°C, annual average precipitation of around 269.7 mm, of which 83.2% occurring in

July and August, annual evaporation of around 1477.9 mm and annual average sunlight of around 3564 h.

In the study area, the wet meadow vegetations suffered from different degradation. For the non-degraded wet meadow, the vegetation is mainly composed of *Stipa aliena*, *Kobresia tibetica*, *Festuca sp*, *Carex atrofusca* and *Leontopodium leontopodioides*, with coverage of 96.3% and aboveground and belowground biomasses of 178.54 gm<sup>-2</sup> and 2297.76 gm<sup>-2</sup> in average respectively. For the degraded wet meadow, the vegetation is mainly composed of *Carex atrofusca*, *Leontopodium leontopodioides* and *Androsace tapete* with coverage of 43.5%, and aboveground and belowground biomasses of 117.3 gm<sup>-2</sup> and 1653.4 gm<sup>-2</sup> in average respectively.

## Materials and methods

In the study area, one site with non-degraded vegetations and another with degraded vegetations were selected with a datalogger for this investigation. In each site, three plots were chosen randomly and the annual active layer thermal regime was monitored by thermistors installed at different depths, respectively, 5, 20, 30, 40, 60, 90 and 160 cm at each plot. In this study, the depth of 5 cm was chosen for the ground surface temperature (GST) measurement because it is the minimum depth reachable without damaging the surface characteristics in the wet meadow soil. The thermistors were calibrated before using with an accuracy of ±0.05°C and a resolution of 0.01°C. The annual active layer soil moisture regime was determined by five frequency domain reflectometries (FDR, Eijkelamp Company, Netherlands) with an accuracy of ±2% at the depths of 5, 20, 30, 40 and 100cm respectively at each plot. To minimize the error in placing the thermistors and FDRs, the depth was accurately measured (±1 mm). The data were recorded every 30min with a Campbell CR1000 datalogger, and using these data, hourly and daily means were calculated. The measurements started on 6 September 2007 and finished on 7 November 2008.

Following the protocol proposed by Guglielmin [6], different parameters were computed to describe the ground moisture and thermal regimes of the analyzed soils: i) the mean monthly and

annual temperature at the soil surface and the bottom of vegetation root zone, ii) number of isothermal days, iii) number of frozen days, iv) number of thawed days, v) number of freeze–thaw days, vi) freezing degree days, vii) thawing degree days, viii) growing degree days (sum of degree days above 3°C, according to Wang and Zhou[7]), ix) annual ground temperature amplitudes and accumulative temperatures.

All data were analyzed using General Linear Model (Origin 7.5, Origin Lab Corporation, USA) to assess the significance of the impacts of vegetation degradation on the soil moistures and temperatures. The significant differences of the soil moistures and temperatures for the non- or degraded wet meadows were assessed by One-way ANOVA and Least Significance Difference (LSD). All significances mentioned in the text were at the 0.05 level.

## Results

### Temperature regimes

In the experimental site, the depth of 5cm is the minimum depth reachable without damaging the surface characteristics and 40cm is generally the bottom of the root zone for the wet meadow vegetation. The temperatures at these two depths are representative to evaluate the impacts of the vegetation degradation on the permafrost environment. So these two depths were selected to investigate the influences of the vegetation degradation on the thermal regimes.

The study showed remarkable differences of the mean annual temperatures at the depths of 5cm and 40cm at the sites with non- or degraded vegetation. The mean monthly temperatures (Table 1) and their annual amplitude (Table 2) revealed that the non-degraded site were colder in warm seasons (From May to Sept), but warmer in cold seasons (from Oct to Apr of next year) contrasted with the degraded one. Vegetation degradation caused the temperature amplitudes to increase significantly.

The freezing regime parameters of the plots are shown in Table 3. It can be seen that there are significant differences in the number of isothermal days between the sites with non- or degraded vegetations. At the 5cm depth, the frozen days were nearly equal and mainly concentrated between October and May of next year for the non- or degraded plots, but the freezing processes was completed almost one week earlier at the plots with degraded vegetation. Compared with the plots with non-degraded vegetations, the freeze-thaw days were longer at the degraded one, which mainly occurred in October and May to June. The thawed days ranged between 118

(degraded site) and 123 (non-degraded site) and mainly concentrated between late June and mid-October.

At the 40cm depth, except that the frozen days were the same, the parameters of the “isothermal days”, the “thawed days” and the “freeze-thaw” days were all different significantly between the non-degraded site and the degraded one. At the degraded site, the “isothermal days” were seven days fewer, the freezing process was completed about twenty-five days earlier and the thawing process was completed nearly forty days earlier than those at the non-degraded one. Moreover, the site with non-degraded vegetation was of longer freeze-thaw days, ranging between 31 (non-degraded site) and 13 (degraded site).

### Soil moisture regimes

The soil moisture regimes measurements over a year at the sites with non- or degraded vegetations differed markedly (Fig. 1). The contour maps clearly depict the change process of soil moistures. At the depth of 5cm, the soil moisture was higher at the site with non-degraded vegetations than that at the degraded one during the thawed days, while in the frozen days, the soil moisture was frozen as a solid state, the isolines were similar. At the depth of 40cm, the soil moisture was higher at the site with non-degraded vegetations than that at the degraded one.

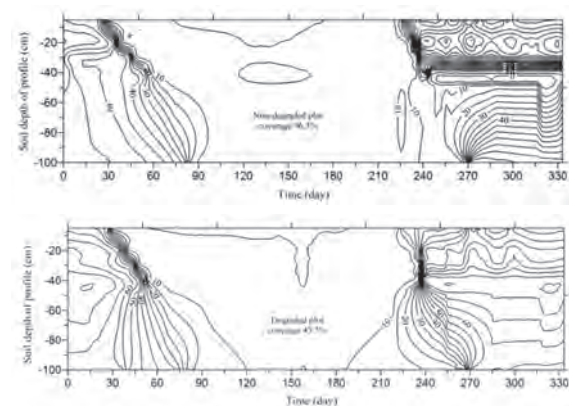


Fig. 1. Isolines of soil moisture at the sites with non- or degraded vegetations. Data are means of samples of three plots at each site (n=3).

### Growing, freezing and thawing degree days

The freezing degree-days (FDD) and the thawing degree-days (TDD) are the indices of climate severity and of the freezing and thawing rates [6]. They usually were used to evaluate the influences of solar heating and latent heat fluxes on the thermal and moisture regimes. In addition, the growing degree-days (GDD) are used as a guide to indicate favorable conditions



for plant growth. The FDD, TDD and GDD are different significantly between the non-degraded site and the degraded one (Table 4). For the site with degraded vegetation, the FDDs are of lower values both at the depths of 5 cm and 40 cm, while the TDDs and GDDs are of high values at

the two depths, contrasted with those at the site with non-degraded vegetation. These differences may be probably related to the disappearance of buffering effect and organic layer during the wet meadow degradation.

Table 1. Mean monthly and annual ground surface temperatures (°C) for the non- or degraded wet meadows in the period 1st October 2007-30th September 2008

Site	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	MAT
<i>Ground surface (-5 cm)</i>													
ND	0.79	-3.38	-7.16	-9.05	-10.32	-6.51	-2.89	-0.22	2.58	5.10	5.72	3.92	-2.11
D	0.69	-4.08	-8.45	-9.97	-11.12	-7.26	-3.13	-0.12	3.16	5.53	5.91	3.93	-2.48
<i>Ground (-40 cm)</i>													
ND	1.33	-0.07	-2.50	-5.85	-7.88	-5.70	-3.04	-1.13	-0.51	1.40	3.74	3.15	-1.47
D	1.33	-1.18	-5.75	-7.94	-9.69	-6.49	-3.20	-0.96	1.13	3.82	5.10	3.72	-1.88

ND= non-degraded site; D= degraded site.

Table 2. Annual variations of temperatures (°C) at the 5cm and 40cm depth for the non- or degraded wet meadows in the period 1st October 2007-30th September 2008

	Non-degraded site		Degraded site	
	5 cm depth	40 cm depth	5 cm depth	40 cm depth
Min		-11.60	-8.40	-12.52
Max		7.98	4.84	8.44
Amplitude		19.59	13.24	20.97

Table 3. Number of isothermal days, frozen days, thawed days and freeze-thaw days by plots with non- or degraded vegetations at the depths of 5cm and 40cm, calculated for each month and for the year in the period 1st October 2007-30th September 2008. Data are means of samples of three plots at each site (n=3).

	Isothermal days		Frozen days		Thawed days		Freeze-thaw days	
	ND	D	ND	D	ND	D	ND	D
<i>Ground surface (-5 cm)</i>								
Oct-07	3	2	7	11	16	16	5	2
Nov-07	0	0	30	30	0	0	0	0
Dec-07	0	0	31	31	0	0	0	0
Jan-08	0	0	31	31	0	0	0	0
Feb-08	0	0	29	29	0	0	0	0
Mar-08	0	0	31	31	0	0	0	0
Apr-08	0	0	30	30	0	0	0	0
May-08	4	0	15	14	0	0	12	17
June-08	5	3	0	0	15	10	10	17
July-08	0	0	0	0	31	31	0	0
Aug-08	0	0	0	0	31	31	0	0
Sept-08	0	0	0	0	30	30	0	0
Total	12	5	204	207	123	118	27	36
<i>Ground (-40 cm)</i>								
Oct-07	7	2	0	0	24	22	0	7
Nov-07	1	1	0	24	0	0	29	5
Dec-07	1	0	30	31	0	0	0	0
Jan-08	0	0	31	31	0	0	0	0
Feb-08	0	0	29	29	0	0	0	0
Mar-08	0	0	31	31	0	0	0	0
Apr-08	0	0	30	30	0	0	0	0
May-08	0	0	31	31	0	0	0	0
June-08	1	1	29	9	0	19	0	1
July-08	3	0	5	0	10	31	2	0
Aug-08	0	0	0	0	31	31	0	0
Sept-08	0	0	0	0	30	30	0	0
Total	13	4	216	216	95	133	31	13

ND=non-degraded site; D=degraded site



Table 4. Number of freezing degree days, thawing degree days and growing degree days (°C day) by plots with non-degraded or degraded vegetation at the depths of 5cm and 40cm, calculated for each month and for the year in the period 1st October 2007-30 th September 2008

	Freezing degree days		Thawing degree days		Growing degree days	
	ND	D	ND	D	ND	D
<i>Ground surface (-5 cm)</i>						
Oct-07	-3.65	-8.54	28.06	30.06	3.38	3.42
Nov-07	-101.41	-122.41	0	0	0	0
Dec-07	-221.81	-261.84	0	0	0	0
Jan-08	-280.67	-309.22	0	0	0	0
Feb-08	-299.37	-322.44	0	0	0	0
Mar-08	-201.84	-225.12	0	0	0	0
Apr-08	-86.81	-93.76	0	0	0	0
May-08	-10.34	-9.62	3.68	6.84	0	0
June-08	-1.52	-0.44	89.36	105.45	54.32	72.34
July-08	0	0	158.01	171.53	155.86	169.21
Aug-08	0	0	177.34	183.22	177.34	183.22
Sept-08	0	0	117.66	115.01	106.33	109.22
Total	-1207.42	-1353.39	574.11	612.11	497.23	537.41
<i>Ground (-40 cm)</i>						
Oct-07	0	-0.04	41.15	41.13	0	6.49
Nov-07	-2.11	-35.37	0	0	0	0
Dec-07	-77.64	-178.78	0	0	0	0
Jan-08	-181.42	-246.03	0	0	0	0
Feb-08	-228.51	-281.05	0	0	0	0
Mar-08	-176.57	-201.29	0	0	0	0
Apr-08	-91.30	-96.14	0	0	0	0
May-08	-27.03	-23.26	0	0	0	0
June-08	-13.28	-16.52	32.12	68.94	12.24	41.26
July-08	-2.16	0	45.51	118.48	26.06	82.21
Aug-08	0	0	115.82	158.00	107.02	158.00
Sept-08	0	0	94.56	111.60	72.44	105.33
Total	-800.02	-1078.48	329.16	498.15	217.76	393.29

ND=non-degraded site; D=degraded site

## Discussion

### *Thermal regimes influenced by vegetation degradation*

The mean monthly and annual values of GST indicate that the site with degraded vegetations are generally colder in non-growing seasons (October – April of next year) and warmer in growing seasons (May-September). The data referenced to a complete year reveal the buffering effect exerted by vegetation on the surface soil temperatures. The vegetation could lower the soil temperatures in warm seasons, playing a cooling role, and increased the soil temperatures slightly in cold seasons, playing a heat insulation role. Studies had showed that: the solar radiation intensity below the vegetation was more than 100 times lower than that at the soil surface with no vegetation, and the sod layer could blocked off 54% to 65% radiations reaching the vegetation surface. During the cold seasons, the vegetation could delay the freezing process, hampered the heating process and prevented the permafrost from melting [8]. The results showed that the vegetation had a protective effect on the stability

of permafrost, and the degradation of vegetation was one of the main reasons for the permafrost degradation.

For what concerns the annual records of the site with degraded vegetations, the ground surface temperature fluctuations confirm its higher thermal conductivity relative to the rare vegetation and thinner sod layer. This can be proved further by the lower number of isothermal days (only 5 days for the degraded site, but 12 days for the non-degraded one). The numbers of frozen and thawed days were similar for the non- or degraded sites at 5cm depth, whereas the monthly patterns of the thawed days (Table 3) showed significant different values at 40cm depth, indicating for the latter shorter periods at temperature above 0°C. These differences are probably because the thickness of the sod layer was thinned and the humus layer disappeared gradually during the vegetation degradation, leading to the function of water retention lost, as a result, the upper melt water and precipitation moved downward quickly and more energy would be consumed in the water phase changes.

The significant increase of the freezing degree-days, thawing degree-days and growing degree-days (Table 4) confirmed that the energy exchange between the earth and atmosphere was strengthened after the vegetation degradation. In the warm seasons a lot of heat entered into the active layer, accelerating the permafrost to thaw and active layer to deepen, whereas in cold seasons much of heat energy was released quickly and the ground would reach a very low temperature in a very short time. As a result, the vegetation roots will suffer from the frost damage and this is bound to aggravate the degradation of the wet meadow further and forms a vicious cycle.

#### *Moisture regimes influenced by vegetation degradation of the wet meadow*

The temperature gradient was the main driving force of the soil water migration and the thicker sod layers of the non-degraded wet meadows played a buffer action on the energy exchange between the earth and atmosphere. As a result, the soil temperatures in the active layer changed moderately. When the vegetation degraded, the belowground biomass decreased seriously and the sod layers thinned. So the soil water contour maps of the non- or degraded wet meadows showed a significant difference. During the summer melting, there was a high soil water content area at the depth of about 40 cm of the site with non-degraded vegetation, but at the site with degraded vegetation, the high water content area disappeared. According to the field survey, the site with non-degraded vegetations had a thicker sod layer and denser root distribution, which interwove with the withered roots and formed a felty layer. At this layer the humus was thick and the water retaining quality was great, and the permeability of water was poor. During the frozen soil thawing, a majority of the melt water was gathered at the depth of about 40 cm. The precipitation infiltrated also gathered in this layer. Thereby, a high aquifer formed. After the vegetation degradation, the thickness of the felty layer was thinned and the humus layer disappeared gradually, leading to the function of water retention lost. As a result, the melt water and precipitation moved downward quickly. With the felty layer thinning, much energy was input into the soil, accelerating the permafrost to melt. At the same time, the vegetation growth was affected by lack of water.

#### **Conclusions**

The results of this investigation show that vegetation degradation of wet meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau takes a serious impact on the ground moisture and thermal regimes. Vegetation thickness, coverage and sod-layer thickness are the most important factors that determine the

vegetation's insulating properties and soil moisture migration. The vegetation degradation increased the ground soil temperatures and weakened the permafrost stability. At the same time, vegetation degradation also leads to the sod-layer thickness decreasing. In this scenario, the vegetation roots would be suffered from cold damage and vegetation degradation will be aggravated further, and thus make a vicious circle.

In a climate change scenario accompanied by warming air and permafrost degradation, the moist vegetation types of wet meadow would shift to xeric vegetation types. In addition, the increase of xeric vegetation may cause further feedbacks with a faster deepening of the active layer resulting from the higher ground soil temperature and an increase of CO<sub>2</sub> and methane fluxes due to increased soil respiration.

#### **Acknowledgements**

This work was supported by the West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (No. Y028721), the Research Project of the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (No. SKLFSE-ZQ-05), and the National Natural Science Foundation of China (No. 41003032).

#### **References**

1. Wang H., Zhou X.L., Wan C.G., Fu H., Zhang F., Ren J.Z. 2008. Eco-environmental degradation in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and comprehensive ecological protection planning. *Environmental Geology* 55: 1135-1147.
2. Wang G.X., Li Y.S., Wang Y.B. 2007. Typical alpine wetland system changes on the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *Acta Geographica Sinica* 62 (5): 481-491.
3. Zhang Y., Chen W., Smith S.L., et al. 2005. Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to atmospheric climate change. *Journal of Geophysical Research* 110, D03112.
4. Yang M.X., Yao T.D., He Y.Q. 2002. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Sciences* 20 (5): 533-558.
5. Ma M.T., Yang G.H., Zhou Z.H. 2006. Permafrost change in the Fenghuoshan mountain of Qinghai-Tibet Plateau. *Arid Land Geography* 29 (4): 327-330.
6. Gugliemin M. 2006. Ground surface temperature (GST), active layer and permafrost monitoring in continental Antarctica. *Permafrost and Periglac. Proc.* 17: 133-143.
7. Wang Q.J., Zhou X.M. 1991. The growth rhythm of the grasses populations and their adaptability of environment in Kobresia Humilis meadow. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* 15 (2): 158-176.
8. Permafrost Research Institute 1988. *General Cryopedology* (translated by Guo Dongxin, Liu Tieliang, Zhang Weixin, et al). Beijing: Science Press, 281 pp. (in Chinese)

## Permafrost investigation in Tibetan Plateau using electrical resistivity tomography

Yanhui YOU<sup>1</sup>, Jun HU<sup>1</sup>, Ute WOLLSCHLAGER<sup>2</sup>, Kurt ROTH<sup>2</sup>, Qihao YU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: yanhui\_you@lzb.ac.cn  
<sup>2</sup>Institute of Environmental Physics, Heidelberg University, Heidelberg, Germany

**Abstract.** Geophysics method is one of the important ways to survey the permafrost, therefore, in order to understand the applied scope and prospect of the electrical resistivity tomography in Tibetan Plateau permafrost investigation, three test sites are chosen with different environment and climate conditions, surface features and the types of frozen soil. The depth of permafrost table, the distribution characteristics of ground ice, the thickness of permafrost layer and the taliks development are get from this research, meanwhile, the effectiveness of electrical resistivity tomography is compared with the data of drilling hole and ground temperature. The research results show that the electrical resistivity tomography could get rich information about the permafrost.

