

На правах рукописи

Музалевский Константин Викторович

**ИМПУЛЬСНОЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ  
ЗОНДИРОВАНИЕ ВОДОНЕФТЯНОГО КОНТАКТА В НЕФТЕГАЗОВОМ  
КОЛЛЕКТОРЕ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск - 2010

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор  
*Комаров С.А. (АлтГУ, г. Барнаул)*

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
*Патрин Г.С. (ИИФ и РЭ СФУ, г. Красноярск)*

доктор физико-математических наук, профессор  
*Самохвалов И.В. (ТГУ, г. Томск)*

**Ведущая организация:**

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

**Защита состоится:** «14» мая 2010 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 38).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение 38).

Автореферат разослан «9» апреля 2010 г.

Ученый секретарь



**Втюрин А.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Эффективное извлечение углеводородного сырья является одной из наиболее актуальных проблем энергообеспечения и рационального пользования ископаемыми ресурсами. В частности, эта проблема решается с применением наклонно-направленного бурения скважин с горизонтальным завершением в нефтенасыщенном пласте. Правильно спланированные горизонтальные скважины, проведенные по оптимальной траектории, существенно повышают эффективность разработки залежей, а также позволяют избежать преждевременного прорыва пластовых вод или газа. Такая технология нефтедобычи применяет средства геонавигации в процессе проходки зоны максимальной продуктивности пласта, обеспечивая технологически приемлемое положение скважины относительно газо-нефтяного (ГНК) и водонефтяного (ВНК) контактов. В настоящее время использование для этой цели в нефтегазовой промышленности высокочастотного индукционного изопараметрического каротажного зондирования (электромагнитные поля с частотами от 10 кГц до 14 МГц) не позволяет обеспечить приемлемую безопасность горизонтальной проходки скважин в тонкослоистых нефтегазовых коллекторах. Использование методов сверхширокополосного (СШП) электромагнитного зондирования представляется наиболее перспективным при разработке новых технологий высокоточного электромагнитного каротажа и геонавигации бурового инструмента при горизонтальном бурении нефте-насыщенных пластов. Однако исследования и разработки технологий каротажа нефтегазовых скважин с применением нано- и субнаносекундных электромагнитных СШП импульсов находятся на начальной стадии.

**Состояние исследований.** В последнее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования с целью создания СШП скважинных георадаров (*Hansen T.B.*, 1999, *Chen Y.-H.*, 2002, *Sixin L.*, 2002, *Ebihara S.*, 2009). Работы по исследованию распространения импульсов нано- и субнано-секундной длительностью, излучаемых скважинными георадарами в среды нефтегазовых коллекторов, нами в литературе не обнаружены.

Во-первых, в литературе не найдено сведений о промышленных образцах сверхширокополосных импульсных скважинных георадаров, применяемых для позиционирования бурового инструмента в нефтенасыщенном пласте. Поэтому проблема исследования принципиальных возможностей создания новой технологии радарного зондирования в нефтегазовых скважинах с использованием нано- и субнаносекундных импульсов является актуальной. Подтверждением сказанного служит значительное число работ, в которых теоретически и экспериментально исследуется распространение широкополосных импульсов (с использованием макетных образцов скважинных георадаров) во влажные горные породы, не содержащие нефтяной фракции (*Hansen T.B.*, 1999, *Chen Y.-H.*, 2002, *Sixin L.*, 2002, *Ebihara S.*, 2009). Поэтому теоретическое исследование распространения нано- и субнаносекундных электромагнитных импульсов, спектр которых находится в области частот дипольной релаксации флюидов, присутствующих в горных породах нефтегазового коллектора, является актуальной задачей.

Во-вторых, в известных в литературе работах не используется модель диэлектрической проницаемости и проводимости частотно-дисперсных нефте- и водонасыщенных горных пород, входными параметрами которой являются их петрофизические характеристики, а именно, относительное содержание минерального скелета, солевого раствора, нефтяной фракции и метана. Поэтому стояла задача разработать такую модель.

В-третьих, в литературе отсутствуют оценки удельного затухания, предельной глубины (дальности) радарного зондирования ВНК и скорости распространения нано- и субнаносекундных импульсов в средах нефтегазового коллектора. Кроме того, остаётся неизученной проблема влияния длительности зондирующего импульса на точность определения расстояния до ВНК. Поэтому задача теоретического моделирования распространения нано- и субнаносекундных импульсов в средах нефтегазового коллектора является актуальной.

В - четвертых, на основе анализа математических методов, используемых при расчёте полей, излучаемых дипольными антеннами конечного размера, которые применяются в теоретических моделях скважинных георадаров, были выявлены вычислительные преимущества

метода дискретных источников (МДИ) по сравнению с методом интегральных уравнений в случае монохроматического возбуждения антенны (Avdikos G.K., Anastassiu H.T., 2005). В то же время в литературе не описаны случаи применения МДИ для расчета СШП полей, излученных антеннами в неоднородную среду нефтегазового коллектора, обладающей частотной дисперсией диэлектрической проницаемости. Поэтому задача применения МДИ для моделирования СШП импульсных полей, излучаемых антеннами скважинных георадаров, актуальна.

В конечном итоге, новизна задач, поставленных в данной диссертации, состоит в том, что их решение должно дать ответы на вопросы о том, существует ли принципиальная возможность использования нано- и субнаносекундных широкополосных импульсов при зондировании ВНК нефтегазового коллектора, какова потенциально возможная погрешность определения положения ВНК относительно георадара, а также каким динамическим диапазоном должен обладать приёмно-передатчик скважинного георадара, чтобы обеспечить зондирование ВНК на заданном расстоянии. Учитывая выше сказанное, цель данной работы сформулирована следующим образом.

**Цель диссертационной работы.** Целью работы является проведение теоретического анализа затухания, временной формы, скорости движения импульсов нано- и субнаносекундной длительностью, распространяющихся в нефтенасыщенной среде, включая импульсы, отраженные от водонефтяного контакта в нефтегазовом коллекторе.