**Keywords:** electrical resistivity tomography; permafrost; ground ice.

## Изучение многолетнемерзлых пород Тибетского нагорья методом электротомографии удельных сопротивлений

Яньхуэй Ю<sup>1</sup>, Цзюнь ХУ<sup>1</sup>, Уте Волльшлагер<sup>2</sup>, Курт Рот<sup>2</sup>, Цихао ЮЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная государственная лаборатория по строительству на мерзлых грунтах  
Института инженерных и экологических исследований холодных и аридных регионов  
АН КНР  
Китай 730000, г. Ланьчжоу, ул. Дунган Вест Роуд, д. 320, e-mail: yanhui\_you@lzb.ac.cn  
<sup>2</sup>Институт физики окружающей среды Гейдельбергского университета,  
г. Гейдельберг, Германия

**Аннотация.** Геофизические методы играют большую роль в геокриологических исследованиях. Для оценки возможностей и перспектив использования метода электротомографии удельных сопротивлений при изучении криолитозоны Тибетского нагорья были выбраны три экспериментальных участка, отличающиеся по природно-климатическим, ландшафтным и геокриологическим условиям. С помощью метода электротомографии определены глубина верхней границы многолетней мерзлоты, залегание подземных льдов, мощность многолетнемерзлой толщи и развитие таликов. Результаты электротомографии сопоставлены с данными бурения и температурных замеров. Выявлено, что электротомография удельных сопротивлений позволяет получить значительный объем сведений о строении и параметрах мерзлоты.

**Ключевые слова:** электротомография удельных сопротивлений; многолетняя мерзлота; подземные льды.

# Permafrost investigation in Tibetan Plateau using electrical resistivity tomography

Yanhui You, Jun Hu, Ute Wollschlager, Kurt Roth, Qihao Yu

## Introduction

Since 1960 s, different kinds of geophysics methods have been used to investigate permafrost on Tibetan Plateau, including ground penetrating radar (GPR), induced polarization method, seismic exploration and transient electromagnetic method (TEM) [9]. Compared with the above geophysics methods, electrical resistivity tomography (ERT) method has several advantages as follows: it can play a better role in anisotropic medium, meanwhile, it has a good resolution in the shallow and deep strata; moreover, it is insensitive to the electromagnetism noise. Therefore, ERT is used in the ground ice detection on rock glaciers and ice-cored moraines ([1],[4],[5],[7]), the investigated results on the ground ice that is related with glacier shows a high resistivity, which is greater than  $105\Omega\text{m}$  and the resistivity decreases sharply to thousands  $\Omega\text{m}$  around the unfrozen areas, it could also accurately delineate the distribution range of the subsurface ice under high resistivity gradient. Besides this, ERT is also used to do the research on the geometrical characteristics and internal structure of the pingos [7]. Also, it is used to monitor dynamically on seasonal, annual, and long-term variations of permafrost [3].

In general, when the soil transforms from unfrozen to frozen, its resistivity will increase sharply, consequently, it can be easily distinguish from the unfrozen soil layer from the frozen soil layer. For example, the distribution range of several common soil resistivity is as follows: clay,  $1-100\Omega\text{m}$ ; sand,  $100-10^3\Omega\text{m}$ ; gravel,  $100-4\times 10^3\Omega\text{m}$ ; schist,  $100-10^4\Omega\text{m}$ , however, the resistivity of subsurface ice and permafrost can reach to  $1\times 10^3-10^6\Omega\text{m}$  [2], the obvious resistivity difference between them brings a good applied prospect for the ERT, the subsurface frozen areas shows high resistivity abnormalities in the inversion model.

Besides the above factors, the resistivity of different soil is related with its composition, ground ice content, temperature and salt content. The lab measurement data shows that silty clay which has 61.8% water content and 17% salt content begins to freeze on  $-1^\circ\text{C}$  and its resistivity is about  $10\Omega\text{m}$  at  $-3^\circ\text{C}$ , while the resistivity of the silty clay which is the same type with 12% water content linearly change with the temperature which ranges from  $-8^\circ\text{C}$  to  $10^\circ\text{C}$  and its resistivity do not change sharply around  $0^\circ\text{C}$  [2]. Consequently,

the water content and salt content will influence its resistivity gradient and value of resistivity that under the frozen and unfrozen conditions, so the above factors should be considered when geologic interpretation is done on the inversion resistivity section of ERT.

Large areas of continuous permafrost, discontinuous and isolated patches of permafrost are distributed on the Tibetan Plateau. Comparing with the permafrost which is related with glacier and high latitude, the ice content in frozen layer of the permafrost in Tibetan Plateau varies differently in different regions, also high temperature unstable permafrost distributes widely, therefore, it could be different when the ERT is used to detect the ground ice and delimit its range. In this paper, three testing ground are chose in the east and northeast of Tibetan Plateau, and the ERT is used to investigate the distribution characteristic of the permafrost, meanwhile, the effects and the existed problems are analyzed when the ERT is used to investigate the permafrost in Tibetan Plateau.

## Study regions

The Tibetan Plateau distributes large areas of continuous permafrost, discontinuous permafrost and isolated patches of permafrost. As the impact of climate and different geological conditions, the permafrost could be different in the time and space. In order to testify the effective and scope of application of the ERT, three typical test sites are chose in the east and northeast of Tibetan Plateau, they are Qumahe, Kunlun Mountains and Xidatan. The Qumahe which belongs to isolated patches of permafrost regions located at the east of Tibetan Plateau; while the Kunlun Mountains is at the northeast of Tibetan Plateau, its altitude is more than 4700 m and the permafrost layer is thick, moreover, the pingos could be seen near the survey line; Xidatan is a down-faulted basin which belongs to the west of Kunlun Mountains [8], its elevation gradually increases to westward and it locates at the lower limit of permafrost distribution, the permafrost degradation phenomenon is obvious here which is due to the climate warming. The GPR investigation which has been done before shows that the distributing area of the permafrost decreases by 12% compared with monitoring data since 1975, and the permafrost lower limit increased by 25 m [8].



## Results and analysis

*Qumahe*

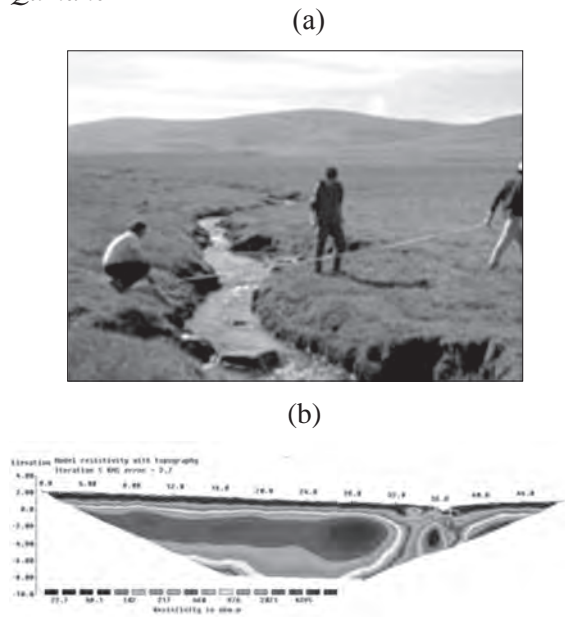


Fig. 1. (a) Terrain and the subsurface vegetation distribution of the ERT section in Qumahe (b) Model inversion result of ERT at Qumahe.

The test site chosen in Qumahe (Fig.1.(a)) (N34°54',E94°47', 4470 m) is at a piedmont gradual slope of mountain valley zone, its surface is moist with well covered vegetation and thick humus layer. The survey line passes down a gentle slope and goes through a seasonal stream. The purpose of which the ERT used here is to know the development and distribution characteristics of the permafrost. Meanwhile, a meteorological station is chose to collect the meteorological data here and monitor dynamically on the evolution status of the permafrost [8].

Fig.1(b) is the inversion resistivity section of ERT. The horizontal position at 36m of the inversion resistivity section is corresponding with the stream in Fig.1(a), the drilling is done at the start of the survey line and the edge of the river, which is corresponding with the first and second drill hole in the Fig.1(b).The first one shows that the ground ice could be seen under 1.7m depth, and the volumetric ice content reach 30-40% between 1.7-4.6m. The lithology distribution along the drill hole is as follows: peat layer at 0-3.6m, gray black thin schist layer at 3.6-20m. The ice crystal and frozen phenomenon is not seen in the core of the second drill hole, gravel at 0-2.0m, thin schist layer at 2.0-20m. It could be seen from the drill hole that low resistivity on the subsurface corresponds to schist distribution. Under the depth of 1.7m, horizontal distance 0-32m and from 38m to the end of the

survey line the resistivity comparatively high, corresponding with subsurface ice distribution layer which the drilling hole shows. The resistivity increases sharply around 0m in the figure, therefore, it can be deduced that the high resistivity regions corresponds to permafrost areas. The highest resistivity distributes vertically at the horizontal distance of 28-32m and 38-44m, it should be caused by the higher ice content. Combined with the data of the second drill hole, the low resistivity regions distributes vertically at the regions of 34-38m could be caused by the influence of the stream which is as heat source to the ground ice, resulting in the formation of the talik in local areas. Near the two flanks of the stream, the ice content is obviously higher than other regions, it shows that water in the stream supplies the water with the ground ice of the two flanks. Hence this stream is a seasonal river, the water flows constantly in summer and stop to flow in winter, although the summer and autumn is a heat source for the subsurface ice, it does not influence the water which below the river migrates to the freeze, and results in the higher ice content below the two flanks of the river when in winter.

The results of the ERT shows that the permafrost table is at 1.7m and talik develops below the seasonal stream, what's more, it also could be seen that the region below two flanks of the stream is higher ground ice content area. The results have a good corresponding with permafrost depth and talik development region which the drill hole gets. It could be concluded that the investigation of the ERT could clearly reflect the development of the permafrost here.

### *Kunlun Mountains*

Kunlun Mountains lying in the northeastern Tibetan Plateau, the average annual surface temperature of is from -3.2°C to -2.6°C [4]. Selected survey line (Fig.2.) in this area with topographic undulation and poor vegetation cover which has neighboring pingos and permafrost develops well. Using a larger electrode spacing (12m) of data acquisition to explore the depth and deep distribution of ground ice for the need of prospect the thickness of permafrost. Survey line is East-West orientation and along the gentle slope. Three obvious high resistivity abnormality areas were found in depth of 30~50m (Fig.3.). Resistivity has a smooth contour and declines faster below 50 m. These abnormality areas should be caused by higher ice content because the shallow stratum in this region is clay gravel and with little lateral changes. Analyzing the characteristics of resistivity section, the resistivity

decreased rapidly in 80-90m depth and less than 800  $\Omega\text{m}$  below 90m. It can be inferred roughly the depth of the permafrost among 80-90 m in this region. Combine the temperature data measured from the drilling located at 300 m of survey line, the permafrost is about 90 m depth. It means that the inversion result can provide an effective reference for the depth of permafrost.

It could be seen from the results that ERT investigation could also get rich information when used on the thick permafrost, the method has a clear reflection of the subsurface ice distribution characteristics under 50m depth; the permafrost thickness of this test site reach at about 90m, it also has a good display on the inversion resistivity section of this method.



Fig. 2. Terrain and the subsurface vegetation distribution of the ERT section in Kunlun Mountains.

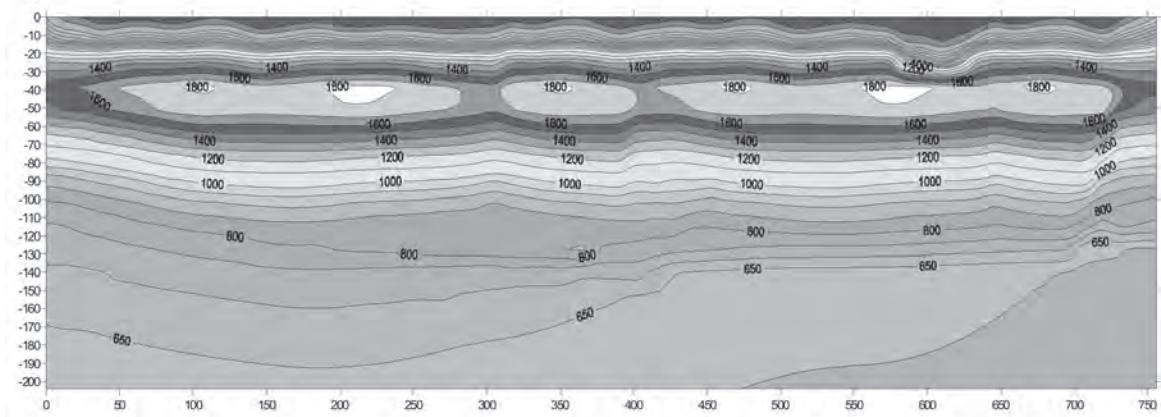


Fig. 3. Inversion result of ERT at KunlunMountains.

*Xidatan*



Fig. 4. Terrain and the subsurface vegetation distribution of the ERTsurvey line in Xidatan.

The surface of the testing ground chose in Xidatan distributes patches of vegetation, and small areas is covered well by vegetation, while the other regions are naked, most are sand gravel (Fig.4.). Therefore, the distribution difference and characteristics between the vegetation area and naked area are detected using ERT method. The survey line passes across west to east, and goes through vegetation covered well regions and naked surface areas.

Fig.5. is the inversion resistivity section, the electrode space is 5m, the horizontal distance 0-175m ground surface are well covered and humid; from 175m to the end of the survey line is naked and comparatively dry. As the past survey data shows that the permafrost here is on degradation in recent years. It could be deduced that combining the surface characteristics and the inversion resistivity section (Fig.4.), the ground ice develop well in the vegetation covered well regions while the permafrost has already degraded in the naked areas. So the surface vegetation has the instruction meaning for the subsurface permafrost conditions in the isolated patches of permafrost areas in Xidatan. Meanwhile, the resistivity distribution characteristics of naked surface are also analyzed, several low resistivity abnormal areas are distributed under 20m down from the surface, it could be due to the percolation of runoff in summer. When the permafrost entirely degenerated, without the permafrost acting as the aquiclude, the severe loss of the water content in the topsoil, which brings harmful influence to the environment, not only unfavourable to the grow of the plants but accelerates the desertification of surface soil.

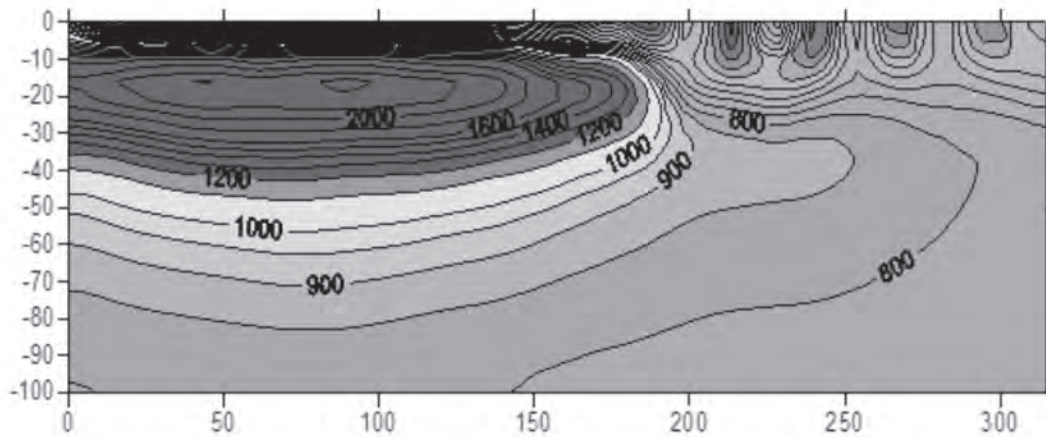


Fig. 5. Inversion result of ERT at Xidatan.

The survey section of the ERT in this regions indicates that the interrelation of the ground ice development and the surface vegetation. The permafrost presents a degradation trend, and there still exists ground ice along the survey line with good cover of vegetation. The degeneration part of vegetation indicates that it is the percolation of rainfall that leads to the surface dryness. Therefore, the application of the ERT could play a very important role on the research of the water migration of the active layer of the permafrost.

### Conclusion

Three different test sites are chosen which differ from their surface features, vegetation covered and the types of permafrost distribution, and they stand for common distribution characteristics of the permafrost in Tibetan Plateau. Some important parameters of permafrost research could be get by the results of the ERT method. For example, the depth of the permafrost table that could be detected at Qumahe; ground ice distribution characteristics of the permafrost and the thickness of the permafrost could be detected in the Kunlun Mountains, it also has a good reflection of subsurface permafrost development with different surface characteristics at Xidatan test site. The effectiveness of the exploration results is testified by the data of the drilling and ground temperature.

Compared with the drilling and probing, the ERT method has the advantage such as non-destructive exploration, cheap and fast. Therefore the ERT method could play a very important role on the Tibetan Plateau permafrost investigation and has a good applied prospect.