**Основные задачи:**

1. создать модель частотно-зависимой комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) сред нефтегазового коллектора, которая зависит от их петрофизических характеристик (долевое содержание: нефти, водного солевого раствора, метана и минерального скелета);
2. исследовать скорость распространения и затухание СШП импульсов в нефтенасыщенной среде нефтегазового коллектора;
3. оценить предельную дальность зондирования ВНК при заданной длительности зондирующего СШП импульса и определенном динамическом диапазоне приёмно-передатчика скважинного радара;
4. определить расстояние до ВНК по измеряемым характеристикам отраженного от ВНК зондирующего СШП импульса.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Обосновано применение спектроскопической рефракционной модели КДП сред нефтегазового коллектора для численного моделирования процесса распространения нано- и субнаносекундных импульсных электромагнитных полей в неоднородных средах нефтегазового коллектора.
2. Обосновано применение метода дискретных источников для численного моделирования процесса распространения нано- и субнаносекундных импульсных электромагнитных полей в неоднородных средах нефтегазового коллектора, возбуждаемых вибраторной и щелевой антеннами конечных размеров.
3. Установлено, что локальная скорость распространения СШП импульса, определенная как скорость движения центра импульсного потока энергии в заданной точке наблюдения на трассе, с погрешностью менее 2% совпадает с групповой скоростью узкополосного волнового пакета, частота которого равна центральной частоте спектра распространяющегося СШП импульса в этой точке.
4. Установлено, что локальный коэффициент удельного затухания потока энергии распространяющегося СШП импульса в заданной точке наблюдения с погрешностью менее 17% совпадает с коэффициентом удельного затухания амплитуды монохроматической волны, частота которой равна средней частоте спектра распространяющегося СШП импульса в этой точке.
5. В случае вибраторной антенны, излучающей импульсы длительностью от 0,3 нс до 3,0 нс, при динамическом диапазоне приёмно-передающей системы георадара 120 дБ предельная дальность зондирования ВНК изменяется от 0,9 м до 1,3 м.
6. Предложен и обоснован метод определения расстояния до ВНК по измеренным значениям

времени задержки нано- и субнаносекундных импульсов, отраженных от ВНК, и измеренным средним частотам спектров импульсов, излученных и принятых после отражения от ВНК.

**Достоверность результатов работы обеспечивается:** полученными аналитическими выражениями для электромагнитного поля, которые удовлетворяют уравнениям *Максвелла*, граничным условиям и условию излучения на бесконечности; совпадением полученных результатов моделирования для частных случаев по отношению к рассмотренным в работе задачам с данными, известными в литературе, которые были получены на основе применения других методов решения; совпадением полученных результатов моделирования с данными экспериментов; контролем погрешности при вычислении дифракционных интегралов и при использовании метода дискретных источников.

**Научная новизна.** Впервые проведено численное моделирование распространения сверхширокополосных нано- и субнаносекундных электромагнитных импульсов в нефтесодержащей среде, включая отражение импульсной волны от водонефтяного контакта, в случае плоских, цилиндрических, сферических волновых фронтов, а также импульсных волновых полей, возбуждаемых вибраторной и щелевой антеннами.

Создана модель КДП сред нефтегазового коллектора, которая использует в качестве входных параметров петрофизические характеристики горных пород в нефтенасыщенном и водонасыщенном пластах (объемное содержание: нефти и водного солевого раствора в песчанике).

На основе проведенного численного моделирования показано, что скорость распространения СШП импульсов в нефтенасыщенной среде, определяемая как скорость движения центра импульсного потока энергии, в общем случае зависит от точки наблюдения на трассе распространения и не совпадает с групповой скоростью узкополосного волнового пакета.

Впервые МДИ применён для численного моделирования импульсных СШП электромагнитных полей, возбуждаемых вибраторной и щелевой антеннами, в неоднородных диспергирующих средах нефтегазового коллектора.

Показано, что, используя групповую скорость, рассчитанную на основе предложенной в работе спектроскопической модели КДП нефтенасыщенных пород, можно определять расстояние от излучающей антенны до границы ВНК, если измерять время задержки и частотные спектры излучаемого и принимаемого георадаром СШП импульса, отраженного от ВНК.

**Практическая значимость.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы для:

- а) создания физического макета СШП электромагнитного зонда, предназначенного для каротажа горизонтальных скважин нефтегазового коллектора;
- б) оценки динамического диапазона приёмо-передающей системы СШП зонда при зондировании ВНК импульсами нано- и субнаносекундной длительности на заданном расстоянии;
- в) расчета затухания и изменения средней частоты спектра импульса, распространяющегося в нефтенасыщенной среде, а также для измерения расстояния от излучающей антенны до ВНК и пространственной разрешающей способности при СШП импульсном зондировании ВНК;

Разработаны комплексы инженерных программ и интерфейсы, автоматизирующие вычисления, которые могут быть использованы для прогноза затухания энергии и искажения формы зондирующего импульса при создании физического макета СШП электромагнитного зонда, предназначенного для каротажа горизонтальных скважин нефтегазового коллектора при заданных петрофизических характеристиках пород коллектора. Большинство результатов диссертационной работы использованы при реализации ниже перечисленных проектов и включены в отчёты по НИР.

**Связь с плановыми работами.** Работа была выполнена в рамках следующих программ и грантов:

программа Президиума РАН «Изучение процессов в земной коре и ее структуры для прогноза природных, опасных явлений с использованием геофизических методов и бурения», проект «Разработка моделей и алгоритмов аэрокосмического радарного и радиометрического зондирования активного слоя вечной мерзлоты». 2004-2005 г.; междисциплинарный интеграционный проект СО РАН №70 «Исследование распространения наносекундных электромагнитных импульсов в геологической среде для создания фундаментальной основы принципиально новых технологий зондирования в нефтегазовых скважинах». 2006-2008 г.; междисциплинарный интеграционный проект СО РАН №б «Теоретические основы принципиально новой технологии зондирования в нефтегазовых скважинах с использованием субнаносекундных электромагнитных импульсов». 2009-2011г.; программа РАН «Радиофизические методы диагностики окружающей среды», базовый научный проект СО РАН «Диэлектрическая спектроскопия природных сред в радиоволновом диапазоне частот». 2007-2009 г.; грант РФФИ+ККФН №07-05-96804-р\_енисей\_а «Исследование наноимпульсных методов электрофизической разведки природного органического сырья». 2007-2008 г.; программа «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса», Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, № 6650 -8766, 2009-2010 г..

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на конференциях:

XXXI Научная конференция молодых учёных, студентов и аспирантов ( г. Барнаул, Россия, 2004); III Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, Россия, 2005); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии для нефтегазового комплекса» (г. Новосибирск, Россия, 2005); XXV и XXVII Международные симпозиумы IGARSS (г. Сеул, Корея, 2005) и IGARSS (Барселона, Испания, 2007); 2-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск, Россия, 2008); Международные научные конференции PIERS (г. Пекин, Китай, 2009; Россия, Москва, 2009).

**Публикации по теме диссертации.** Материалы диссертации в полном объёме опубликованы в научной печати в 19 работах, в том числе в рецензируемых журналах, включенных в список ВАК (4), препринтах (4), трудах конференций (9) и прочих журналах (1).