It will be difficult in permafrost regions when the power is supplied deeply, that's because the ground ice is a high resistivity layer. By further study on the pattern of the permafrost

development and the detection method, the ERT method could confirm the thickness of permafrost more accurately, it will also play a more important role on the research that the relationship between the permafrost on Tibetan Plateau and the vegetation, the water content variation characteristics of the active layer of the permafrost.

### Acknowledgements

This project was supported by the Global Change Research Program of China 2010CB951402, the Western Project Program of the Chinese Academy of Sciences, No. KZCX2-XB2-10

### References

1. Hauck, C., and D. VonderMuhll. 2003. Inversion and interpretation of two-dimensional geoelectrical measurements for detecting permafrost in mountainous regions. *Permafrost and Periglacial Processes* 14: 305-318.
2. Hauck, C., C. Kneisel, and E. Corporation, 2008. *Applied Geophysics in Periglacial Environments*. Cambridge: Cambridge University Press.
3. Hilbich, C., L. Marescot, C. Hauck, M. H. Loke, and R. Mausbacher. 2009. Applicability of electrical resistivity tomography monitoring to coarse blocky and ice-rich permafrost landforms. *Permafrost and Periglacial Processes* 20: 269-284.
4. Kneisel, C. 2006. Assessment of subsurface lithology in mountain environments using 2D resistivity imaging. *Geomorphology* 80: 32-44.
5. Marescot, L., M. H. Loke, D. Chapellier, R. Delaloye, C. Lambiel, and E. Reynard. 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surface Geophysics* 1: 57-67.
6. Qingbai, W., and L. Yongzhi. 2004. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology* 38: 85-92.

7. Ross, N., P. J. Brabham, C. Harris, and H. H. Christiansen. 2007. Internal structure of open system pingos, Adventdalen, Svalbard: The use of resistivity tomography to assess ground-ice conditions. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 12: 113-126.

8. Wu, T. H., S. X. Li, G. D. Cheng, and Z. T. Nan. 2005. Using ground-penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau. *Cold Regions Science and Technology* 41: 211-219.

9. Yu, Q. H., G. D. Cheng, and W. L. Wang. 2003. The progress of permafrost investigation with geophysical methods in China. *Permafrost* Vols. 1 and 2, 1271-1276.

10. Yu, Q. H., Kurt, R., and Jin, H.J. 2006. Progress of the Sino-German joint researches on the degradation of permafrost on the Tibetan plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology* 28: 844-849.



## Performance of a production building on a spatial ventilated foundation in Norilsk

Yu.M. Goncharov, A.P. Popovich  
Institute of Engineering and Construction, Siberian Federal University  
pr. Svobodny 82, Krasnoyarsk, Russia 660041

**Abstract.** A four-story panel-frame production building supported on a surface spatial shell-type foundation was constructed in the Oganer industrial zone at Norilsk. The site is underlain by warm ice-rich permafrost. The cast-in-situ foundation consists of three sections divided by movement joints. The concentrated loads from building columns are 101 to 216 kN. The average height of the fill is 4 m. Ground temperature and settlement observations indicate that the use of a ventilated space in combination with a layer of fill effectively lowers ground temperatures and reduces thaw depths beneath the building.

**Keywords:** spatial ventilated shell-type foundation; warm ice-rich permafrost; ground temperature; seasonal thaw depth.

## Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске

Ю. М. Гончаров, А. П. Попович  
Сибирский Федеральный Университет,  
Россия, 550041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82

**Аннотация.** Рассмотрен опыт строительства и эксплуатации четырехэтажного каркасно-панельного производственного здания, построенного на экспериментальном поверхностном пространственном фундаменте-оболочке в монолитном исполнении на сильнольдистых высокотемпературных грунтах в Норильском промышленном районе «Оганер». Фундамент-оболочка состоит из трех блоков с деформационными швами между ними. Сосредоточенные нагрузки от колонн здания – 101...216 кН. Средняя высота слоя подсыпки - 4 м. Проведены наблюдения за температурой грунтов основания и за осадками фундамента. По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что наличие холодного подполья в сочетании с промежуточным слоем (подсыпки) способствует понижению температур грунтов основания и уменьшению глубины сезонного оттаивания грунта под зданием.

**Ключевые слова:** пространственный вентилируемый фундамент-оболочка; сильнольдистые высокотемпературные грунты; температура грунтов; глубина сезонного оттаивания.

# Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске

Ю. М. Гончаров, А. П. Попович

## Введение

Норильский район относится к зоне сплошного распространения вечномерзлых грунтов. Здесь наряду с вечномерзлыми грунтами и температурами в зоне нулевых годовых температур до  $-7^{\circ}\text{C}$  и мощностью 200 м и более встречаются высокотемпературные пластичномерзлые грунты с температурой выше одного градуса.

Одной из основных составных частей любого здания и сооружения является выбор конструкции фундамента, который обеспечивает устойчивость, прочность и долговечность здания, особенно на высокотемпературных сильнольдистых грунтах с глубоким залеганием прочных скальных пород. В этих случаях при проектировании применяют сваи глубокого заложения с их опиранием на скальные породы.

## Описание эксперимента

Рассмотрим опыт строительства и эксплуатации четырехэтажного каркасно-панельного производственного здания, построенного на пространственном фундаменте в монолитном исполнении на сильнольдистых высокотемпературных грунтах в Норильском промышленном районе «Оганер». Здание сначала предполагалось построить на буронабивных сваях-стойках в металлических обсадных трубах с их армированием и заполнением бетоном. По проекту общий расход труб составлял 224 т, диаметром свай 600 мм, глубина их заложения - 20 м на скальную породу. Размер здания в плане - 48х18м. Строительная площадка имеет сложный рельеф с резким перепадом абсолютных отметок, поэтому по проекту вертикальную планировку всей территории микрорайона предполагалось выполнить в виде насыпи высотой до 4 м.

Учитывая необходимость значительного заглубления свайных фундаментов (до коренных пород), по разработкам и предложениям Игарской НИМС Института мерзловедения имени П.И. Мельникова СО РАН, было принято решение построить здание на экспериментальном поверхностном пространственном фундаменте-оболочке, на что было получено разрешение Госстроя РСФСР. По проекту здание запроектировано с продуваемым подпольем, высотой до 2 м.

Район застройки характеризуется сложными мерзлотно-грунтовыми условиями. Грунты на строительной площадке - это в основном льдогрунтовая толща, которая при оттаивании приобретает текучую консистенцию. Среднегодовая температура грунтов на территории «Оганер» - ниже  $0,5^{\circ}\text{C} - 0,9^{\circ}\text{C}$ . Под многочисленными озерами развиты таликовые зоны, температура пород и подземных вод в которых составляет плюс  $2^{\circ}\text{C} + 4^{\circ}\text{C}$ . Фундамент-оболочка выполнен в монолитном варианте из бетона класса В25, марки морозостойкости F300, водопроницаемостью W6. Верхняя отметка горизонтальной балки оболочки (рис. 1) находится на нижней проектной отметке оголовника под колонну каркаса. Толщина наклонных и горизонтальных элементов фундамента-оболочки принята 250 мм.

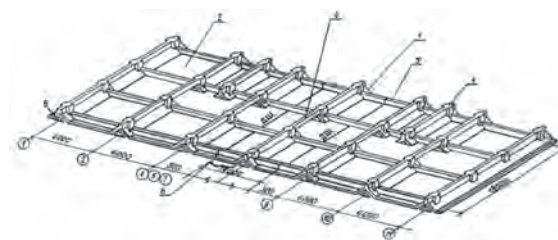


Рис. 1. Общий вид монолитной конструкции фундамента-оболочки: 1 - складка фундамента; 2 - горизонтальная плита; 3 - вертикальные ребра жесткости; 4 - уширение под подколонник; 5 - горизонтальная балка; 6 - вкладыш под внутреннюю полость складки фундамента; ДШ - деформационный шов.

Фундамент-оболочка состоит из трех блоков с деформационными швами между ними. Сосредоточенные нагрузки от колонн здания - 101...216 кН.

Средняя высота слоя подсыпки составила 4 м. Перед началом работ на территории была произведена срезка бугров пучения, выкорчеваны деревья, засыпано небольшое озеро, оказавшееся на строительной площадке, сделана отсыпка скальным грунтом с уплотнением, чтобы «армировать» верхний торфяной слой. Отсыпка основания под фундамент производилась скальной породой (размер фракций 30...50 см) с примесью суглинка, что позволило создать противofiltrационный слой. Эти работы велись при температурах от  $-8^{\circ}\text{C}$  до

-18° С. Уплотнение подсыпки производилось виброркатком. Выравнивающий слой (под фундаментом) был выполнен щебнем, уплотненным «Белаз»ом с грузом весом 400 кН.

После возведения подсыпки приступили к созданию монолитной конструкции фундамента. Первоначально были проведены работы по созданию песчано-цементных вкладышей (рис. 1, поз.6) М25 под внутренние полости фундамента-оболочки. Вкладыши являлись, в свою очередь, основанием для монтажа арматуры и бетонирования тела фундамента.

Бетонная смесь в конструкции плит фундамента укладывалась на всю их толщину без разрывов с последовательным направлением укладки от наружных краев температурного блока к середине. Все линейные (балки, диафрагмы (ребра жесткости, поз. 3) во внутренних и внешних полостях фундамента) и наклонные элементы бетонировались одновременно по всей длине. Технологические швы (зазоры) выполнялись в местах, предусмотренных схемой их расположения на участках бетонирования. Монтаж арматуры и бетонирование фундамента велись в теплое время года.

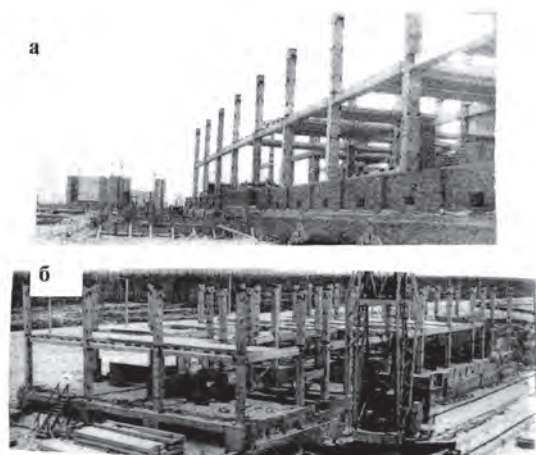


Рис. 2. Цоколь каркасного здания (а):1 – складка фундамента; 2 – продух в забирке проветриваемого подполья; Общий вид здания (б).

После полного завершения работ по устройству монолитной конструкции фундамента-оболочки и набора бетоном заданной

прочности были произведены работы по бетонированию подколонников, которые устраивались на уширенной части фундамента (рис. 1, поз. 4). На рис. 2 показан общий вид каркаса здания в процессе строительства, на котором видны торцы складки фундамента и продухи в цоколе забирки проветриваемого подполья.

### Результаты эксперимента

В течение нескольких лет эксплуатации здания велись наблюдения за температурным режимом основания и осадками фундамента.

Анализ наблюдений за динамикой температурного режима грунтов основания до 10 м показал (рис. 3): во-первых, полное промерзание грунтов основания ниже подошвы фундамента по всему пятну здания; во-вторых, понижение температур грунтов по сравнению с 1989 г. (до начала отсыпки). Так, например, на расстоянии 7,5 м (от края здания) на глубине 10 м температура понизилась (по скв. 7) с -0,7° С (09.1989 г.) до -1,0° С (09.1991 г.) и до -1,4° С (09.1992), а по скв. 10 соответственно с -0,1 до -0,3° С, с + 0,1 до -0,7° С и до -1,15° С (рис. 3).

Аналогичная зависимость имеет место и по данным других скважин. Наличие талика в районе скв. 10 сказалось на динамике температур грунтов и за ее пределами. По мере удаления от здания температуры понижаются. Так, например, температура на глубине 10 м в скв. 4, расположенной на расстоянии 12 м от строения, соответственно -0,6 и -0,7° С.

Из приведенных графиков также следует, что в 1989 г. глубина сезонного оттаивания под зданием (по скв. 10 и 4) была равна соответственно 4 и 3 м, а в 1991 г. она значительно уменьшилась – до 2,3 и 1,8 м. По замерам в других скважинах, глубина сезонного оттаивания в эти же годы была в пределах 2,0 м. В 1992 г. по всем скважинам зафиксирована одинаковая глубина сезонного оттаивания и не превышала 1,8 м.

На рис. 4, в показаны положение верхней границы под зданием по годам, а на рис. 4, а, б температурное поле под зданием.

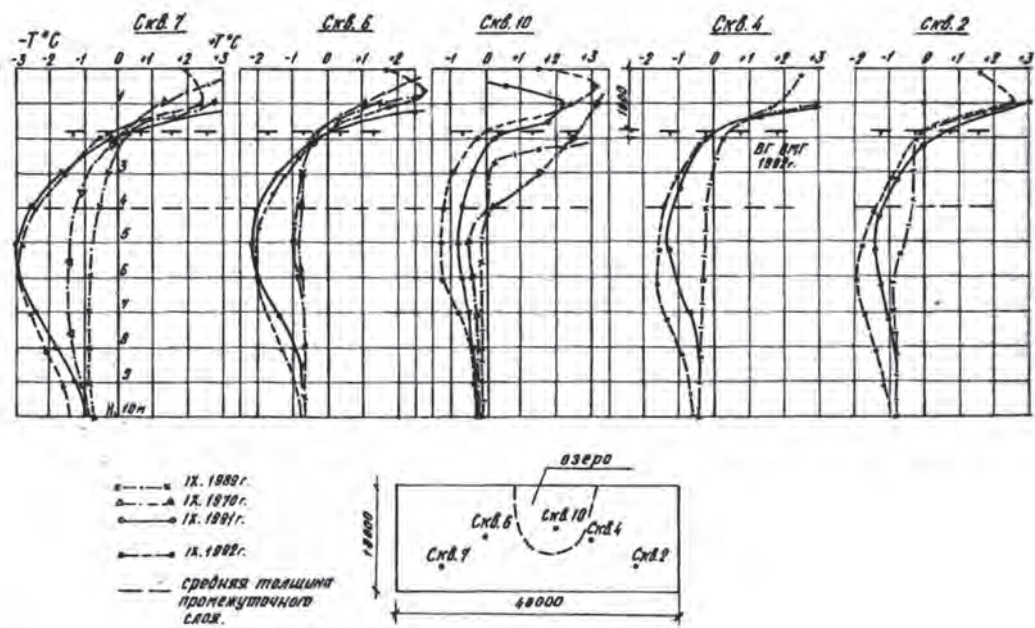


Рис. 3. Динамика формирования температурного режима грунтов в основании здания по годам (1989-1992 гг.).

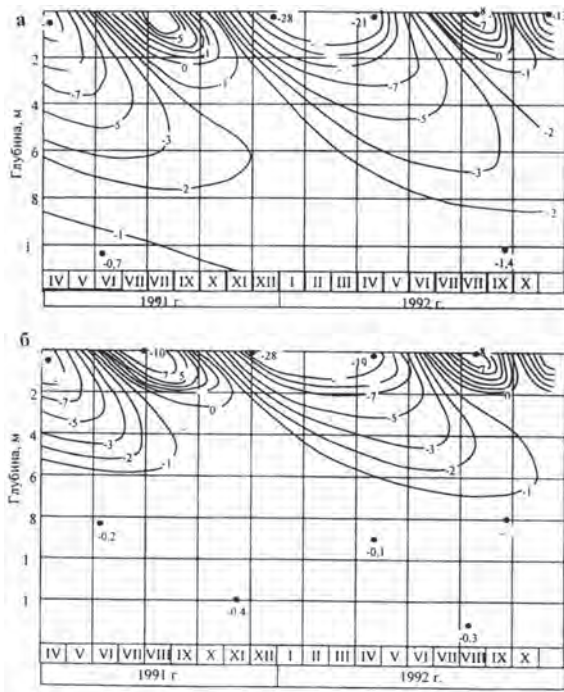


Рис. 4. Формирование температурного режима под зданием быткомбината в г. Норильске: а – термозоплеты по скв. 7(а) и по скв. 10(б); в – положение верхней границы ВМГ по годам.

Одновременно велись наблюдения и за осадками фундамента, которые показали относительную их равномерность. Максимальная осадка на 1992 г. не превышала 2 см.

На основании выше сказанного следует сделать вывод, что наличие холодного подполья в сочетании с промежуточным слоем (подсыпки) способствует понижению температур грунтов основания и уменьшению глубины сезонного оттаивания грунта под зданием.



## **Peculiarities of erecting engineering structures in cryolithozone: analysis of an information massive from DB «Problems of the North»**

V.V. Rykova, E.Yu. Shevtsova

State Public Scientific-Technological Library SB RAS,  
Voskhod St. 15, Novosibirsk, Russia 630200, e-mail: onbryk@spsl.nsc.ru

**Abstract.** The system of information support (bibliographic indices and data bases) of researches on cryolithozone created in the State Public Scientific-Technological Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences is represented in the article. The scientometric analysis of an information massive on permafrost engineering from data base “Problems of the North” of own generation of SPSTL SB RAS is given. Its dynamics, thematic, and typical structures are characterized.

**Keywords:** permafrost; engineering structures; data bases; information support of researches.

## **Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера»**

В. В. Рыкова, Э. Ю. Шевцова

Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения  
Российской академии наук  
Россия, 630200, г. Новосибирск, ул. Восход, д. 15, ГПНТБ СО РАН, e-mail: onbryk@spsl.nsc.ru

**Аннотация.** В статье представлена система информационной поддержки (библиографические указатели и базы данных) научных исследований по криолитозоне, созданная в Государственной публичной научно-технической библиотеке Сибирского отделения Российской академии наук. Дан наукометрический анализ информационного массива по инженерному мерзлотоведению из БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Проблемы Севера». Приведены характеристики динамики, тематической и типовой структуры информационного массива.

**Ключевые слова:** многолетняя мерзлота; инженерные сооружения; базы данных; информационное сопровождение научных исследований.

# Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера»

В. В. Рыкова, Э. Ю. Шевцова

## Введение

Освоение природных ресурсов северных и удаленных территорий порождает проблемы, связанные со строительством в условиях распространения многолетней мерзлоты. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, посвященные геокриологическим проблемам строительства на Крайнем Севере, нуждаются в полноценном информационном сопровождении. Обеспечение релевантной информацией научно-исследовательских программ различной направленности является приоритетным направлением деятельности отдела научной библиографии ГПНТБ СО РАН. Вопросы региональной геокриологии нашли отражение в библиографических базах данных собственной генерации ГПНТБ СО РАН «Проблемы Севера», «Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока», «Четвертичный период в Сибири и на Дальнем Востоке», а также в текущих указателях литературы «Природа и природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока, их охрана и рациональное использование» и «Проблемы Севера».

Источниками отбора литературы для создания и текущего пополнения БД является обязательный экземпляр отечественной литературы и зарубежные издания, поступающие в ГПНТБ СО РАН, материалы из удаленных БД. Каждый документ включает полное библиографическое описание, аннотацию, географическую рубрику, переводы к зарубежным публикациям, разделы предметного рубрикатора. Поиск материала возможен по ключевым словам из заглавия, аннотации или перевода, авторам, редакторам, году и месту издания, географической или предметной рубрике, языку и виду публикации. При необходимости возможно объединить поисковые поля и осуществить «сложный» поиск по нескольким параметрам одновременно. Региональные БД ГПНТБ СО РАН выгодно отличаются от аналогичных библиографических БД тем, что они имеют географическую рубрику (не только собственное название объекта, но и более крупные соответствующие единицы административного или физико-географического деления), по которой легко можно найти всю информацию для пользователя по интересую-

щему его району. Например, по Республике Саха (Якутия) в БД «Проблемы Севера» представлено более 15000 документов. Кроме того БД ГПНТБ СО РАН в отличие от других БД включают самые разнообразные виды документов: монографии, обзоры, методические рекомендации, научные отчеты, авторефераты диссертаций, статьи из периодических и продолжающихся изданий, а также сборников научных трудов, карты, атласы, депонированные рукописи, патенты, материалы конференций, библиографические указатели на русском и иностранном языках.

## Методы

Информационное обслуживание не ограничивается только созданием БД, но сопровождается наукометрическим анализом информационных массивов по актуальным направлениям научных исследований [1]. Наукометрические (библиометрические) исследования представляют собой новый информационный продукт, дающий представление о временной, видовой, тематической, языковой структуре ИМ, отражающий вклад отдельных научных коллективов и ученых в разработку конкретной проблемы, показывающий наиболее продуктивные периодические и весомые монографические издания по определенной проблеме, основные районы полевых работ и тематику конференций, симпозиумов, касающихся выбранной проблематики.

Нами был проведен анализ временной, видовой и тематической структуры ДП по вышеозначенной теме из БД «Проблемы Севера», включающей материалы с 1988 по 2010 гг. БД «Проблемы Севера» включает библиографическую информацию не только об изучении криосферы, но также по прикладным аспектам геокриологических исследований: технике в северном исполнении, особенностях строительства и разработки полезных ископаемых в районах распространения многолетней мерзлоты, транспортном освоении северных регионов. Материалы по проблемам строительства в условиях криолитозоны выделены в одноименный раздел, в котором имеются подразделы "Жилищное и гражданское строительство" и "Промышленное строительство".

## Результаты и обсуждение

Информационный массив (ИМ), посвященный геокриологическим проблемам строительства, превысил 7600 документов за 23-летний период.

Во временной структуре ИМ (рис.1) прослеживается сокращение ежегодного количества публикаций в 2-3 раза в 90-е годы по сравнению с 1988 г. Это объясняется экономическими трудностями реформенного периода: уменьшением финансирования строительства, изыскательских и научно-исследовательских работ. В 2000 г. наметилась устойчивая тенденция роста объема публикаций по рассматриваемой тематике. С 2003 по 2009 гг. поток документов был стабилен и варьировал от 400 до 450 единиц в год. Поскольку документы, вышедшие в свет в 2009 и 2010 гг. продолжают активно поступать в фонд библиотеки, окончательное их количество за этот период будет не меньшим, чем в предыдущие годы.

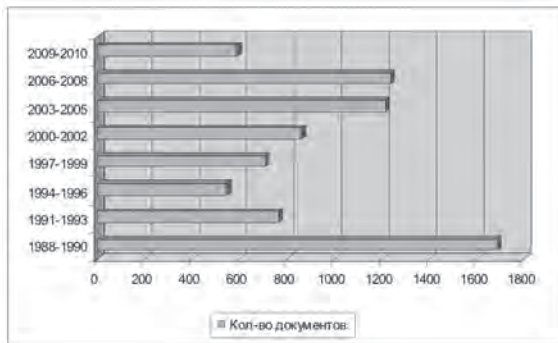


Рис. 1. Динамика ИМ.

Анализ видовой структуры ИМ (рис. 2) показывает, что основную массу документов составляют журнальные статьи (32%). Наиболее продуктивными периодическими изданиями являются «Гидротехническое строительство» (260 документов), «Известия ВУЗов. Строительство» (205 док.), «Транспортное строительство (188 док.)», «Основания, фундаменты и механика грунтов» (107 док.), «Строительство трубопроводов» (150) и другие. Существенная часть ИМ представлена статьями из научных сборников (28%), а также материалами конференций, симпозиумов и семинаров (24%). После 2000 г. в ИМ резко возросла доля материалов конференций, отдельные пики графика совпадают с проведением узкотематических конференции по вышеназванной теме. Ежегодно проводятся международные и региональные встречи ученых и специалистов, где ведется обмен мнениями по проблемам изучения криогенных ресурсов полярных регионов, освоения

шельфа арктических морей, инженерному мерзлотоведению и другим вопросам. Регулярность проведения конференций вышеозначенной проблематики в Якутии свидетельствует об особой актуальности данной темы для региона, например: Проектирование и строительство транспортных объектов в условиях Республики Саха (Якутия): научно-практическая конференция (Якутск, 2003 г.); Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития: республиканская научная конференция (Якутск, 2001 г.); Современные проблемы теплофизики в условиях Крайнего Севера: VI научно-техническая конференция памяти Н.С. Иванова (Якутск, 2003 г.); III Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата Eurastrencold-2006 (Якутск, 2006 г.); Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: I Всероссийская научно-практическая конференция (Якутск, 2008 г.) и другие.

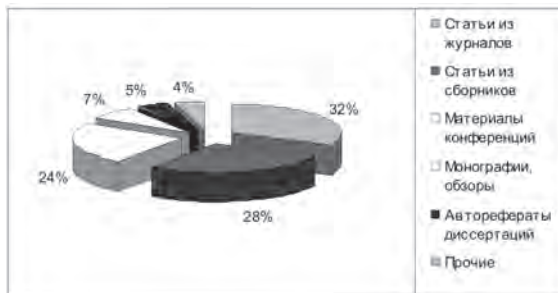


Рис. 2. Видовая структура ИМ.

Монографии и обзоры составляют 7% ИМ, что свидетельствует о значительном количестве накопленного материала по теме. Поток монографий за 23-летний период был относительно стабилен, с некоторым снижением в 90-е годы, причем количество монографических изданий, выходящих ежегодно, в настоящий момент почти сравнялось с доперестроечным уровнем.

Различным аспектам изучения геокриологических проблем строительства посвящены более двухсот диссертационных исследований (авторефераты диссертаций составляют 5% ИМ). Несмотря на тот факт, что поток документов 2010 года издания еще поступает в библиотеку, ИМ насчитывает 7 авторефератов диссертаций по вышеозначенной теме данного года выпуска [2-8], поэтому в ближайшее время можно ожидать выхода в свет новых монографий. Научные

работы по проблемам строительства в зоне многолетней мерзлоты ведутся в следующих научно-исследовательских и высших учебных заведениях: Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск), Институте криосферы Земли СО РАН (Тюмень), Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (Чита), Якутском государственном университете им. М.К. Аммосова, Ухтинском индустриальном институте, Тюменском нефтегазовом университете, а также в технических университетах Читы, Хабаровска, Санкт-Петербурга, архитектурно-строительных академиях Тюмени, Новосибирска.

Тематический анализ ИМ (рис. 3) показал, что почти третья часть (27%) опубликованных работ относится к разделу «Общие вопросы строительства», который освещает новые технологии и строительные материалы, экологические аспекты строительства в условиях Севера. Раздел «Жилищное и гражданское строительство», составляет лишь 12% ИМ, то есть этим вопросам уделено недостаточно внимания. В связи с освоением природных ресурсов северных районов исследования по этим аспектам проблемы, возможно, будут интенсифицированы. Более 61% публикаций ИМ входят в раздел «Промышленное строительство», внутри которого работы можно разделить на следующие группы: энергетическое и гидростроительство, транспортное строительство (авто- и железные дороги), строительство трубопроводов, строительство промышленных объектов и производственных зданий.

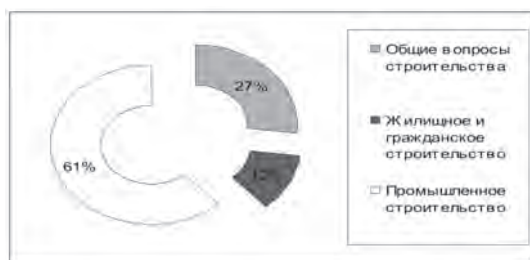


Рис. 3. Тематическая структура ИМ.

### Выводы

В результате библиометрического анализа информационного массива нами были получены данные о распределении документопотока по годам, его видовой и тематической структуре, наиболее продуктивных периодических изданиях и ведущих научно-исследовательских организациях, работающих по данной теме. Данный ИМ может быть использован учеными и специалистами для

получения ретроспективной и текущей информации по интересующей их проблематике.

В заключении хотелось бы отметить, что все БД находятся в свободном доступе для пользователей Интернета на сайте библиотеки по адресу [www.spsl.nsc.ru](http://www.spsl.nsc.ru) (опция «Базы данных»). Оперативное информационное обслуживание по различным областям гео-криологии возможно в режиме избирательного распространения информации (ИРИ) с предоставлением библиографических материалов по постоянно действующим запросам. Материалы из БД собственной генерации ГПНТБ СО РАН можно получить по электронной почте, обратившись по адресу [onb@spsl.nsc.ru](mailto:onb@spsl.nsc.ru).

### Список литературы

1. Зусьман, О. М. Библиографические исследования науки / О. М. Зусьман. – СПб., 2000. – 216 с.
2. Баженова, С. И. Эффективные высококачественные бетоны для суровых климатических условий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. И. Баженова. - М., 2010. - 24 с.
3. Беспалов, В. И. Оптимизация технологий строительства для обеспечения нормативных требований к сварным соединениям магистральных газопроводов (на примере магистрального газопровода Бованенково–Ухта): автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Беспалов. - М., 2010. - 24 с.
4. Горшков, В. П. Развитие теоретических положений выбора эффективных организационно-технологических способов строительства транспортных объектов в северных условиях (на примере водопропускных сооружений): автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Горшков. - Новосибирск, 2010. - 24 с.
5. Корнилов, Т. А. Повышение надежности конструкций зданий и сооружений в условиях экстремальных атмосферных нагрузок и воздействий Севера : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Т. А. Корнилов. - Якутск, 2010. - 43 с.
6. Ледовская, Н. С. Определение несущей способности нежестких покрытий аэродромов в период отрицательных температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. С. Ледовская. - М., 2010. 20 с.
7. Николаев, Ю. М. Температурно-влажностное состояние и деформационное поведение каменно-земляных плотин с экраном в условиях Севера : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. М. Николаев. - СПб., 2010. - 16 с.
8. Сальва, А. М. Техноприродные криогенные процессы в зоне влияния магистрального канала Кюель-Таата (Центральная Якутия): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / А. М. Сальва. - Дубна, 2011. - 23 с.



### References

1. Zus'man, O.M. 2000. Bibliographic research of science. St. Petersburg, 216 pp. (in Russian).
2. Bazhenova, S.I. 2010. Effective high quality concretes for severe climatic conditions: abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. Moscow, 24 pp. (in Russian).
3. Bespalov, V.I. 2010. Optimization of construction technologies to ensure regulatory requirements for welded joints of main gas pipelines (a case of a main gas pipeline Bovanenkovo – Ukhta : abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. Moscow, 24 pp. (in Russian).
4. Gorshkov, V.P. 2010. Development of theoretical principles of effective choice of organizational and technological methods of transport facilities construction under northern climate conditions (culverts case study) : abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. Novosibirsk, 24 pp. (in Russian).
5. Kornilov, T.A. 2010. Reliability improving of buildings and structures under conditions of extreme atmospheric loads and effects of the North: abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. Yakutsk, 43 pp. (in Russian).
6. Ledovskaya, N.S. 2010. Determining the car-rying capacity of nonrigid covers of airfields during subzero temperatures period : abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. Moscow, 20 pp. (in Russian).
7. Nikolaev, Yu.M. 2010. Temperature-humidity condition and deformation behaviour of rockground dams with a screen under the North conditions : abstr. of thesis ... Dr. of techn. sciences. St. Petersburg, 24 pp. (in Russian).
8. Sal'va, A.M. 2011. Technonatural cryogenic processes in a zone of the main canal Kyuel'-Taata effect (Central Yakutia): abstr. of thesis ... Dr. of geolmineral. sciences. Dubna, 23 pp. (in Russian).

## LIST OF FOREIGN PARTICIPANTS

AGHABARATI, Hassan

Civil Engineering Department, Qazvin Islamic Azad University (QIAU)  
Qazvin, Iran

BAI, Yan

School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
No.3 Shang Yuan Cun, Hai Dian District, Beijing, China 100044, e-mail: ybai@bjtu.edu.cn

BING, Hui

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: binghui@lzb.ac.cn

CHANG, Jun-de

Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin China, 150080  
Heilongjiang Seasonal Frozen Soil Region Engineering Frozen Soil Key Laboratory, Harbin, China

CHE, Tao

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

CHEN, Ji

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: chenji@lzb.ac.cn

CHENG, Guodong

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: gdcheng@ns.lzb.ac.cn

CHRISTENSEN, Jens Hesselbjerg

Danish Meteorological Institute, Lyngbyvej 100, Copenhagen, Denmark, 2100, e-mail: jhc@dmi.dk  
Greenland Climate Research Centre, Nuuk, Greenland

CROLL, James G. A.

University College London  
London WC1 E 6BT England, e-mail: j.croll@ucl.ac.uk

DAANEN, Ronald

Geophysical Institute, University of Alaska  
Fairbanks, USA, e-mail: rdaanen@alaska.edu

DAI, Chang-lei

School of Water Conservancy & Electric-power, Heilongjiang University  
Mailbox 179, No.74 of Xuefu Road, Nangang District, Harbin, China 150080  
e-mail: changleidai@hotmail.com

DONG, Xianfu

Administration Bureau of Qinghai Local Railway  
Wusi Street No.72, Xining, China, 810008, e-mail: dongxianfu100@sina.com

DU, Shao-min  
School of Water Conservancy & Electric-power, Heilongjiang University  
Mailbox 179, No.74 of Xuefu Road, Nangang District, Harbin, China 150080

FANG, Jianhong  
Qinghai Research Institute of Transportation  
Qinghai, China 81000

FANG, Lili  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

FENG, Wenjie  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: wenjief@lzb.ac.cn

GAO, Zhan-kun  
Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin China, 150080  
Heilongjiang Seasonal Frozen Soil Region Engineering Frozen Soil Key Laboratory, Harbin, China

GHAZAVI, Mahmoud  
Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology  
Mirdamad junction, Vali asr Str, Tehran, Iran, e-mail: m\_ghazavi@kntu.ac.ir

HU, Jun  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

JIAO, Gui-de  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

KOZLOWSKI, Tomasz  
Kielce University of Technology  
Al. Tysiaclecia Panstwa Polskiego 7, Kielce, Poland, 25-314, e-mail: tomkoz@tu.kielce.pl

KUHRY, Peter  
Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University  
106 91 Stockholm, Sweden, e-mail: peter.kuhry@natgeo.su.se

LI, Dongqing  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: dqli@lzb.ac.cn

LI, Guoyu  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

LI, Hui Yu  
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080, e-mail: Candy\_li@mail.ru

LI, Shuangyang  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions  
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Donggang West Road 320, Lanzhou, China, 730000

LIN, Zhanju  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Lanzhou, Gansu, China 730000

LIU, Hua  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Lanzhou, Gansu, China 730000, e-mail: qyxuan911@163.com

LIU, Jiankun  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
No.3 Shang Yuan Cun, Hai Dian District, Beijing, China 100044, e-mail: jkliu@bjtu.edu.cn

LIU, Shiwei  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

LU, Jiahao  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Lanzhou, Gansu, China 730000

LUO, Fei  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

MA, Wei  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: mawei@lzb.ac.cn

MAO, Weinan  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
Beijing, China, 100044

MARCHENKO, Sergei  
Geophysical Institute, University of Alaska  
903 Koyukuk Drive, Fairbanks, AK 99775, USA, e-mail: smarchenko@alaska.edu

MATTHES, Heidrun  
Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research  
Telegrafenberg A43, D-14473 Potsdam, Germany, e-mail: Heidrun.Matthes@awi.de

NIU, Fujun  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: niufujun@lzb.ac.cn



PENG, Liyun  
Beijing University of Civil Engineering and Architecture  
Beijing, China 100044

QI, Jilin  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

QIAN, Jin  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

RINKE, Annette  
Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research  
Telegrafenberg A43, D-14473 Potsdam, Germany, e-mail: Annette.Rinke@awi.de

ROMANOVSKY, Vladimir  
Geophysical Institute, University of Alaska  
903 Koyukuk Drive, Fairbanks, AK 99775, USA, e-mail: veromanovsky@alaska.edu

ROTH, Kurt  
Institute of Environmental Physics, Heidelberg University  
Im Neuenheimer Feld 229, D-69120, Heidelberg, Germany, e-mail: Kurt.Roth@iup.uni-heidelberg.de

ROUSTAEI, Mahya  
Civil Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology  
Mirdamad junction, Vali asr Str, Tehran, Iran, e-mail: mahya\_roustaei@yahoo.com

SHEN, Yupeng  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
No.3 Shang Yuan Cun, Hai Dian District, Beijing, China 100044, e-mail: ypshen@bjtu.edu.cn

SHENG, Yu  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

SHI, Feng  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
No.3 Shang Yuan Cun, Hai Dian District, Beijing, China 100044

SOLOVYOVA, Vera  
George Mason University  
4400 University Drive, Fairfax, Virginia 22030, e-mail: vsolovye@masonlive.gmu.edu

STENDEL, Martin  
Danish Meteorological Institute, Lyngbyvej 100, Copenhagen, Denmark, 2100, e-mail: mas@dmi.dk  
Greenland Climate Research Centre, Nuuk, Greenland

SU, Kai  
Graduate University of Chinese Academy of Sciences  
Beijing, China

SUN, Jing-lu  
Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin China, 150080  
Heilongjiang Seasonal Frozen Soil Region Engineering Frozen Soil Key Laboratory, Harbin, China

SUN, Liping  
Administration Bureau of Qinghai Local Railway  
Wusi Street No.72, Xining, China, 810008

SUN, Zhizhong  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

TIAN, Yahu  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
No.3 Shang Yuan Cun, Hai Dian District, Beijing, China, 100044, e-mail: yhtian@bjtu.edu.cn

WANG, Baolin  
Geological Survey of Canada  
601 Booth St., Ottawa, ON, Canada, K1A 0E8, e-mail: bwang@nrcan.gc.ca

WANG, En-liang  
Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute  
Harbin China, 150080, e-mail: HLJSKYWEL@163.com  
Heilongjiang Seasonal Frozen Soil Region Engineering Frozen Soil Key Laboratory, Harbin, China.