**Личный вклад автора.** Совместно с научным руководителем работы обсуждены и определены методы исследований. Автором диссертации проведено построение решений, написаны программы, реализующие алгоритмы расчетов. Приведенные в диссертации численные результаты получены соискателем самостоятельно. Автор выражает глубокую благодарность академику РАН Эпову М.И. за постановку задачи о геонавигации в области горизонтальной нефтяной скважины. Отдельную благодарность автор выражает члену корреспонденту РАН Миронову В.Л. за постоянное внимание и обсуждение результатов работы.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит: 141 страницу, 82 рисунка, 6 таблиц. Список литературы включает 116 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассматривается актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, приведены защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы, проведён аналитический обзор существующих работ по импульсному зондированию геологических сред скважинными радарными, рассмотрены основные методы моделирования электромагнитных полей, излученных антеннами скважинных георадаров, кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** производится постановка задачи геонавигации в нефтегазовом коллекторе с помощью нано- и субнаносекундных импульсов, излученных антенной  $T$  в неоднородную структуру пласта (см. рис. 1). В качестве модели излучающей антенны в данной главе выбраны нить электрического тока [6, 8] и точечный электрический диполь [12], ориентированные вдоль оси  $Ox$ . Излученный передающей антенной импульс отражается от плоских границ

коллектора и принимается в точке  $R$ . Структура нефтегазового коллектора представлена плоско-параллельными слоями, диэлектрические свойства которых определяются скелетом горных пород (песчаник, бентонит) и входящих в них флюидов (метан, нефть и водный раствор поваренной соли).

**Спектроскопическая модель сред нефтегазового коллектора.** В данной работе было предложено описывать КДП в каждом из слоёв нефтегазового коллектора с помощью спектроскопической рефракционной модели (Mironov V.L. et al., 2004).

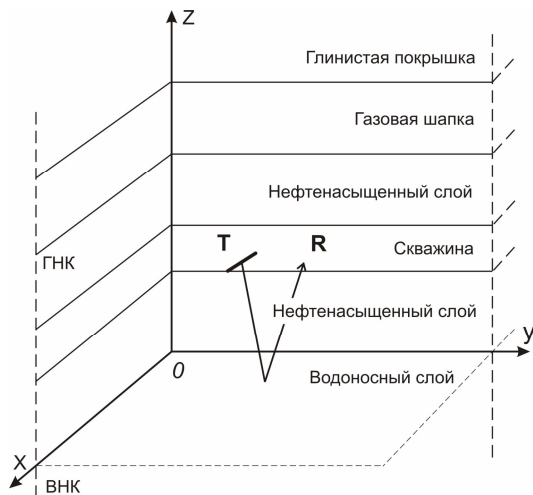


Рис. 1. Слоистая структура в зоне нефтегазового коллектора.

Спектры КДП, сред нефтегазового коллектора с петрофизическими характеристиками, указанными в таб. 1, были позже экспериментально измерены (Энов М.И. и др., 2009) и удовлетворительно совпали со значениями, прогнозируемыми предложенной в данной работе рефракционной моделью КДП [6, 8].

Объёмное содержание  $W$  компонент смеси и концентрация  $S$  солевого раствора для каждого из слоёв нефтегазового коллектора даны в таб. 1. КДП записывается в виде:  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ , где  $\varepsilon'$  - действительная и  $\varepsilon''$  - мнимая части КДП,  $i$  - мнимая единица. КДП песчаника, бентонита и метана оценивалась значениями:  $2,89 + i0,00$ ,  $4,3 + i0,0$  и  $1,0 + i0,0$  соответственно. Расчёт КДП водного раствора хлористого натрия проводился на основе формулы Дебая (Stogryn A. et al., 1971). При расчёте КДП нефти учитывалась суперпозиция двух независимых релакса-

Таблица 1. Петрофизические характеристики слоёв коллектора.

Слой	$W_{\text{раствор}}$	$W_{\text{бентонит}}$	$W_{\text{песчаник}}$	$W_{\text{нефть}}$	$W_{\text{метан}}$	$S, \text{ г/л}$
глинистая покрывка	0,03	0,97	0,00	0,00	0,00	17,0
газовая шапка	0,045	0,00	0,85	0,00	0,105	17,0
нефтенасыщенный	0,06	0,00	0,85	0,09	0,00	17,0
скважина	0,88	0,12	0,00	0,00	0,00	3,0
водонасыщенный	0,15	0,00	0,85	0,00	0,00	17,0

ционных процессов (Сараев Д.В., 2003), каждый из которых описывается формулами Дебая. На основе петрофизических данных о составе смесей в слоях коллектора (см. таб. 1) и рефракционной модели [6, 8] для каждого из этих слоёв были найдены частотные зависимости коэффициента преломления  $n(\omega) = \text{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)}$  и коэффициента поглощения  $\kappa(\omega) = \text{Im} \sqrt{\varepsilon(\omega)}$  при температуре  $40^\circ\text{C}$  ( $\omega$  - круговая частота электромагнитного поля). Результаты расчетов представлены на рис. 2. Видно, что контраст коэффициента преломления  $n(\omega)$  между глинистой покрывкой, газовой шапкой и нефтенасыщенной областью незначителен, тогда как при переходе ВНК увеличивается примерно в 3 раза в мегагерцовом диапазоне.

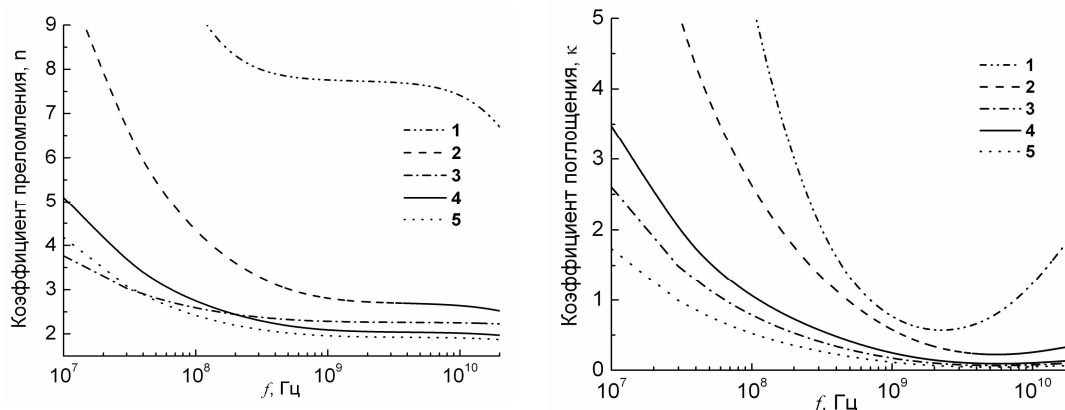


Рис. 2. Спектры коэффициентов преломления и поглощения сред нефтегазового коллектора: 1 – скважина; 2 – водонасыщенный слой; 3 – глинистая покрывка; 4 – нефтенасыщенный слой; 5 – газовая шапка.

**Амплитудно-частотная характеристика сред нефтегазового коллектора.** С помощью принятой диэлектрической модели можно рассчитать комплексную передаточную функцию (ПФ) среды для плоской волны на расстоянии  $x$ ,  $K(\omega) = \exp(ik_0 n(\omega)x - k k_0 x)$ , здесь  $k_0 = \omega/c$  - волновое число свободного пространства,  $c$  - скорость света в вакууме. Модуль ПФ на расстоянии 1 м определяет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) среды, квадрат которой изображен на рис. 3а.

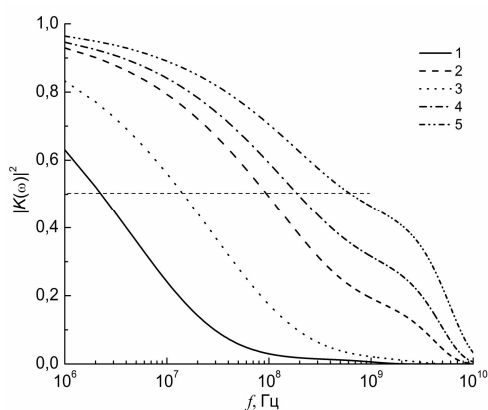


Рис. 3а. Квадрат АЧХ.

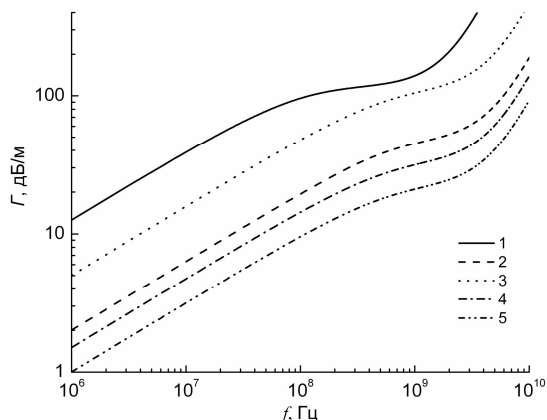


Рис. 3б. Удельный коэффициент затухания монохроматической волны.

1 – скважина; 2 – нефтенасыщенный слой; 3 – водонасыщенный слой; 4 – газовая шапка; 5 – глинистая покрышка.

Удельный коэффициент затухания (см. рис. 3б) амплитуды плоской волны на единицу пройденного пути, выраженный в децибелах, равен:

$$\Gamma(\omega) = 20 \lg |K(\omega)|, \text{ (дБ/м)}. \quad (1)$$

Как видно из графиков (см. рис. 3), среда каждого из слоёв нефтегазового коллектора обладает свойствами фильтра нижних частот (RC-фильтр). При этом частоты среза такого фильтра на уровне половинной мощности равны: 1) водонасыщенный слой  $f_{0,5} = 14,2 \text{ МГц}$ ; 2) нефтенасыщенный слой  $f_{0,5} = 93,6 \text{ МГц}$ .

**Распространение импульса с плоским фронтом.** Поле, излученное антеннами, можно представить как суперпозицию неоднородных плоских волн в виде интеграла Фурье по пространственным гармоникам. Результаты исследования распространения простейших плоских импульсных волн в нефтенасыщенной среде коллектора дают общее представление о процессах распространении импульсного излучения также в случае источников, обладающих конечными размерами.

Также для трассы заданной длины  $x$  каждая из сред характеризуется импульсной характеристикой (ИХ),  $g(t, x)$ , которая вычисляется как обратное преобразование Фурье от ПФ. Временная форма двухполярного СШП импульса с бесконечно малой исходной длительностью (в виде производной от дельта-функции Дирака  $\delta(t)$  на входе в среду,  $x=0 \text{ м}$ ) на расстоянии  $x$ , имеет вид производной от ИХ:

$$E(x, t) = \int_{-\infty}^t g(x, t - \tau) \delta'(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t g'(x, t - \tau) \delta(\tau) d\tau = \frac{d}{dt} g(x, t) \quad (2)$$

Эта временная форма показана на рис. 4 на расстояниях 0,5 и 2,0 м (вместе со соответствующими ИХ). По мере распространения в среде импульса с начальной бесконечно короткой длительностью, в результате низкочастотной фильтрации (Вайнштейн Л.А., 1957), уменьшается крутизна его фронтов, увеличивается длительность, и формируется низкочастотный след.

Рассмотрим теперь распространение в нефтенасыщенной среде двухполярного импульса в виде периода синусоиды с конечной начальной длительностью 1,0 нс. Временные формы этого импульса на расстояниях 0,5 м и 2,0 м также приведены на рис. 4. Как видно из сравнения форм импульсов с конечной и бесконечно малой начальной длительностью, начиная с



расстояния 2,0 м, нормированная временная форма импульса длительностью 1,0 нс совпадает с производной от ИХ среды, в полном соответствии с формулой (2). Соответствующее характерное расстояние может быть найдено для импульсов с любой начальной длительностью. Таким образом, производная от ИХ дает предельную форму любого двухполярного импульса, распространяющегося в нефтенасыщенной среде на расстояние больше соответствующего характерного расстояния, и полностью определяется спектром КДП среды (см. рис. 2).

**Затухание энергии и скорость движения импульсов с плоским фронтом.** В нефтенасыщенной среде скорость движения СШП импульса не постоянна, вследствие перемещения средней частоты спектра распространяющегося импульса в низкочастотную область и увеличения показателя преломления нефтенасыщенной среды (см. рис. 2) для всех спектральных составляющих СШП импульса.

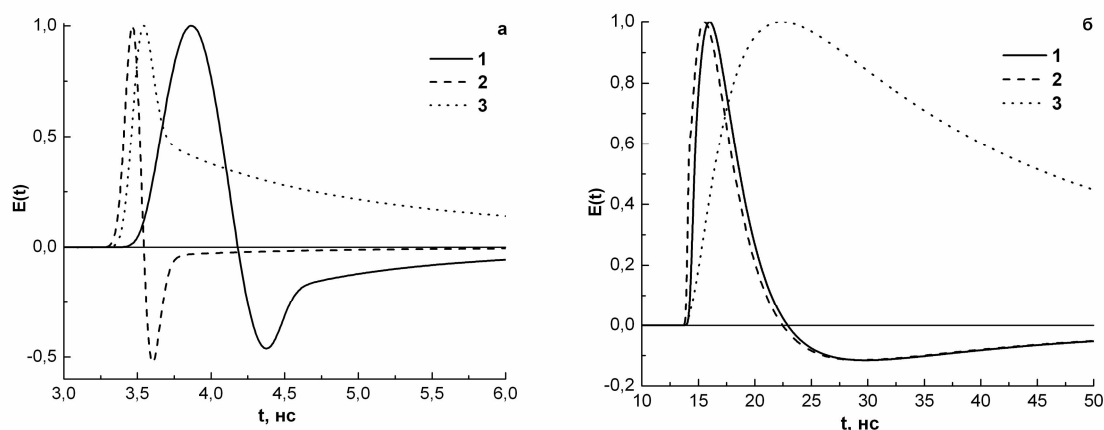


Рис. 4. Форма СШП импульса длительностью 1,0 нс при прохождении дистанций: а) 0,5 м б) 2,0 м. 1 – импульс в виде периода синусоиды; 2 – производная по времени от ИХ; 3 – ИХ.