WANG, Ji-liang  
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080, e-mail: wangjiliang@sohu.com

WANG, Junfeng  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Donggang West Road 320, Lanzhou, Gansu, China 730000, e-mail: wangjf2008@lzb.ac.cn

WOLLSCHLAGER, Ute  
Institute of Environmental Physics, Heidelberg University  
Im Neuenheimer Feld 229, D-69120 Heidelberg, Germany

WU, Qingbai  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Donggang West Road 320, Lanzhou, Gansu, China 730000, e-mail: qbwu@lzb.ac.cn

XU, Anhua  
Qinghai Research Institute of Transportation  
Xining Qinghai, China

YANG, Chengsong  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: ychsong@lzb.ac.cn  
YAO, Xiaoliang

State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000, e-mail: yaoxl@lzb.ac.cn

YOU, Yanhui  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: yanhui\_you@lzb.ac.cn

YU, Ming  
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080

YU, Qihao  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: yuqh@lzb.ac.cn

YU, Wenbing  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

ZHANG, Chen-xi  
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080

ZHANG, Hu  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: a3708303977@126.com

ZHANG, Jianming  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China

ZHANG, Shujuan  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions  
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
Donggang West Road 320, Lanzhou, China, 730000, e-mail: sjzhang@lzb.ac.cn

ZHANG, Yu  
School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University  
Beijing, China, 100044, e-mail: 09115268@bjtu.edu.cn  
School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu, China

ZHANG, Ze  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: shuping@hotmail.com

ZHAO, Shu-ping  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
320 Donggang West Road, Lanzhou 730000, China, e-mail: binghui@lzb.ac.cn

ZHENG, Jianfeng  
State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences  
326 Donggang West Road, Lanzhou, China 730000

ZHU, Lei  
Heilongjiang Cold Region Construction Science Research Institute  
60, Qingbin Road, Nangang District, Harbin, China 150080, e-mail: Zhulei1962@yahoo.com.cn

## СПИСОК РОССИЙСКИХ УЧАСТНИКОВ СИМПОЗИУМА

### АКИМОВ МИР ПЕТРОВИЧ

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,  
старший преподаватель кафедры прикладной математики Института математики и информатики.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, 48, КФЕН, ИМИ.  
E-mail: mirpet@mail.ru  
Тел.: 8 924 861 90 60.

### АЛЕКСЕЕВА ОЛЬГА ИВАНОВНА

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО  
РАН, ученый секретарь, к.т.н.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: o.i.alekseeva@mpi.usn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-02. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

### АНИКИН ГЕННАДИЙ ФЕДОРОВИЧ

НПО Фундаментстройаркос,  
ведущий научный сотрудник.  
625000, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12.  
E-mail: fsa@npo-fsa.ru  
Тел. 8 (3452) 22-54-94. Факс: 8 (3452) 52-02-40.

### БАЯСАН РАФИК МАМЕДОВИЧ

АОЗТ "Интер Хит Пайп",  
генеральный директор.  
117463, г. Москва, ул. Паустовского, д. 4, офис 86.  
E-mail: asanov.img@yandex.ru  
Тел: 8 (499) 724-44-50. Моб: 8 915 294 33 97.

### БАЯСАН ТАТЬЯНА ВАСИЛЬЕВНА

АОЗТ "Интер Хит Пайп",  
главный специалист.  
117463, г. Москва, ул. Паустовского, д. 4, офис 86.  
E-mail: asanov.img@yandex.ru  
Тел: 8 (499) 724-44-50, сот.: 8 900 522 91 34.

### БЕЗВОЛЕВ СТЕПАН ГЕОРГИЕВИЧ

НИИОСП им. Н. М. Герсевича,  
старший научный сотрудник.  
109428, г. Москва, Рязанский проспект, 59.  
E-mail: comrgeo@yandex.ru  
Тел.: 8 (499) 170-18-26.

### БОНДАРЕНКО ГАЛИНА ИВАНОВНА

НИИОСП им. Н. М. Герсевича, лаборатория № 8,  
зав. лабораторией.  
109428, г. Москва, Рязанский проспект, 59.  
E-mail: labor8niiosp@yandex.ru  
Тел.: 8 (499) 170-28-21. Факс: 8 (499) 170-28-21.

### БЫКОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

Институт физического материаловедения СО РАН Бурятский научный центр  
Сибирского отделения РАН, аспирант.  
670047, г. Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6.  
E-mail: evgomod@yahoo.com  
Тел.: 8 914 839 38 28.



**ВАРЛАМОВ СТЕПАН ПРОКОПЬЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
старший научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: [vsp@mpi.ysn.ru](mailto:vsp@mpi.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-08-32. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ВАСЮТИЧ ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА**

Читинский государственный университет, кафедра гидрогеологии и инженерной геологии,  
доцент.

672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, ЧитГУ.

E-mail: [lyudmila-vasyuti@mail.ru](mailto:lyudmila-vasyuti@mail.ru)

Тел.: раб. 8 (3022) 26-18-26.

**ВЕЛИКИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Вилуйская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения  
им. П. И. Мельникова СО РАН,

начальник станции.

678185, Республика Саха (Якутия), Мирнинский р-н, пос. Чернышевский.

E-mail: [frozen@mirny.sakha.ru](mailto:frozen@mirny.sakha.ru)

Тел.: 8 (411 36) 7-34-43. Факс: 8 (411 36) 7-21-46.

**ВЕРХОТУРОВ АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ**

Читинский государственный университет,

зав. кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии.

672039, г. Чита, ул. Инструментальная, 4, кв. 30.

E-mail: [weral0606@yandex.ru](mailto:weral0606@yandex.ru)

Тел.: 8 (3022) 26-18-26, сот. 8 914 488 15 33.

**ВИНОКУРОВ АЛЬБЕРТ ТИХОНОВИЧ**

ОАО «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства»,  
зав. ЛОНИ ОСМиК.

677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Дзержинского, 20.

E-mail: [vinalt@mail.ru](mailto:vinalt@mail.ru)

Тел.: 8 (4112) 45-30-74. Факс: 8 (4112) 45-22-95.

**ВЛАДОВ МИХАИЛ ЛЬВОВИЧ**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Геологический факультет,  
кафедра сейсмологии

Профессор, д.ф.-м.н.

119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы

Тел.: 8 (495) 939-33-42

**ВЛАСОВ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ**

НПО Фундаментстройаркос,

начальник строительного отдела.

62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12.

E-mail: [fsa@npo-fsa.ru](mailto:fsa@npo-fsa.ru)

Тел.: 8 (3452) 22-54-94. Факс: 8 (3452) 52-02-40.

**ГАВРИЛЬЕВ РЕВ ИВАНОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

E-mail: [gubanova@mpi.ysn.ru](mailto:gubanova@mpi.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-08-74. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ГАЛАНИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

E-mail: agalanin@gmail.com

Тел.: 8 914 864 76 23. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ГОЛУБИН СТАНИСЛАВ ИГОРЕВИЧ**

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

главный специалист.

142117, Московская обл., пос. Развилка.

E-mail: asanov.imr@yandex.ru

Тел. сот.: 8 926 228 18 83.

**ГОНЧАРОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

Сибирский Федеральный Университет,

550041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82.

Тел.: 8 3912 27 66 14.

**ГОТОВЦЕВ СЕМЕН ПЕТРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
старший научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: gotovcev@mpi.uysn.ru

Тел.: 8 (4112) 39-08-55. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ГРИБ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ**

Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Аммосова в г. Нерюнгри,  
директор института.

678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри.

E-mail: grib@nfygu.ru

Тел.: 8 (41-147) 4-49-38. Факс: 8 (41-147) 4-49-83.

**ГРИГОРЬЕВ МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
зам. директора по научной работе.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: grigoriev@mpi.ysn.ru

Тел.: 8 (4112) 39-08-07. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ГУЛЫЙ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлот-  
ная станция Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
начальник станции.

685000, г. Магадан, ул. Гагарина, 12.

E-mail: svnims@mail.ru

Тел.: 8 (413 2) 65-59-15. Факс: 8 (413 2) 65-39-89.

**ГУРЬЯНОВ ИГОРЬ ЕМЕЛЬЯНОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

E-mail: guryanov@mpi.ysn.ru

Тел.: 8 (4112) 39-09-70. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

ДОЛГИХ ГРИГОРИЙ МЕРКУЛОВИЧ  
ООО НПО «Фундаментстройаркос»,  
генеральный директор.  
625014, г. Тюмень, ул. Новаторов, 12.  
E-mail: fsa@ttknet.ru  
Тел.: 8 (3452) 21-1735. Факс: 8 (3452) 21-08-39.

ДОЛГИХ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ  
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА»,  
начальник гидротехнического отдела.  
678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Ленина, 39.  
E-mail: sdolgih@yna.alrosa-mir.ru  
Тел./факс: 8 (41136) 9-09-58. Факс: 8 (41136) 3-19-92.

ДОРОФЕЕВ ИВАН ВАСИЛЬЕВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: doroveeviv@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-15. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

ЕРМАКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
зав. лабораторией открытых горных работ, старший научный сотрудник.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: gtf@igds.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-00-65. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

ЕФИМОВ ВАСИЛИЙ МОИСЕЕВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
зам. директора.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: v.m.efimov@iptpn.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-06-04. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

ЕФРЕМОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: vne@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-39. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

ЗАБОЛОТНИК ПАВЕЛ СТАНИСЛАВОВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер-исследователь.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: zabolotnik@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-57. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

ЗАБОЛОТНИК СТАНИСЛАВ ИВАНОВИЧ  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: zabolotnik@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-57. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ЗАХАРОВ А. И.**

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова,  
Московской обл., г. Фрязино.

**ЗАХАРОВА ВАЛЕНТИНА НИКОЛАЕВНА**

ООО НПО «Фундаментстройаркос»,  
руководитель группы прогнозных расчетов.  
62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12.  
E-mail: fsa@npo-fsa.ru  
Тел.: 8 (3452) 22- 54-94. Факс: 8 (3452) 52-02-40.

**ЗЕПАЛОВ ФЕДОР НИКОЛАЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Игарская геокриологическая лаборатория филиал  
учреждения РАН Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер-исследователь.  
663200, Красноярский край, Туруханский район, г. Игарка, 1, микрорайон, д. 8а.  
E-mail: kukareku85@mail.ru  
Тел./факс: 8 (39172) 2-14-26.

**ИВАНОВА ЛЕНА ДМИТРИЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий инженер.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: pavlova@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-18. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ИСАЕВ ОЛЕГ НИКОЛАЕВИЧ**

НИИОСП им. Н. М. Герсванова,  
ведущий научный сотрудник.  
109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, стр. 12.  
E-mail: geotechnika2008@gmail.com  
Тел.: 8 963 620 77 60. Факс: 8 (499) 170-27-80.

**КАВЕРИН ДМИТРИЙ**

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,  
г. Сыктывкар.

**КАЙМОНОВ МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
научный сотрудник.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: gtf@igds.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-00-65. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

**КАПИТОНОВА ТАМАРА АФАНАСЬЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
ученый секретарь, к.ф.-м.н.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-06-05. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

**КАЧАЕВ АНДРЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Аммосова в г. Нерюнгри,  
зав. лабораторией физики горных пород.  
678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Южно-Якутская, 23.  
E-mail: kachaev67@gmail.com Тел.: 8 924 160 64 41.



**КОНОВАЛОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Институт проблем освоения Севера СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
625003, г. Тюмень, а/я 2774.  
E-mail: konov7@rambler.ru  
Тел.: 8 (3452) 40-19-89. Факс: 8 (3452) 68-87-82.

**КРИВОНОГОВА НИНЕЛЬ ФЕДОРОВНА**

ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»,  
зав. лабораторией инженерной геологии и геоэкологии.  
195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.  
E-mail: Ing-geo@ground.vniig.ru, fedako@mail.ru  
Тел.: (812) 493-93-62.

**КУДРЯВЦЕВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ**

Дальневосточный государственный университет путей сообщения,  
профессор.  
680021, Хабаровск, ул. Серышева, д. 47.  
E-mail: kudr@festu.khv.ru,  
Тел.: 8 924 208 29 29, 8 914 190 78 35.

**КУЗЬМИН ГЕОРГИЙ ПЕТРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-38. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**КУЗНЕЦОВ ПАВЕЛ ЮРЬЕВИЧ**

Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Аммосова в г. Нерюнгри,  
доцент кафедры горного дела, к.г.-м.н.  
678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Южно-Якутская, 23.  
E-mail: grib@nfygu.ru  
Тел.: 8 914 249 62 34.

**КУТВИЦКАЯ НАТАЛЬЯ БОРИСОВНА**

ОАО «Фундаментпроект»,  
старший научный сотрудник, к.т.н.  
125993, г. Москва, Волоколамское ш., д.1, стр. 1.  
E-mail: otim@fundamnt.ru  
Тел.: 8 (495) 787-78-38, 8 (495) 787-49-95. Факс: 8 (495) 787-78-38, 8 (499) 158-30-78.

**ЛЕБЕДЕВ МИХАИЛ ПЕТРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
директор, д.т.н.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-06-01. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

**ЛИТОВКО АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий инженер.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: Lav\_84@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-45. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**МАКАРОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
зав. лабораторией геохимии.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: makarov@mpi.usn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-26. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**МАЛЫШЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Виллойская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения СО РАН,  
зам. начальника станции.  
678185, Республика Саха (Якутия), Мирнинский р-н, пос. Чернышевский.  
E-mail: frozen@mirny.sakha.ru  
Тел.: 8 (411 36). Факс: 8 (411 36) 7-21-46.

**МАРАМЫГИНА МАРИЯ СЕРЕГЕЕВНА**

ГП «Промнефтегазэкология»,  
инженер.  
62500, г. Тюмень, ул. Республики, д. 207, оф. 705.  
E-mail: ekol@sibtel.ru  
Тел./факс: 8 (3452) 27-37-72.

**МАТВЕЕВА ОЛЬГА ИННОКЕНЬТЕВНА**

ОАО «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства»,  
генеральный директор.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Дзержинского, 20.  
E-mail: matveevaoi@mail.ru  
Тел./факс: 8 (4112) 45-22-95.

**МЕЛЬНИКОВ АНДРЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ**

Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО Северо-Восточный федеральный университет  
им. М. К. Аммосова,  
старший лаборант кафедры «Технология и техника разведки месторождений полезных ископаемых».  
678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Аммосова, 2/3.  
E-mail: MelnikowDron@mail.ru  
Тел.: раб. 8 (41-147) 6-45-38, сот. 8 924 160 46 38.

**МИРОНОВ ВАЛЕРИЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,  
зав. лабораторией радиофизики дистанционного зондирования, д.ф.-м.н.  
660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38.  
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru  
Тел./факс: 8 (392) 290-50-28.

**МОЗГАЧЕВА ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА**

НИИОСП им. Н. М. Герсевича,  
главный специалист.  
109428, г. Москва, Рязанский проспект, 59.  
E-mail: olga79108@yandex.ru  
Тел.: 8 (499) 170-27-39. Факс: 8 (499) 170-28-18.

**МОРОЗОВ РОМАН ВЛАДИМИРОВИЧ**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
ассистент кафедры дорожно-строительных машин.  
125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64.  
E-mail: dormash@madi.ru  
Тел.: 8 (499) 155-0797. Факс 8 (499) 151-8965.

**НЕКЛЮДОВ ВИТАЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**

Вилуйская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий инженер.  
678185, Республика Саха (Якутия), Мирнинский р-н, пос. Чернышевский.  
E-mail: frozen@mirny.sakha.ru  
Тел./факс: 8 (411 36) 7-21-46.

**НЕРАДОВСКИЙ ЛЕОНИД ГЕОРГИЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
старший научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: leoner@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-14. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**НИКИТИН ВАЛЕРИЙ МЕФОДИЕВИЧ**

Технический институт (филиал) ФГАОУ ВПО Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова в г. Нерюнгри,  
зам. директора института по научной работе.  
678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Южно-Якутская, 23.  
E-mail: yugumir@mirny.yakutia.ru  
Тел.: 8 (24722) 449-83.

**НИКОЛАЕВ ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ**

ОАО «Якутский государственный проектный, научно-исследовательский институт строительства»,  
научный сотрудник ЛОНИ ОСМиК.  
677000, г. Якутск, ул. Дзержинского, 20.  
E-mail: Taurus16@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 45-30-74. Факс: 8 (4112) 45-22-95.

**ОКУНЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

ООО НПО «Фундаментстройаркос»,  
главный инженер.  
625014, г. Тюмень, ул. Новаторов, 12.  
E-mail: nauka-fsa@mail.ru  
Тел.: 8 (3452) 22-53-25. Факс: 8 (3452) 52-02-40.

**ОМЕЛЬЯНЕНКО АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
зав. лабораторией, д.т.н.  
677018 г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: alex@igds.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 33-59-30, 8 (4112) 39-06-90.

**ПАВЛОВ СЕРГЕЙ СТЕПАНОВИЧ**

ГОУ СПО «Нерюнгринский политехнический колледж»,  
директор, к.г.-м.н.  
678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Кравченко, 16/1.  
E-mail: Pavlov\_SS@mail.ru  
Тел.: 8 (41-147) 4-02-41, сот. 8-924-160-84-82.

**ПАВЛОВА НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
зав. лабораторией подземных вод криолитозоны.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: pavlova@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-12. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ПАНИН ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер-исследователь.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-38. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ПАНИЧЕВ АРТЕМ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Виллойская научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения  
им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер.  
678185, Республика Саха (Якутия), Мирнинский р-н, пос. Чернышевский.  
E-mail: frozen@mirny.sakha.ru  
Тел./факс: 8 (411 36) 7-21-46.

**ПАНИШЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского  
СО РАН,  
старший научный сотрудник.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: gtf@igds.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-00-65. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

**ПЕТРУХИН ВАЛЕРИЙ ПЕТРОВИЧ**

НИИОСП им. Н. М. Герсеева,  
директор, профессор, д.т.н.  
109428, г. Москва, Рязанский проспект, 59.  
E-mail: niiosp@niiosp.ru  
Тел./факс: 8 (499) 171-22-40. Факс: 8 (499) 170-27-57.

**ПОЗНАРКОВА СВЕТЛАНА ВАСИЛЬЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Игарская геокриологическая лаборатория филиал  
учреждения РАН Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер-исследователь.  
663200, Красноярский край, Туруханский район, г. Игарка, 1, микрорайон, д. 8а.  
E-mail: svetik\_ig@mail.ru  
Тел./факс: 8 (39172) 2-14-26. Тел.: 8 913 529 25 95.

**ПОПЕНКО ФЕДОР ЕЛИСЕЕВИЧ**

ООО Научно-внедренческий центр «Геотехнология»,  
директор.  
677008, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Виллойский тракт, 5 км.  
E-mail: geotechnologia@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 36-88-33.

**ПОПОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского  
СО РАН,  
старший научный сотрудник.  
677018, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: popov.gtf@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-00-65. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

**ПОПОВИЧ АЛЕКСЕЙ ПАНЬКОВИЧ**

Инженерно-строительный институт Сибирский Федеральный Университет,  
доцент кафедры строительных конструкций.  
550041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82.



**ПУСТОВОЙТ ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ**  
Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова,  
старший научный сотрудник.  
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы.  
E-mail: [egc@geol.msu.ru](mailto:egc@geol.msu.ru)  
Тел.: 8 (495) 939-49-19.

**РАЗУМОВ СЕРГЕЙ ОЛЕГОВИЧ**  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
зав. лабораторией криогенных процессов.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: [razumov@mri.ysn.ru](mailto:razumov@mri.ysn.ru)  
Тел.: 8 (4112) 39-08-91. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**РАСТЕГАЕВ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ**  
Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: [rastegaev2009@yandex.ru](mailto:rastegaev2009@yandex.ru)  
Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**РИВКИН ФЕЛИКС**  
ОАО «Фундаментпроект»,  
г. Москва.

**РОЖИН ИГОРЬ ИВАНОВИЧ**  
Учреждение Российской академии наук Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
старший научный сотрудник.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: [rozhin@ipng.ysn.ru](mailto:rozhin@ipng.ysn.ru)  
Тел.: 8 (4112) 39-06-32. Факс: 8 (4112) 33-63-57.

**РОЖЕЛЕВСКИЙ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ**  
Учреждение Российской академии наук Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер.  
685000, г. Магадан, ул. Гагарина, 12.  
E-mail: [svnims@mail.ru](mailto:svnims@mail.ru)  
Тел.: 8 (4132) 65-52-61. Факс: 8 (4132) 65-39-89.

**РЫКОВА ВАЛЕНТИНА ВИКТОРОВНА**  
Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук,  
старший научный сотрудник Отдела научной библиографии.  
630200, г. Новосибирск, ул. Восход, 15.  
E-mail: [onbryk@spsl.nsc.ru](mailto:onbryk@spsl.nsc.ru)  
Тел.: 8 (383) 266-10-93. Факс: 8 (383) 266-33-65.

**САВВИН ДЕНИС ВАЛЕРЬЕВИЧ**  
Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
старший инженер.  
677018, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.  
E-mail: [geohhisic@mail.ru](mailto:geohhisic@mail.ru)  
Тел.: 8 (4112) 39-00-74. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

**СЕМЕНОВА НАТАЛЬЯ ПРОКОПЬЕВНА**

Министерство архитектуры и строительного комплекса РС(Я),  
главный специалист отдела архитектуры и проектирования.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Аммосова, 8.  
E-mail: semnatpro@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 42-56-01. Факс: 8 (4112) 34-14-13.

**СЕРДОБОВ ВАСИЛИЙ БОРИСОВИЧ**

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,  
старший преподаватель кафедры дорожно-строительных машин.  
125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64.  
E-mail: serdobov\_2001@rambler.ru  
Тел.: 8 (499) 155-0797. Факс: 8 (499) 151-89-65.

**СИВЦЕВ АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
научный сотрудник.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: maraday@yandex.ru  
Тел.: 8 (4112) 33-50-14. Факс: 8 (4112) 33-50-14.

**СКАЧКОВ ЮРИЙ БОРИСОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
старший научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: skachkov@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-40. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**СКРЯБИН ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий научный сотрудник.  
677010, Россия, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.  
E-mail: gubanova@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-40. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**СЛЕПЦОВ ОЛЕГ ИВКЕНТЬЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
зав. отделом, д.т.н., профессор.  
677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.  
E-mail: o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-06-02. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

**СЛЕПЦОВА ЮЛИЯ ГРИГОРЬЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий инженер.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: yul8712@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-80. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**СОБОЛЬ ИЛЬЯ СТАНИСЛАВОВИЧ**

ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
доцент кафедры гидротехнических сооружений, к.т.н.  
603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
E-mail: gs@nngasu.ru  
Тел.: 8 (831) 430-42-89. Факс: 8 (831) 430-42-89.

**СОКОЛОВ КИРИЛЛ ОЛЕГОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
младший научный сотрудник.

677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.

E-mail: [\\_ksokolov@myrambler.ru](mailto:_ksokolov@myrambler.ru)

Тел.: 8 (4112)33-59-30, 8 (4112 ) 39-00-74.

**СПЕКТОР ВАЛЕНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: [vvspector@mpi.ysn.ru](mailto:vvspector@mpi.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-08-46. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**СПЕКТОР ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

E-mail: [vbspector@mpi.ysn.ru](mailto:vbspector@mpi.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-08-46. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**СТЕПАНОВ АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
главный научный сотрудник.

677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.

E-mail: [a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru](mailto:a.v.stepanov@iptpn.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-06-13. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

**СТРИЖКОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

НПО «Фундаментстройаркос»,  
начальник научной части.

62500, г. Тюмень, ул. Новаторов, д. 12.

E-mail: [fsa@npo-fsa.ru](mailto:fsa@npo-fsa.ru)

Тел./факс: 8 (3452) 26-13-78.

**СТРУЧКОВА ГАЛИНА ПРОКОПЬЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт физико-технических проблем Севера  
им. В. П. Ларионова СО РАН,  
ведущий научный сотрудник.

677890, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Октябрьская, 1.

E-mail: [g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru](mailto:g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru)

Тел.: 8 (4112) 39-05-50. Факс: 8 (4112) 33-66-65.

**СУВОРОВА МАРИЯ СЕРГЕЕВНА**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Геологический факультет,  
кафедра сейсмологии,  
студентка 3-го курса.

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы.

Тел.: 8 (495) 939-33-42.

**СЯСЬКО АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Технический институт (ф) ФГАОУ ВПО Северо-Восточного федерального университета  
им. М. К. Амосова в г. Нерюнгри,

доцент кафедры математики и информатики, к.т.н.

678960, Республика Саха (Якутия), г. Нерюнгри, ул. Южно-Якутская, 23.

E-mail: [siasko@rambler.ru](mailto:siasko@rambler.ru) Тел.: 8 914 240 84 46.

**ТОРГОВКИН НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
техник.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: nikolajj-torgovkin@rambler.ru

Тел.: 8 964 422 26 38. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ТОРГОВКИН ЯРОСЛАВ ИЛЬИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
руководитель группы геоинформатики.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: torgovkin@mpi.ysn.ru

Тел.: 8 (4112) 39-08-75. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**УРБАН АННА АЛЕКСЕЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
инженер-исследователь.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Мерзлотная, 36.

E-mail: ankaurban@mail.ru

Тел.: 8 (4112) 39-08-17. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ФЕДОРОВ ДАНИЛА КОНСТАНТИНОВИЧ**

ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева»,

заместитель заведующего лабораторией инженерной геологии и геокриологии.

195220, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21.

E-mail: Ing-geo@ground.vniig.ru, fedako@mail.ru

Тел.: 8 (812) 493-93-62, 8 (911) 176- 98-56.

**ФЕДОРОВА Г. Д.**

ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова»,  
г. Якутск.

**ФЕДОРОВА ЛАРИСА ЛУКИНИЧНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
старший научный сотрудник лаборатории георадиолокации.

677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, пр. Ленина, 43.

E-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Тел.: 8 (4112) 39-06-91. Факс: 8 (4112) 33-59-30.

**ХОХЛОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
аспирант.

603000, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.

E-mail: gs\_hohlov@mail.ru

Тел.: +7-920-031-57-41.

**ЦЕЕВА АНАСТАСИЯ НИКОЛАЕВНА**

ОАО «Якутский проектный научно-исследовательский институт строительства»,  
зав. отделом оснований и фундаментов.

677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Дзержинского, 20.

E-mail: antseeva@yapniis.ysn.ru

Тел.: 8 (4112) 45-21-25.

**ЧЖАН РУДОЛЬФ ВЛАДИМИРОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
директор института, д.т.н.

677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

E-mail: zhang@mpi.ysn.ru Тел.: 8 (4112) 39-08-01. Факс: 8 (4112) 33-44-76.



**ЧЖАН ТАТЬЯНА РУДОЛЬФОВНА**

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,  
старший преподаватель.  
677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, 48.  
E-mail: Tashachzhan@yandex.ru  
Тел.: 8 914 270 66 95.

**ЧИЖУК АЛЕНА ЛЕОНИДОВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
ведущий инженер.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: chizuk82@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-77. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ЧИМИТДОРЖИЕВ ТУМЕН НАМЖИЛОВИЧ**

Институт физического материаловедения СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8.  
E-mail: ofr@bscnet.ru Тел.: 8 (3012) 43-31-84. Факс: 8 (3012) 43-32-38.

**ШЕВЦОВА ЭЛЛА ЮРЬЕВНА**

Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения РАН,  
научный сотрудник.  
630200, г. Новосибирск, ул. Восход, 15.  
E-mail: onbryk@spsl.nsc.ru Тел.: 8 (383) 266-10-93. Факс: 8 (383) 266-33-65.

**ШЕНДЕР НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: vsp@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-10. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ШЕПЕЛЁВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
зам. директора по научной работе, д.г.-м.н., профессор.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: shepelev@mpi.ysn.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-13. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ШЕСТАКОВА АЛЕНА АЛЕКСЕЕВНА**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
младший научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: aashest@mail.ru  
Тел.: 8 (4112) 39-08-43. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ШЕСТЕРНЁВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ**

Учреждение Российской академии наук Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН,  
главный научный сотрудник.  
677010, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.  
E-mail: shesternev@mpi.ysn.ru Тел.: 8 (4112) 39-08-85. Факс: 8 (4112) 33-44-76.

**ШИБАЕВ СЕРГЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**

Якутский филиал Геофизической службы СО РАН,  
директор.  
677980, г. Якутск, ул. Чернышевского, д. 16, кв. 35.  
E-mail: shibaev@emsd.ysn.ru Тел./факс: 8 (4112) 33-51-88.

ШТОКОЛОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения,  
аспирант.

680021, Хабаровск, ул. Серышева, д. 47.

E-mail: kudr@festu.khv.ru

Тел.: 8 924 208 29 29, 8 914 190 78 35.

ШУЛЯТЬЕВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ

НИИОСП им. Н. М. Герсванова, лаборатория № 8,

зам. директора.

109428, г. Москва, Рязанский проспект, 59.

E-mail: lab08@niiosp.ru

Тел./факс: 8 (499) 171-22-40. Факс: 8 (499) 170-27-57.

## AUTHOR INDEX

AGHABARATI, Hassan	161	LU, Jiahao	45
BING, Hui	38	LUO, Fei	184
CHANG, Jun-de	167	MA, Wei	38, 184, 319
CHE, Tao	337	MAO, Weinan	326
CHEN, Ji	312	MARCHENKO, Sergei	493
CHENG, Guodong	337	MATTHES, Heidrun	493
CHRISTENSEN, Jens Hesselbjerg	493	NIU, Fujun	45, 337
CROLL, James G. A.	144	PENG, Liyun	331
DAANEN, Ronald	493	QI, Jilin	38, 343
DAI, Chang-lei	487	QIAN, Jin	349
DONG, Xianfu	312	RINKE, Annette	493
DU, Shao-min	487	RIVKIN, Felix	493
FANG, Jianhong	331, 358	ROMANOVSKY, Vladimir	493
FANG, Lili	38	ROTH, Kurt	509
FENG, Wenjie	319	ROUSTAEI, Mahya	150, 161
GAO, Zhan-kun	167	SHENG, Yu	312
GHAZAVI, Mahmoud	150, 161	SHI, Feng	331
HU, Jun	349, 509	STENDEL, Martin	493
JIAO, Gui-de	184	SU, Kai	172
KAVERIN DMITRI	493	SUN, Jing-lu	167
KOZLOWSKI, Tomasz	155	SUN, Liping	312
KUHRY, Peter	493	SUN, Zhizhong	178, 319
LI, Guoyu	319	TIAN, Yahu	326
LI, Shuangyang	178	WANG, Baolin	498
LIN, Zhanju	45	WANG, En-liang	176, 369
LIU, Hua	45	WANG, Ji-liang	364
LIU, Jiankun	326, 331, 358	WANG, Junfeng	503
LIU, Shiwei	172	WOLLSCHLAGER, Ute	509

WU, Qingbai	503	ZHANG, Hu	172
XU, Anhua	358	ZHANG, Jianming	172
YANG, Chengsong	337	ZHANG, Shujuan	178
YAO, Xiaoliang	343	ZHANG, Yu	358
YOU, Yanhui	349, 509	ZHANG, Yun-de	167
YU, Qihao	349, 509	ZHAO, Shu-ping	138, 184
YU, Wenbing	319	ZHENG, Jianfeng	319
ZHANG, Chen-xi	364, 369		

### ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

АКИМОВ Мир Петрович	221	ГОЛУБИН Станислав Игоревич	225
АЛЕКСЕЕВА Ольга Ивановна	18	ГОНЧАРОВ Юрий Михайлович	515
АНИКИН Геннадий Петрович	284	ГОТОВЦЕВ Семен Петрович	394
БАЯСАН Рафик Мамедович	225	ГРИБ Николай Николаевич	433
БАЯСАН Татьяна Васильевна	225	ГРИГОРЬЕВ Михаил Николаевич	482
БЕЗВОЛЕВ Степан Георгиевич	197	ГУЛЫЙ Сергей Александрович	231, 237
БЕЛЕЦКИЙ Э. В.	197	ГУРЬЯНОВ Игорь Емельянович	96, 104
БОНДАРЕНКО Галина Ивановна	197	ДОЛГИХ Григорий Меркулович	280, 284, 288
БЫКОВ Михаил Евгеньевич	482	ДОЛГИХ Сергей Николаевич	280, 288
ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич	204, 276, 398, 444	ДОРОФЕЕВ Иван Васильевич	78
ВАСЮТИЧ Людмила Александровна	429	ЕРМАКОВ Сергей Александрович	127
ВЕЛИКИН Сергей Александрович	24, 191	ЕФИМОВ Василий Моисеевич	384
ВЕРХОТУРОВ Алексей Геннадьевич	83	ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич	469
ВИНОКУРОВ Альберт Тихонович	306	ЗАБОЛОТНИК Павел Станиславович	273
ВЛАДОВ Михаил Львович	476	ЗАБОЛОТНИК Станислав Иванович	273
ВЛАСОВ Владимир Федорович	284	ЗАХАРОВ А. И.	482
ГАВРИЛЬЕВ Рев Иванович	132, 404	ЗАХАРОВА Валентина Николаевна	280
ГАЛАНИН Алексей Александрович	410	ЗЕПАЛОВ Федор Николаевич	246