Следуя (Вайнштейн Л.А., 1957), определим скорость перемещения СШП импульса как скорость движения центра тяжести импульсного потока энергии СШП импульса. Время прихода  $t_s$  центра тяжести импульсного потока энергии СШП импульса, при некотором фиксированном значении координаты точки наблюдения  $x$ , записывается в виде:

$$t_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t S_x(x, t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} S_x(x, t) dt}, \quad (3)$$

где  $S_x(x, t)$  – компонента вектора Умова-Пойнтинга.

Проведем моделирование формы СШП импульсов с начальной временной формой в виде периода синусоиды и длительностью 0,1 нс, 1,0 нс и 10,0 нс на расстояниях  $x$  от источника: 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м. На заданных расстояниях  $x$ , по формуле (3) рассчитывалось время  $t_s$ . Далее по формуле  $V=dx/dt_s$  определялись локальные скорости движения центра тяжести импульсного потока энергии СШП импульсов [14, 18]. Каждой, определенной таким образом скорости движения СШП импульсов, была сопоставлена частота  $f(x)$ , соответствующая средней частоте спектра амплитуды СШП импульса на расстоянии  $x$ . Результат данного анализа представлен на рис. 5 в виде значений соответствующих скоростей, нормированных на скорость света. Кроме того, на рис. 5 представлена групповая скорость распространения узкополосного волнового пакета  $V_g(\omega) = c / \frac{d\omega n(\omega)}{d\omega}$ , средняя частота  $f$  в спектре которого совпадает

(с относительной погрешностью менее 1,7%) со средней частотой спектра амплитуды СШП импульса на расстоянии  $x$ . Локальная скорость распространения СШП импульса, определенная как скорость движения центра импульсного потока энергии в заданной точке наблюдения, в пределах погрешности совпадает с групповой скоростью узкополосного волнового пакета, частота которого равна центральной частоте спектра распространяющегося СШП импульса в этой точке.

В результате проведенного моделирования (см. рис. 6), было показано, что локальный удельный коэффициент затухания потока энергии на расстоянии  $x$  для СШП импульсов в пределах погрешности 14% совпадает с удельным коэффициентом затухания монохроматической волны (1), при условии, что частота монохроматической волны равна средней частоте СШП импульса на расстоянии  $x$ .

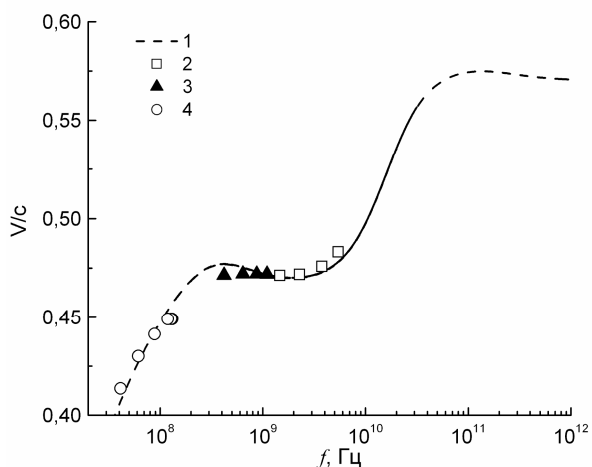


Рис. 5. Зависимости групповой скорости распространения в нефтенасыщенной среде узкополосного импульса (1) от его частоты  $f$  и зависимость локальной скорости распространения СШП импульса (2, 3, 4) от средней частоты  $f(x)$  спектра импульса на расстоянии  $x$  от входа в среду.

Импульсы имели следующую длительность на входе в среду:

2)  $T=0,1$  нс; 3)  $T=1,0$  нс; 4)  $T=10,0$  нс.

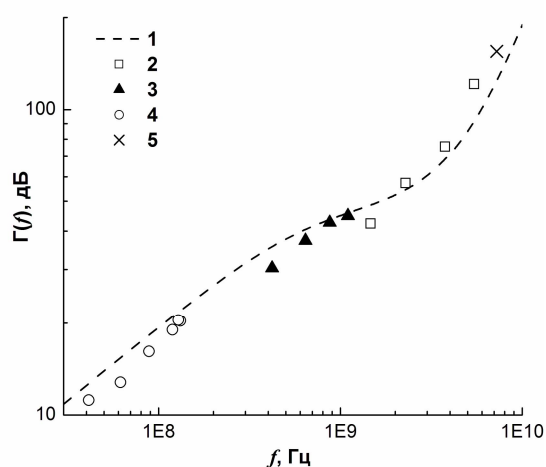


Рис.6. Зависимость от частоты удельного коэффициента затухания в нефтенасыщенной среде для амплитуды монохроматической волны (1) и зависимость локального удельного коэффициента затухания полного потока энергии СШП импульсов от средней частоты  $f(x)$  спектра импульса на расстоянии  $x$  от входа в среду. Импульсы имели следующую длительность на входе в среду: 2)  $T=0,1$  нс; 3)  $T=1,0$  нс; 4)  $T=10,0$  нс. Точка (5) соответствует значению, полученному в эксперименте (Эпов М.И., 2008).

**Тестирование модели [11, 13] распространения импульсов с плоским фронтом в средах нефтегазового коллектора** проведено на основе данных лабораторных экспериментов по распространению пикосекундного импульса в нефте- и водонасыщенном песчанике (Эпов М.И. и др., 2008). Сравнение данных теоретического моделирования и эксперимента показано на рис. 7, из которого видно, что наблюдается хорошее соответствие теоретической модели и результатов эксперимента.