ИВАНОВА Лена Дмитриевна	18, 417	ПАВЛОВА Надежда Анатольевна	417
ИСАЕВ Олег Николаевич	63, 68	ПАНИН Владимир Николаевич	74
КАЙМОНОВ Михаил Васильевич	127	ПАНИЧЕВ Артем Владимирович	191
КАПИТОНОВА Тамара Афанасьевна	375, 384	ПАНИШЕВ Сергей Викторович	127
КАЧАЕВ Андрей Викторович	433	ПЕТРУХИН Валерий Петрович	197
КОНОВАЛОВ Александр Александрович	90	ПОЗНАРКОВА Светлана Васильевна	246
КРИВОНОГОВА Нинель Федоровна	53	ПОПЕНКО Федор Елисеевич	33, 215
КУДРЯВЦЕВ Сергей Анатольевич	292	ПОПОВ Владимир Иванович	110
КУЗЬМИН Георгий Петрович	59, 74	ПОПОВИЧ Алексей Панькович	515
КУЗНЕЦОВ Павел Юрьевич	433	ПУСТОВОЙТ Григорий Петрович	225
КУТВИЦКАЯ Наталья Борисовна	296	РАЗУМОВ Сергей Олегович	121
ЛЕБЕДЕВ Михаил Петрович	375	РАСТЕГАЕВ Игорь Константинович	24, 300
ЛИТОВКО Андрей Владимирович	261, 267	РОЖИН Игорь Иванович	215, 422
МАКАРОВ Владимир Николаевич	455, 463	РОЖЕЛЕВСКИЙ Игорь Константинович	231
МАЛЫШЕВ Андрей Владимирович	191	РОМАШКО Г. Б.	197
МАРАМЫГИНА Мария Сергеевна	280	РЫКОВА Валентина Викторовна	519
МАТВЕЕВА Ольга Иннокентьевна	306	САВВИН Денис Валерьевич	439
МЕЛЬНИКОВ Андрей Евгеньевич	243	САМОЛЕТОВ Ю. Ю.	197
МИРОНОВ Валерий Леонидович	482	СЕМЕНОВА Наталья Прокопьевна	296
МОЗГАЧЕВА Ольга Анатольевна	197	СЕРДОБОВ Василий Борисович	300
МОРОЗОВ Роман Владимирович	300	СИВЦЕВ Алексей Иванович	422
НЕКЛЮДОВ Виталий Валентинович	191	СКАЧКОВ Юрий Борисович	389, 398, 444
НЕРАДОВСКИЙ Леонид Георгиевич	389, 476	СКРЯБИН Павел Николаевич	204, 210, 398, 444
НИКИТИН Валерий Мефодьевич	433	СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич	384
НИКОЛАЕВ Евгений Петрович	306	СЛЕПЦОВА Юлия Григорьевна	267, 375
ОКУНЕВ Сергей Николаевич	280, 284, 288	СОБОЛЬ Илья Станиславович	115
ОМЕЛЬЯНЕНКО Александр Васильевич	439	СОКОЛОВ Кирилл Олегович	450
ПАВЛОВ Сергей Степанович	243	СПЕКТОР Валентин Владимирович	18

СПЕКТОР Владимир Борисович	18	ЧЖАН Рудольф Владимирович	6, 7, 13, 18
СТЕПАНОВ Анатолий Викторович	215	ЧЖАН Татьяна Рудольфовна	379
СТРИЖКОВ Сергей Николаевич	284, 288	ЧИЖУК Алена Леонидовна	459
СТРУЧКОВА Галина Прокопьевна	375, 384	ЧИМИТДОРЖИЕВ Тумен Намжилович	482
СУВОРОВА Мария Сергеевна	476	ШЕНДЕР Н.И. Николай Иванович	204, 267, 398
СЯСЬКО Андрей Александрович	433	ШЕВЦОВА Элла Юрьевна	519
ТОРГОВКИН Николай Владимирович	463	ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич	379
ТОРГОВКИН Ярослав Ильич	18	ШЕСТАКОВА Алена Алексеевна	18
УРБАН Анна Алексеевна	78	ШЕСТЕРНЁВ Дмитрий Михайлович	252, 261, 267
ФЕДОРОВ Данила Константинович	53	ШИБАЕВ Сергей Валентинович	482
ФЕДОРОВА Г. Д.	306	ШТОКОЛОВ Александр Владимирович	292
ФЕДОРОВА Лариса Лукинична	439, 450	ШУЛЯТЬЕВ Олег Александрович	197
ХОХЛОВ Дмитрий Николаевич	115		
ЦЕЕВА Анастасия Николаевна	225		

## CONTENTS

PREFACE.....	5
INTRODUCTION.....	6
ACKNOWLEDGMENTS.....	8
ORGANIZING COMMITTEE.....	9
PLENARY PAPERS.....	11
<i>R.V. Zhang.</i> Melnikov Permafrost Institute investigations in support of the mega-projects in Yakutia, East Siberia.....	13
<i>R.V. Zhang, V.B. Spektor; O.I. Alekseeva, Ya.I. Torgovkin, A.A. Shestakova, L.D. Ivanova, V.V. Spektor.</i> Engineering and geocryological map of the Sakha Republic (Yakutia) and adjacent areas, scale 1:2,500,000.....	18
<i>I.K. Rastegaev, S.A. Velikin.</i> Status and prospects of pile foundation engineering in the Earth cryozone in view of global warming .....	24
<i>F.E. Popenko.</i> Engineering treatment of weak permafrost soils in seismic areas.....	33
<i>Wei MA, Lili FANG, Jilin QI.</i> Methodology of study on freeze-thaw cycling induced changes in engineering properties of soils.....	38
<i>Fujun NIU, Hua LIU, Zhanju LIN, Jiahao LU.</i> Physical changes of five types of rock in the Qinghai-Tibet Plateau under freeze-thaw cycles.....	45
 Session 1	
PHYSICS AND MECHANICS OF FROZEN GROUND, FROST ACTION, AND MODELING.....	51
<i>D.K. Fedorov, N.F. Krivonogova.</i> Cryogenic frost rebound forces applied to flexible surrounding structures.....	53
<i>G.P. Kuzmin.</i> Relationship among the physical properties of soils.....	59
<i>O.N. Isaev.</i> Static sounding for soil thawed and frozen condition identification.....	63
<i>O.N. Isaev.</i> Methods of frozen soil static sounding.....	68
<i>G.P. Kuzmin, V.N. Panin.</i> Method for determining frost heave of soils.....	74
<i>A.A. Urban, I.V. Dorofeev.</i> Frost-heave development and its form's manifestation (Yakutsk) .....	78
<i>A.G. Verhoturov.</i> Dangerous cryogenic processes in settlements of the Central Transbaikalia.....	83
<i>A.A. Konovalov.</i> Phase transitions and longevity of frozen ground.....	90
<i>I.E. Guryanov.</i> Bearing capacity of permafrost soils as a function of foundation type.....	96
<i>I.E. Guryanov.</i> A general procedure for field determination of bearing capacity of pile foundations in permafrost.....	104
<i>V. I. Popov.</i> Effect of alternating temperature on the process of frost weathering.....	110

<i>I.S. Sobol, D.N. Khokhlov.</i> Automation of modeling shore reorganization processes of reservoirs in the permafrost zone.....	115
<i>S.O. Razumov.</i> Modeling of geological cryogenic processes under changing natural and technogenic conditions.....	121
<i>M.V. Kaimonov, S.V. Panishev, S.A. Ermakov.</i> Simulation of the temperature regime of blasted permafrost.....	127
<i>R.I. Gavriliiev.</i> Analysis of temperature waves in a two-layer medium in permafrost with varying mean daily air temperature .....	132
<i>Hui BING, Shu-ping ZHAO.</i> Study on the failure mechanism of roadbed with saline soil under cyclical freeze-thaw .....	138
<i>James G A Croll.</i> Thermal ratchet uplift buckling and periglacial morphologies.....	144
<i>Mahmoud Ghazavi, Mahya Roustaei.</i> Laboratory evaluation of the behaviour of a geotextile reinforced clay on freeze-thaw cycles.....	150
<i>Tomasz Kozlowski.</i> Low temperature freezing of water adsorbed on clays in view of DSC and MDSC experiments.....	155
<i>Mahya Roustaei, Mahmoud Ghazavi, Hassan Aghabarati.</i> Strength characteristics of tire-clay mixtures in freeze-thaw cycles.....	161
<i>En-liang WANG, Jing-lu SUN, Zhan-kun GAO, Jun-de CHANG .</i> Experimental study on monitoring automation technology of freezing depth of seasonal frozen soil.....	167
<i>Hu ZHANG, Jianming ZHANG, Shiwei LIU, Kai SU.</i> Pressuremeter test in warm and ice-rich permafrost.....	172
<i>Shujuan ZHANG, Zhizhong SUN, Shuangyang LI.</i> Hysteretic energy and temperature behavior of frozen soils under cyclic loading.....	178
<i>Shu-ping ZHAO, Wei MA, Gui-de JIAO, Fei LUO.</i> The impact of freeze-thaw cycles on the dynamic characteristics of frozen Qinghai-Tibet clay .....	184
Session 2 THERMAL AND MECHANICAL INTERACTION BETWEEN ENGINEERING STRUCTURES AND FROZEN GROUND.....	189
<i>S.A. Velikin, A.V. Malyshev, V.V. Neklyudov, A.A. Panichev.</i> On the issue of permafrost control for engineering structures.....	191
<i>V.P. Petrukhin, O.A. Shulyatiev, G.I. Bondarenko, S.G. Bezvoley, O.A. Mozgacheva, Y.Y. Samoletov, E.V. Beletsky, G.B. Romashko.</i> Experience of geotechnical design for coal handling and preparation plant in seismic permafrost zone.....	197
<i>S.P. Varlamov, P.N. Skryabin, N.I. Shender.</i> The thermal state of soils beneath the Tommot-Kerdem railway embankment in an ice-rich permafrost area.....	204
<i>P.N. Skryabin.</i> Post-disturbance changes in the ground thermal state along the northern section of the Tommot-Yakutsk railway.....	210



<i>A.V. Stepanov, I.I. Rozhin, F.E. Popenko.</i> Technical melioration of the soil massif in the building base.....	215
<i>M.P. Akimov.</i> Predicting the influence of an underground polymeric heating pipe on permafrost.....	221
<i>R.M. Bayasan, T.V. Bayasan, G.P. Pustovoit, S.I. Golubin, A.N. Tseeva.</i> Innovation engineering solutions for thermal stabilization of soils at construction in permafrost zone.....	225
<i>S.A. Gulyi, I.K. Rozhelevskiy.</i> Monitoring of foundation soils below the Ice Sports Complex at Magadan.....	231
<i>S.A. Gulyi.</i> Performance of an embankment dam after transition from a frozen to thawed type: the Arkagalinskaya hydroelectric dam on Myaundzha River.....	237
<i>A.E. Melnikov, S.S. Pavlov.</i> The problem of estimating the intensity of cryogenic weathering of embankment materials in the Tommot – Kerdem section of the Amur-Yakutsk Railway.....	243
<i>S.V. Poznarkova, F.N. Zepalov.</i> Twenty-year performance of envelope foundations in Igarka.....	246
<i>D.M. Shesternev.</i> Basic principles of geocryological monitoring at linear structures (with reference to the Berkakit-Tommot-Yakutsk Railway).....	252
<i>D.M. Shesternev, A.V. Litovko.</i> Geocryological problems in the Berkakit-Tommot section of the Amur-Yakutsk Railway.....	261
<i>D.M. Shesternev, N.I. Shender, S.P. Varlamov, A.V. Litovko, Yu.G. Sleptsova.</i> Permafrost conditions and their changes in the “ice-wedge complex” section of the Amur-Yakutsk Railway.....	267
<i>S.I. Zabolotnik, P.S. Zabolotnik.</i> Ground temperatures around and beneath the Yakutsk CHP plant buildings.....	273
<i>G.M. Dolgikh, S.N. Okuney, V.N. Zakharova, M.S. Maramygina, S.N. Dolgikh.</i> Predictive calculations for the frost grout curtain at the Vilyuiskaya HPP-3 with application of collector seasonally operating cooling devices.....	280
<i>G.M. Dolgikh, S.N. Okuney, G.V. Anikin, S.N. Strizhkov, V.F. Vlasov.</i> Heat and mass transfer in vertical cooling pipes of VET systems with application of ammonia.....	284
<i>G.M. Dolgikh, S.N. Okuney, S.N. Strizhkov, S.N. Dolgikh.</i> Experience in design development and operation of the thermal stabilization system for soils at the dam on the Irelyakh River.....	288
<i>S. Kudryavtsev, A. Shtokolov.</i> Secondary use of metal pile foundations in permafrost in the Chayanda oil-gas condensate field.....	292
<i>N.B. Kutvitskaya, N.P. Semenova.</i> Peculiarities of the active layer compaction by tamping in the cryolithozone.....	296
<i>I.K. Rastegaev, V.B. Serdobov, R.V. Morozov.</i> Research of the effect of "floating" working equipment static rippers in frozen soil.....	300
<i>O.I. Matveeva, G.D. Fedorova, A.T. Vinokurov, E.N. Nikolaev.</i> Providing of concrete corrosion firmness in high-mineralized circulating waters.....	306

<i>Xianfu DONG, Liping SUN, Ji CHEN, Yu SHENG. Research on the thermal stability of frozen soil embankment in the Chaidae-Muli Railway.....</i>	312
<i>Wenjie FENG, Wei MA, Zhizhong SUN, Guoyu LI, Wenbing YU, Jianfeng ZHENG. Radiation effect analysis of the awning measure on the embankment slope field test in cold regions.....</i>	319
<i>Weinan MAO, Jiankun LIU, Yahu TIAN. Evaluation of the oil pipeline in permafrost region using AHP method.....</i>	326
<i>Feng SHI, Jianhong FANG, Jiankun LIU, Liyun PENG. Experimental study on the mechanism of thawing settlement under dynamic loading in 109th National Highway.....</i>	331
<i>Chengsong YANG, Guodong CHENG, Tao CHE, Fujun NIU. The spatial distribution of ground ice and dry density in permafrost region along Qinghai-Tibet Railway.....</i>	337
<i>Xiaoliang YAO, Jinlin QI. Vehicles loading effects on thawing embankment.....</i>	343
<i>Qihao YU, Jun HU, Jin QIAN, Yanhui YOU. Analysis on the potential problems of constructing high-grade highway in permafrost regions.....</i>	349
<i>Yu ZHANG, Jianhong FANG, Jiankun LIU, Anhua XU. Field study on reinforcement effects of soil treatment with dynamically formed gravel pier composite foundation in saline soils.....</i>	358
<i>Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG. Experimental study on bearing capacity of pile foundation in permafrost area.....</i>	364
<i>Ji-liang WANG, Chen-xi ZHANG. Inspection of hydration heat of concrete on permafrost temperature.....</i>	369
 Session 3	
<b>THERMAL, GEOPHYSICAL, HYDROGEOLOGICAL AND GEOECOLOGICAL ASPECTS OF COLD REGIONS DEVELOPMENT IN A CHANGING CLIMATE.....</b>	
<i>T.A. Kapitonova, O.I. Sleptsov, M.P. Lebedev, G.P. Struchkova. Problems of Technogenic Safety in the Republic of Sakha (Yakutia).....</i>	375
<i>V.V. Shepelev, T.R. Zhang. Urban water logging control in permafrost regions.....</i>	379
<i>G.P. Struchkova, V.M. Efimov, T.A. Kapitonova, O.I. Sleptsov. Impact of Anthropogenic and Technogenic Accidents on the Ecological Safety of the Sakha Republic (Yakutia).....</i>	384
<i>L.G. Neradovsky, Yu.B. Skachkov. Prediction of air temperatures in Yakutia up to 2050.....</i>	389
<i>S.P. Gotovtsev. Consequences of global warming in Arctic Northern Yakutia.....</i>	394
<i>S.P. Varlamov, Yu.B. Skachkov, P.N. Skryabin, N.I. Shender. Thermal state of upper permafrost in Central Yakutia under contemporary climate change.....</i>	398
<i>R.I. Gavriliev. Thermophysical properties of sediments in the Yenisei-Khatanga Trough and its southern margin.....</i>	404
<i>A.A. Galanin. Hazardous periglacial and mass movement processes in the Dvoynoye deposit area, Chukchi AD: results of remote sensing.....</i>	410
<i>L.D. Ivanova, N.A. Pavlova. Aggressiveness of suprapermafrost and supra/intrapermafrost groundwater in Yakutia to building materials and structures.....</i>	417

<i>A.I. Sivtzev, I.I. Rozhin.</i> Substantiation of the potential gas accumulations under the permafrost-hydratecaprock.....	422
<i>L.A. Vasyutich.</i> Anthropogenic impact on drinking water quality in urban areas near the southern limit of permafrost: an example of Chita.....	429
<i>N.N. Grib, A.A. Syasko, V.M. Nikitin, A.V. Kachaev, P.U. Kuznetsov.</i> Geophysical methods of exogenous processes study in choosing the platform for sleeper and slab plant «Railways of Yakutia» construction.....	433
<i>D.V. Savvin, L.L.Fedorova, A.V. Omelyanenko.</i> Research of cryogenic conditions changes of the soil in the technogenic impact by GPR method.....	439
<i>Yu.B. Skachkov, P.N. Skryabin, S.P. Varlamov.</i> Near-surface ground temperature variations at the Yakutsk permafrost thermal monitoring site during the last 40 years.....	444
<i>L.L. Fedorova, K.O. Sokolov.</i> Evaluation of the Readiness of a Site for excavation according to GPR Data.....	450
<i>V.N. Makarov.</i> Urban salinity in Yakutsk .....	455
<i>A. L. Chizhuk.</i> Ecological assessment of minor element concentrations in lake sediments in the City of Yakutsk.....	459
<i>V.N. Makarov, N.V. Torgovkin.</i> Geochemical characterization of urban soils in Neryungri.....	463
<i>V.N. Efremov.</i> New capabilities of the permafrost studies by radioimpedance sounding.....	469
<i>L.G. Neradovsky, M.L. Vladov, M.S. Suvorova.</i> Experimental study on temperature dependence of GPR signals in Mirny, western Yakutia.....	476
<i>V.L. Mironov, M.N. Grygoriev, A.I. Zakharov, T.N. Chymitdorzhiev, M.E. Bykov S.V. Shibaev.</i> Cryogenesis investigation at the Tiksi by radar interferometry ALOS PALSAR.....	482
<i>Chang-lei DAI, Shao-min DU.</i> Characteristics of soil moisture movement and snowmelt water infiltration in seasonal frozen unsaturated zone.....	487
<i>Martin Stendel, Sergei Marchenko, Jens Hesselbjerg Christensen, Vladimir Romanovsky, Ronald Daanen, Annette Rinke, Heidrun Matthes, Peter Kuhry, Felix Rivkin and Dmitri Kaverin.</i> Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 5 km scale in Northeast European Russia and Western Greenland <i>Baolin WANG.</i> Understanding retrogression behaviour of thaw slumps.....	498
<i>Junfeng WANG, Qingbai WU.</i> Influences of vegetation degradation on the ground moisture and thermal regimes at the permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau.....	503
<i>Yanhui YOU, Jun HU, Ute WOLLSCHLAGER, Kurt ROTH, Qihao YU .</i> Permafrost investigation in Tibetan Plateau using electrical resistivity tomography.....	509
<i>Yu.M. Goncharov, A.P. Popovich.</i> Performance of a production building on a spatial ventilated foundation in Norilsk.....	515
<i>V.V. Rykova, E.Yu. Shevtsova.</i> Peculiarities of erecting engineering structures in cryolithozone: analysis of an information massive from DB “Problems of the North”.....	519
LIST OF FOREIGN PARTICIPANTS.....	524
AUTHOR INDEX.....	545