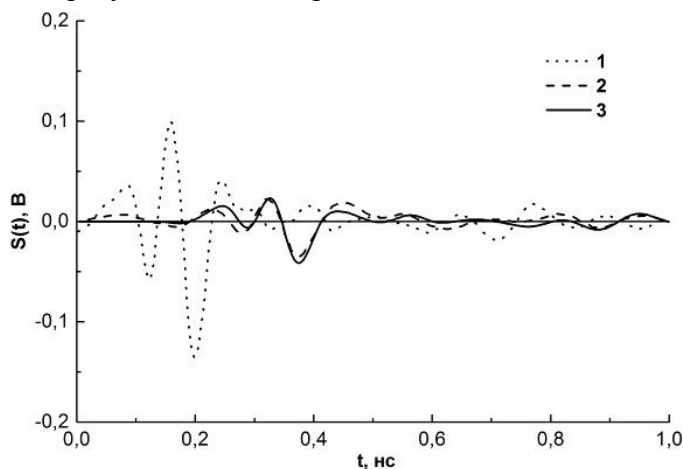


Рис. 7. Форма напряжения, наведенного в приёмной антенне СШП импульсом длительностью 100 нс при прохождении в воздухе (1) и через нефтенасыщенный слой (2) с толщиной 0,05 м. Кривая (3) результат нашего численного моделирования [11, 13]. Относительное среднеквадратичное отклонение между результатами (2) и (3) составило  $\sigma_3=11,5\%$ .

В случае отражения импульса от двухслойной среды, состоящей из нефтенасыщенного и водонасыщенного слоёв, толщиной соответственно 0,011 м и 0,034 м, относительное среднеквадратичное отклонение между теорией и экспериментом составило 8,2%.

**Распространение импульсной цилиндрической волны.** Исследования распространения узкополосного электромагнитного радиоимпульса с гауссовой огибающей, содержащего

один период высокочастотного заполнения, возбуждаемого нитевидным источником, расположенным в плоскостной среде нефтенасыщенного коллектора [6, 8] показали, что удельный коэффициент затухания импульсов  $-45,6 \text{ дБ/м}$  и  $-81,5 \text{ дБ/м}$  длительностью  $T=1,0 \text{ нс}$  и  $T=0,2 \text{ нс}$  соответственно с относительной погрешностью менее 4% совпадает с удельным коэффициентом затухания ( $-44,8 \text{ дБ/м}$  и  $-84,8 \text{ дБ/м}$ ) плоской монохроматической волны (частота которой соответствует несущей частоте спектра амплитуды радиоимпульсов). При этом их локальная скорость распространения,  $V/c=0,472$  и  $V/c=0,477$  соответственно для импульсов длительностью  $T=1,0 \text{ нс}$  и  $T=0,2 \text{ нс}$ , с относительной погрешностью менее 1,6% совпадает с групповой скоростью распространения узкополосного импульса.

**Распространение импульсной сферической волны.** Моделирование процесса распространения СШП импульсов со сферическим фронтом в нефтенасыщенной среде в присутствии ВНК проводилось в случае антенны в виде точечного электрического диполя [12]. Временная форма импульсного электрического тока диполя задавалась в виде импульсов, реализованных в коммерческих генераторах ТМГ100010P01 и ТМГ1500.080P02 (НПП «Трим»). Показано, что в нефтенасыщенной среде пикосекундный импульс (длительностью  $T=0,1 \text{ нс}$ ), излученный диполем, имеет больший средний (вдоль трассы распространения) коэффициент удельного затухания плотности потока энергии ( $74 \text{ дБ/м}$ ) по сравнению с наносекундным (длительность  $1,5 \text{ нс}$ ) импульсом ( $62 \text{ дБ/м}$ ). При этом на расстояниях больше  $1,7 \text{ м}$  низкочастотная фильтрация спектра зондирующих импульсов по мере их распространения в нефтенасыщенной среде приводит к уменьшению среднего удельного затухания плотности потока энергии импульса приблизительно в два раза (с  $62 \text{ дБ/м}$  до  $28 \text{ дБ/м}$  для импульса длительностью  $1,5 \text{ нс}$  и с  $74 \text{ дБ/м}$  до  $37 \text{ дБ/м}$  для импульса длительностью  $0,1 \text{ нс}$ ).

Для анализа импульсных СШП полей, излученных антеннами конечных размеров в неоднородную диспергирующую среду нефтегазового коллектора, потребовалось создать метод для расчёта данных полей. Построение и обоснование МДИ для нестационарных задач и сред с частотной дисперсией излагается во *второй главе*, а анализ распространения СШП импульсов, излученных антенной конечного размера проводится в *третьей главе*.

**Во-второй главе** изучалась возможность применения МДИ [1, 2, 4, 7, 9, 15, 17] для расчёта импульсных СШП электромагнитных полей, излучаемых вибраторной антенной [7, 9, 15, 17] и щелью [10], прорезанной на идеально проводящем цилиндре. В случае щелевой антенны решалась двумерная задача, и поле, рассеянное цилиндром в исследуемой области, строилось в виде суперпозиции полей нитевидных источников, расположенных на образующей цилиндра радиусом  $r_a=K \cdot R_a$ , с коэффициентом подобия  $0 < K \leq 1$ , где  $R_a$  – радиус цилиндра. Установлено, что дискретные источники оптимально располагать с коэффициентом подобия 0,5. Комплексные амплитуды вспомогательных источников на каждой из частот, присутствующих в спектре возбуждающего цилиндра импульса, определяются из системы линейных алгебраических уравнений, которая получается при удовлетворении граничным условиям на идеально проводящей поверхности цилиндра в точках коллокации.

В случае цилиндрической идеально проводящей вибраторной антенны, поле, создаваемое токами, текущими на поверхности вибраторной антенны, представляется для каждой временной спектральной компоненты в виде суперпозиции полей, возбуждаемых токами вспомогательных точечных электрических диполей, расположенных на её оси. Амплитуды вспомогательных токов находятся аналогично случаю щелевой антенны. Показана монотонная сходимости алгоритма, построенного на основе МДИ для вибраторной антенны, с увеличением числа дискретных источников по всем временным частотным компонентам импульса (см. *рис. 8*). Результаты расчётов, с помощью построенного в работе алгоритма МДИ, временной формы импульса тока на входе вибраторной антенны при её возбуждении импульсом напряжения гауссовой формы представлены на *рис. 9*. Как видно из *рис. 9*, эти результаты хорошо согласуются с результатами расчета, полученными с помощью метода интегрального уравнения (Vossen S. H. J. A., 2003).

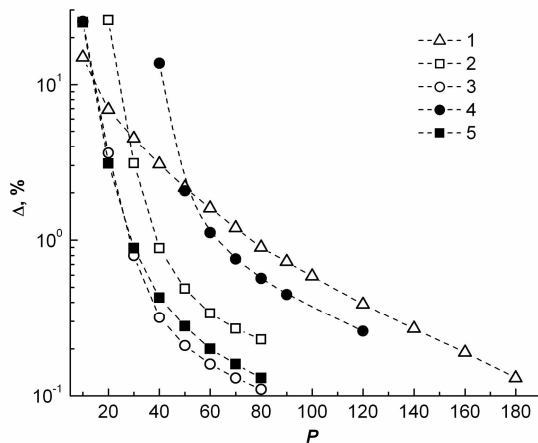


Рис. 8. Средняя по поверхности вибратора и длительности возбуждающего импульса относительная погрешность выполнения граничного условия на поверхности вибраторной антенны в зависимости от числа вспомогательных источников  $P$ . Длина антенны  $L=0,12$  м. Кривые 1-3 соответствуют возбуждению монохроматическим напряжением с частотой  $f$ : 1)  $f=10,0$  ГГц; 2)  $f=5$  ГГц; 3)  $f=2,5$  ГГц; Кривые 4 и 5 соответствуют возбуждению разной длины импульсом напряжением с гауссовой огибающей полушириной  $\tau$ : 4)  $L=0,06$  м,  $\tau=0,3$  нс; 5)  $L=0,12$  м,  $\tau=3,0$  нс.

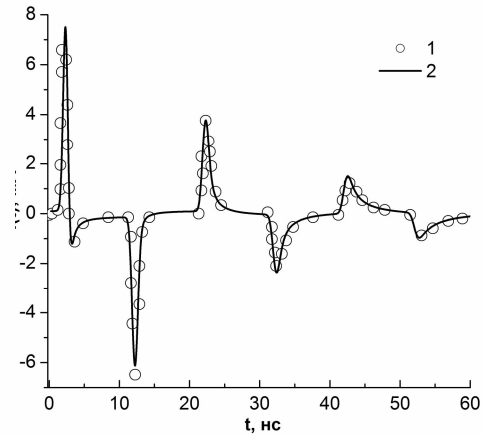


Рис. 9. Временная форма тока на входе вибраторной антенны, погруженной в материальную среду с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=9,0$  и проводимостью  $\sigma=0$  См/м. 1) результат работы (Vossen S. H. J. A., 2003), 2) расчёты МДИ. Длина и радиус антенны равны:  $L=1,0$  м,  $a=0,002$  м. Параметры гауссова импульса напряжения, возбуждающего антенну:  $V=1$  В,  $\tau=0,5$  нс. Число точек коллокаций равно 70.

В МДИ использовались интегральные представления функций *Грина* для плоско-слоистой среды. Численное интегрирование функций *Грина* по пространственному спектру осуществлялось с использованием квадратур *Гаусса* с 24 узлами, относительная погрешность вычисления интегралов контролировалась и составляла менее 0,1%. Временное представление полей и токов получалось с использованием быстрого преобразования *Фурье*.

В *третьей главе*, обоснованный выше МДИ, используется для анализа распространения СШП импульсов, излученных вибраторной [7, 9] и щелевой [10] антеннами, в нефтенасыщенную среду в присутствии ВНК.

**Третья глава.** Вибраторная антенна располагалась в нефтенасыщенной среде на высоте  $D$  над границей ВНК (см. рис. 10).

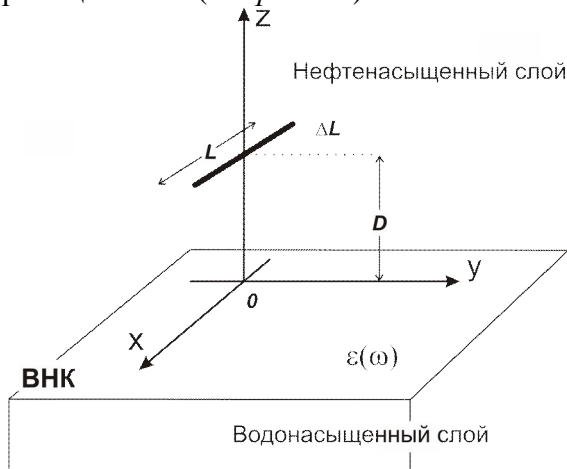


Рис. 10. Зондирование ВНК вибраторной антенной длиной  $L$ . Центр антенны расположен в точке  $(x=0, y=0, z=D)$ .

Моделирование проводилось для антенн с радиусом  $a=0,002$  м. Импульс напряжения, возбуждавшего антенну на входе ( $x=0, y=0, z=D$ ), имел форму оконной функции *Блэкмена-Харриса* (Hansen T.B., 1999) и длительность  $T_1=0,5$  нс и  $T_2=0,1$  нс для антенны длиной  $L_1=0,12$  м и  $L_2=0,06$  м, соответственно. Формы импульсов тока, рассчитанные на основе

МДИ на входе антенны, помещенной в однородную нефтенасыщенную среду, изображены на *рис. 11*. Длительность импульсов тока (*см. рис. 11*), определенная по уровню 0,1 от амплитудного значения, оказалась равной  $T_1=3,0$  нс и  $T_2=0,3$  нс для указанных выше значений ширины оконной функции и длины антенн.

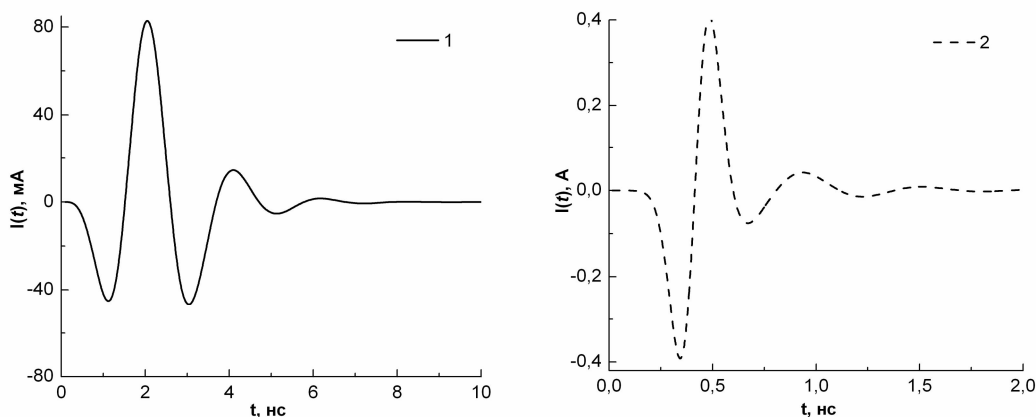


Рис. 11. Форма импульсов тока на входе излучающей антенны: 1)  $T=3,0$  нс; 2)  $T=0,3$  нс.

Результаты численного моделирования распространения импульсов, показанных на *рис. 11* представлены на *рис. 12* и *13*.