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
БЛАГОДАРНОСТИ.....	10
ОРГКОМИТЕТ.....	10
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ.....	11
Чжан Р. В. Участие Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в научном сопровождении мегапроектов в Восточной Сибири.....	13
<i>Чжан Р. В., Спектор В. Б., Алексеева О. И., Торговкин Я. И., Шестакова А. А., Иванова Л. Д., Спектор В. В.</i> Инженерно-геокриологическая карта РС(Я) и прилегающих территорий м-ба 1:2 500 000.....	17
<i>Растегаев И. К., Великин С. А.</i> Состояние и перспективы свайного фундаментостроения в криозоне Земли в связи с потеплением климата.....	24
<i>Попенко Ф. Е.</i> Техническая мелиорация слабых грунтов криолитозоны при строительстве на сейсмоопасных территориях.....	33
<i>Ма Вэй, Лили ФАН, Цилинь ЦИ.</i> Методика изучения изменений инженерных свойств грунтов при циклическом промерзании-протаивании.....	38
<i>Фуцзюнь НЮ, Хуа ЛЮ, Чжаньцзюй ЛИНЬ, Цзяхао ЛЮЙ.</i> Изменение физико- механических свойств пяти типов скальных грунтов Цинхай-Тибетского нагорья при циклическом промерзании-протаивании.....	45
Секция 1 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ, КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	51
<i>Федоров Д. К., Кривоногова Н. Ф.</i> Криогенное пучение грунтов применительно к гибким ограждающим конструкциям.....	53
<i>Кузьмин Г. П.</i> Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов.....	59
<i>Исаев О. Н.</i> Идентификация талого и мерзлого состояний грунтов методом статического зондирования.....	63
<i>Исаев О. Н.</i> Методы испытания мерзлых грунтов статическим зондированием.....	68
<i>Кузьмин Г. П., Панин В. Н.</i> Метод определения пучения грунта.....	74
<i>Урбан А. А., Дорофеев И. В.</i> Развитие процессов морозного пучения и формы его проявления на примере г. Якутска.....	78
<i>Верхотуров А. Г.</i> Опасные криогенные процессы в населенных пунктах Центрального Забайкалья.....	83
<i>Коновалов А. А.</i> Фазовые переходы и долговечность мерзлого грунта.....	90
<i>Гурьянов И. Е.</i> Несущая способность вечномерзлого основания как функция типа фундамента.....	96



<i>Гурьянов И. Е.</i> Общая методика натурального определения несущей способности свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах.....	104
<i>Попов В. И.</i> Влияние знакопеременных температурных воздействий на процесс морозного выветривания.....	110
<i>Соболь И. С., Хохлов Д. Н.</i> Автоматизация инженерных расчетов берегопереформирований на водохранилищах криолитозоны.....	115
<i>Разумов С. О.</i> Моделирование криогенных геологических процессов в изменяющихся природных и техногенных условиях.....	121
<i>Каймонов М. В., Панишев С. В., Ермаков С. А.</i> Моделирование температурного режима взорванных многолетнемерзлых горных пород.....	127
<i>Гаврильев Р. И.</i> Расчет температурных волн в двухслойной среде криолитозоны при изменяющейся среднесуточной температуре воздуха.....	132
<i>Хуэй БИН, Шупин ЧЖАО.</i> Изучение механизма разрушения засоленных грунтов насыпи при циклическом промерзании-протаивании.....	138
<i>Джеймс Г. А. Кролл.</i> Роль температурных деформаций пород в образовании перигляциальных форм рельефа.....	144
<i>Махмуд Газави, Махия Рустаеи.</i> Лабораторная оценка влияния циклов промерзания-оттаивания на свойства глинистого грунта, укрепленного геотекстилем.....	150
<i>Томаш Козловски.</i> Замерзание прочносвязанной воды в глинах при низких температурах в свете экспериментов ДСК и МДСК.....	155
<i>Махия Рустаеи, Махмуд Газави, Хасан Агабарати.</i> Прочностные характеристики глинистых грунтов с добавками из отходов переработки автомобильных шин при циклическом промерзании-протаивании.....	161
<i>Эньлян ВАН, Цзинлюй СУНЬ, Чжанькунь ГАО, Цзюньдэ ЧАН.</i> Экспериментальное исследование по автоматизации мониторинга глубины сезонного промерзания пород.....	167
<i>Ху ЧЖАН, Цзяньмин ЧЖАН, Шивэй ЛЮ, Кай СУ.</i> Прессиометрические испытания высокотемпературных и сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов.....	172
<i>Шуцзюань ЧЖАН, Чжичжун СУНЬ, Шуанян ЛИ.</i> Гистерезисная энергия и характер изменения температуры мерзлых грунтов при циклическом нагружении.....	178
<i>Шупин ЧЖАО, Вэй МА, Гуйдэ ЦЗЯО, Фэй ЛО.</i> Влияние циклов промерзания-протаивания на динамические характеристики Цинхай-Тибетской мерзлой глины.....	184
<b>Секция 2</b>	
<b>ТЕПЛОВОЕ И МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ.....</b>	<b>189</b>
<i>Великин С. А., Малышев А. В., Неклюдов В. В., Паничев А. А.</i> К вопросу о системе управления мерзлотной обстановкой на инженерных объектах в криолитозоне.....	191
<i>Петрухин В. П., Шулятьев О. А., Бондаренко Г. И., Безволев С. Г., Мозгачева О. А., Ю. Ю. Самолетов, Э. В. Белецкий, Г. Б. Ромашко.</i> Опыт проектирования ГОК в условиях сейсмокриолитозоны.....	197

<i>Варламов С. П., Скрябин П. Н., Шендер Н. И.</i> О тепловом состоянии оснований насыпей железной дороги Томмот – Кердем на участке распространения порода ледового комплекса.....	204
<i>Скрябин П. Н.</i> Изменения термического состояния грунтов при техногенных воздействиях на северном участке железной дороги Томмот – Якутск.....	210
<i>Степанов А. В., Рожин И. И., Попенко Ф. Е.</i> Техническая мелиорация массива грунтов в основании здания.....	215
<i>Акимов М. П.</i> Прогнозирование влияния подземного полимерного трубопровода теплоснабжения на вечномерзлые грунты.....	221
<i>Баясан Р. М., Баясан Т. В., Пустовойт Г. П., Голубин С. И., Цеева А. Н.</i> Инновационные технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых пород при строительстве в криолитозоне.....	225
<i>Гулый С. А., Рожелевский И. К.</i> Мониторинг грунтов оснований фундаментов Ледового дворца в г. Магадане.....	231
<i>Гулый С. А.</i> Анализ работы плотины, перешедшей с мерзлого на талый тип эксплуатации (на примере плотины АрГРЭС на р. Мянуджа).....	237
<i>Мельников А. Е., Павлов С. С.</i> Проблема оценки интенсивности разрушения грунтов, слагающих земляную насыпь, под воздействием выветривания (на примере Амуро-Якутской железнодорожной магистрали, участок Томмот - Кердем).....	243
<i>Познаркова С. В., Зепалов Ф. Н.</i> Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка.....	246
<i>Шестернев Д. М.</i> Основные принципы организации геокриологического мониторинга линейных сооружений (на примере железной дороги Беркакит – Томмот – Якутск).....	252
<i>Шестернев Д. М., Литовко А. В.</i> Геокриологические проблемы эксплуатации участка железной дороги АЯМ «Беркакит – Томмот».....	261
<i>Шестернев Д. М., Шендер Н. И., Варламов С. П., Литовко А. В., Слепцова Ю. Г.</i> Геокриологические условия и их изменения при строительстве железной дороги АЯМ на участке «ледового комплекса».....	267
<i>Заболотник С. И., Заболотник П. С.</i> Температура грунтов вокруг и под зданиями Якутской ТЭЦ.....	273
<i>Долгих Г. М., Окунев С. Н., Захарова В. Н., Марамыгина М. С., Долгих С. Н.</i> Прогнозные расчеты мерзлотной противодиффузионной завесы плотины Вилуйской ГЭС-3 с использованием коллекторных СОУ.....	280
<i>Долгих Г. М., Окунев С. Н., Аникин Г. В., Стрижков С. Н., Власов В. Ф.</i> Тепломассоперенос в вертикальных охлаждающих трубах систем ВЕТ при работе на аммиаке.....	284
<i>Долгих Г. М., Окунев С. Н., Стрижков С. Н., Долгих С. Н.</i> Опыт проектирования и эксплуатации системы термостабилизации грунтов плотины на р. Ирелях.....	288
<i>Кудрявцев С. А., Штоколов А. В.</i> Повторное использование металлических свай в вечномерзлых грунтах на Чайядинском нефтегазоконденсатном месторождении.....	292
<i>Кутвицкая Н. Б., Семенова Н. П.</i> Особенности уплотнения грунтов деятельного слоя трамбованием в условиях распространения вечномерзлых грунтов.....	296

<i>Растегаев И. К., Сердобов В. Б., Морозов Р. В.</i> Исследование эффекта «плавания» рабочего оборудования рыхлителей статического действия в мерзлом грунте.....	300
<i>Матвеева О. И., Федорова Г. Д., Винокуров А. Т., Николаев Е. П.</i> Обеспечение коррозионной стойкости бетона в высокоминерализованных подземных грунтовых водах.....	306
<i>Сяньфу ДУН, Липин СУНЬ, Цзи ЧЭНЬ, Юй ШЭН.</i> Изучение устойчивости земляного полотна железной дороги Чайдэр – Мули на многолетнемерзлых грунтах.....	312
<i>Вэньцзе ФЭН, Вэй МА, Чжичжун СУНЬ, Гоюй ЛИ, Вэньбин ЮЙ, Цзяньфэн ЧЖЭН.</i> Анализ эффективности солнцезащитных навесов по стабилизации земляного полотна в холодных регионах по результатам натуральных экспериментов.....	319
<i>Вэйнань МАО, Цзянькунь ЛЮ, Яху ТЯНЬ.</i> Оценка надежности нефтепровода в криолитозоне с использованием метода анализа иерархий (МАИ).....	326
<i>Фэн ШИ, Цзяньхун ФАН, Цзянькунь ЛЮ, Лионь ПЭН.</i> Экспериментальное изучение механизма осадки оттаивающих грунтов при динамических нагрузках на 109-й автомагистрали.....	331
<i>Чэнсун ЯН, Годун ЧЭН, Тао ЧЭ, Фуцзюнь НЮ.</i> Пространственное распределение льдистости и плотности скелета грунтов вдоль трассы Цинхай-Тибетской железной дороги в зоне распространения многолетней мерзлоты.....	337
<i>Сяолян ЯО, Цзиньлинь ЦИ.</i> Влияние транспортной нагрузки на насыпь при оттаивании льдистых грунтов основания.....	343
<i>Цихао ЮЙ, Цзюнь ХУ, Цзинь ЦЯНЬ, Яньхуэй Ю.</i> Анализ потенциальных проблем при строительстве высокоскоростных автодорог в криолитозоне.....	349
<i>Юй ЧЖАН, Цзяньхун ФАН, Цзянькунь ЛЮ, Аньхуа СЮЙ.</i> Натурное исследование по укреплению засоленных грунтов основания методом динамического замещения.....	358
<i>Цзилян ВАН, Чэньси ЧЖАН.</i> Экспериментальное исследование несущей способности свайного фундамента на многолетнемерзлых грунтах.....	364
<i>Цзилян ВАН, Чэньси ЧЖАН.</i> Изучение влияния тепловыделения при гидратации бетона на температуру многолетнемерзлых грунтов.....	369
Секция 3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ, ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОСВОЕНИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА.....	373
<i>Капитонова Т. А., Слепцов О. И., Лебедев М. П., Стручкова Г. П.</i> Проблемы техногенной безопасности Республики Саха (Якутия).....	375
<i>Шепелев В. В., Чжан Т. Р.</i> О борьбе с подтоплением на урбанизированных территориях криолитозоны.....	379
<i>Стручкова Г. П., Ефимов В. М., Капитонова Т. А., Слепцов О. И.</i> Воздействие антропогенных и техногенных аварий на экологическую безопасность Республики Саха (Якутия).....	384
<i>Нерадовский Л. Г., Скачков Ю. Б.</i> Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г. ....	389

<i>Готовцев С. П.</i> Последствия глобального потепления климата на арктическом севере Якутии.....	394
<i>Варламов С. П., Скачков Ю. Б., Скрябин П. Н., Шендер Н. И.</i> Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном изменении климата.....	398
<i>Гаврильев Р. И.</i> Теплофизические свойства отложений Енисей-Хатангского прогиба и его южного обрамления.....	404
<i>Галанин А. А.</i> Опасные мерзлотно-гравитационные процессы в районе месторождения Двойное (Чукотский АО): результаты дистанционного изучения.....	411
<i>Иванова Л. Д., Павлова Н. А.</i> Агрессивность надмерзлотных и надмерзлотно-межмерзлотных вод Якутии к строительным материалам и конструкциям.....	417
<i>Сивцев А. И., Рожин И. И.</i> Обоснование потенциальных скоплений газа над мерзлотно-гидратным флюидоупором.....	422
<i>Васютин Л. А.</i> Антропогенные воздействия на качество питьевых вод урбанизированных территорий южной криолитозоны (на примере г. Читы).....	429
<i>Гриб Н. Н., Сясько А. А., Никитин В. М., Качаев А. В., Кузнецов П. Ю.</i> Изучение экзогенных процессов геофизическими методами при выборе площадки под строительство шпалопропиточного завода ОАО АК «Железные дороги Якутии».....	433
<i>Саввин Д. В., Федорова Л. Л., Омеляненко А. В.</i> Исследование методом георадиолокации изменения криогенного состояния грунтов при техногенном воздействии.....	439
<i>Скачков Ю. Б., Скрябин П. Н., Варламов С. П.</i> Изменения температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплобалансовом стационаре за последние сорок лет.....	444
<i>Федорова Л. Л., Соколов К. О.</i> Оценка степени готовности полигона к отработке по данным георадиолокации.....	450
<i>Макаров В. Н.</i> Засоленность грунтов на территории города Якутска.....	455
<i>Чижук А. Л.</i> Экологическая оценка содержания микроэлементов в донных отложениях озер г. Якутска.....	459
<i>Макаров В. Н., Торговкин Н. В.</i> Инженерно-геохимическая характеристика грунтов г. Нерюнгри.....	463
<i>Ефремов В. Н.</i> Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зондированием.....	469
<i>Нерадовский Л. Г., Владов М. Л., Суворова М. С.</i> Экспериментальное изучение температурной зависимости сигналов георадиолокации в г. Мирном Западной Якутии.....	476
<i>Миронов В. Л., Григорьев М. Н., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т. Н., Быков М. Е., Шиббаев С. В.</i> Исследование криоморфогенеза в районе Тикси при помощи радарной интерферометрии ALOS PALSAR.....	482
<i>Чанлэй ДАЙ, Шаоминь ДУ.</i> Характеристика движения почвенных вод и инфильтрации талых вод в сезонномерзлом слое зоны аэрации.....	487



<i>Мартин Стендел, Сергей Марченко, Йенс Хессельбьерг Кристенсен, Владимир Романовский, Рональд Даанен, Анете Ринке, Хайдрун Маттес, Петер Кухри, Феликс Ривкин, Дмитрий Каверин. Моделирование криолитозоны Северо-Востока европейской части России и Запада Гренландии с очень высоким (5 км) разрешением.....</i>	493
<i>Баолинь ВАН. Изучение закономерностей отступления оползней протаивания.....</i>	498
<i>Цзюньфэн ВАН, Цинбай У. Влияние деградации растительности на температурный и влажностный режим грунтов в криолитозоне Цинхай-Тибетского нагорья.....</i>	503
<i>Яньхуэй Ю, Цзюнь ХУ, Уте Волльшлагер, Курт Рот, Цихао ЮЙ. Изучение многолетнемерзлых пород Тибетского нагорья методом электротомографии удельных сопротивлений.....</i>	509
<i>Гончаров Ю. М., Попович А. П. Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске.....</i>	515
<i>Рыкова В. В., Шевцова Э. Ю. Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера».....</i>	519
<b>СПИСОК РОССИЙСКИХ УЧАСТНИКОВ СИМПОЗИУМА.....</b>	530
<b>ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	546

ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОГО МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЯ  
научно-техническое издание

Материалы  
IX Международного симпозиума

3-7 сентября 2011 г.,  
г. Мирный, Россия

Утверждено к печати ученым советом  
Института мерзлотоведения СО РАН

Доклады публикуются в авторской редакции

Подписано в печать 23.07.2011.  
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 70.  
Уч.-изд. л. 70,8. Тираж 300 экз. Заказ № 223.

Издательство Института мерзлотоведения СО РАН.  
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН.

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в типографии ОАО медиа-холдинг «Якутия»  
677008 г. Якутск, пер. Вилюйский, 20