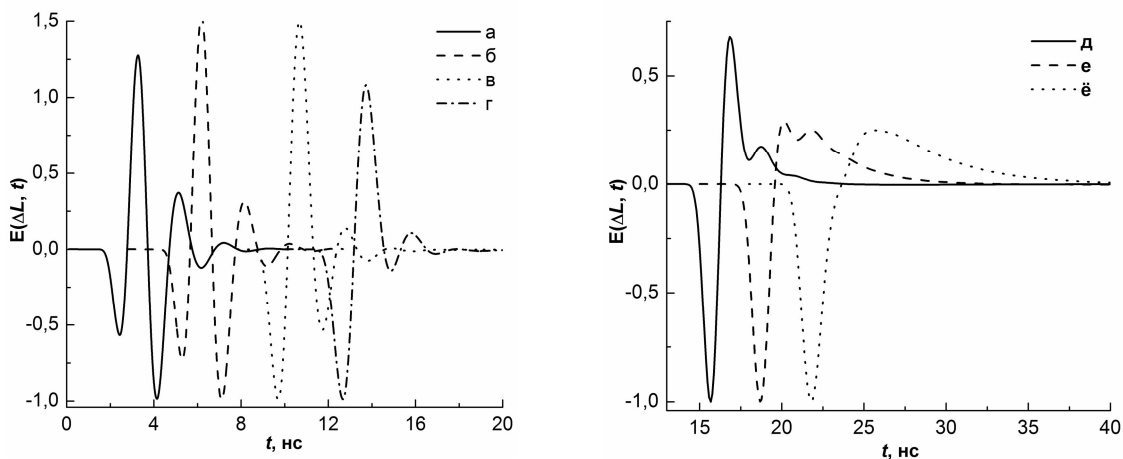


Рис. 12. Временная форма импульса длительностью  $T=3,0$  нс при прохождении в однородной нефтенасыщенной среде расстояния  $\Delta L$ : а) 0,2 м; б) 0,6 м; в) 1,2 м; г) 1,6 м; д) 2,0 м; е) 2,4 м; ё) 2,8 м.

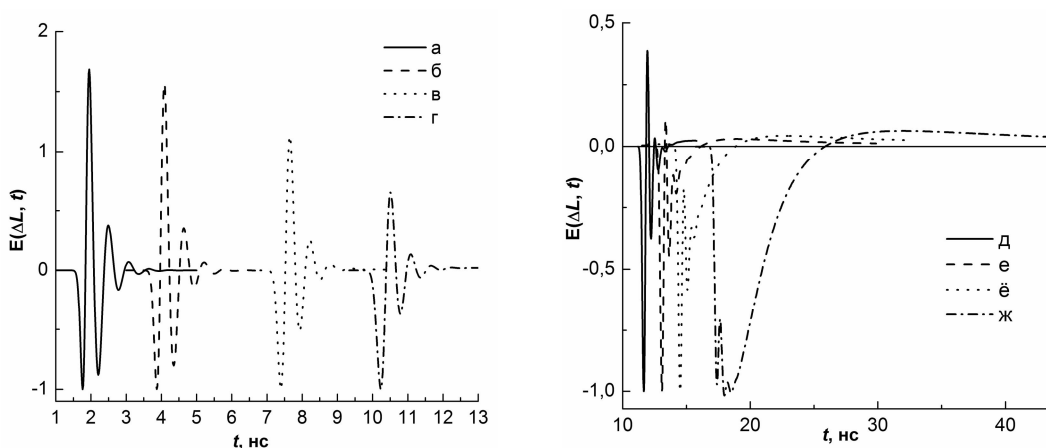


Рис. 13. Временная форма импульса длительностью  $T=0,3$  нс при прохождении в однородной нефтенасыщенной среде расстояния  $\Delta L$ : а) 0,2 м; б) 0,5 м; в) 1,0 м; г) 1,4 м; д) 1,6 м; е) 1,8 м; ё) 2,0 м; ж) 2,4 м.

Как видно из рис. 12, 13 временная форма импульсов с увеличением длины трассы распространения изменяется качественно так же, как в случае распространения плоской волны (см. рис. 4). По мере распространения импульса его ширина увеличивается, и появляется затухающий низкочастотный след, при этом задний фронт импульса искажается значительно сильнее, чем передний фронт.

При распространении на расстояние  $L_{кр} \sim 2,0$  м импульсы приобретают форму близкую к форме инвертированной по знаку производной от ИХ (см. рис. 4). Для оценки затухания энергии импульсов на заданном расстоянии  $\Delta L$  от антенны вдоль оси  $y$ , вычислим полный поток импульсной энергии через единичную площадь, перпендикулярную оси  $y$ :

$$P(\Delta L) = \int_0^{\infty} [\vec{E}(t, \Delta L) \times \vec{H}(t, \Delta L)] \vec{e}_y dt \quad (\text{Дж/м}^2). \quad (4)$$

Данная величина, нормированная на полный поток импульсной энергии на расстоянии 0,2 м, представлена в децибелах на рис. 14.

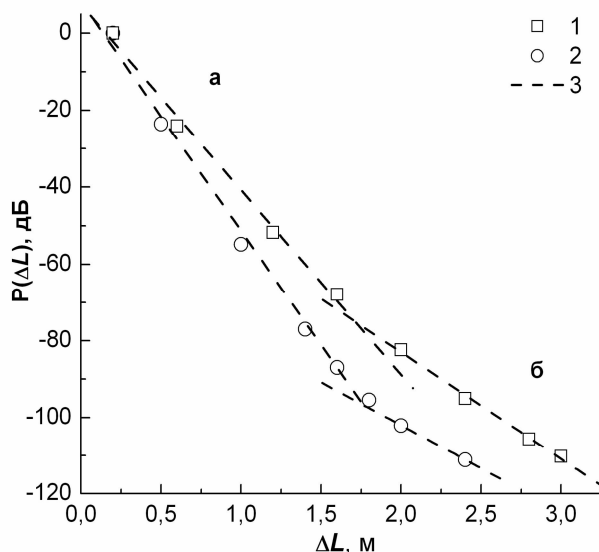


Рис. 14. Нормированный поток энергии импульсов в зависимости от пройденного расстояния  $\Delta L$ . Импульсы имеют исходную длительность: 1  $T=3,0$  нс, линии регрессии: 3а)  $P=7,3-(48,1 \pm 2,6) \cdot \Delta L$ , при  $\Delta L > 1,6$  м; 3б)  $P=-27,2-27,9 \cdot \Delta L$ , при  $\Delta L < 1,6$  м; 2  $T=0,3$  нс, линии регрессии: 3а)  $P=9,4-(61,6 \pm 2,3) \Delta L$ , при  $\Delta L < 1,8$  м; 3б)  $P=-49,9-25,6 \cdot \Delta L$ , при  $\Delta L > 1,8$  м.

Показано, что в нефтенасыщенной среде пикосекундный импульс (длительностью  $T=0,3$  нс) имеет больший средний (вдоль трассы распространения) коэффициент удельного затухания плотности потока энергии ( $61,6$  дБ/м) по сравнению с наносекундным (длительность  $3,0$  нс) импульсом ( $48,1$  дБ/м). При этом на расстояниях больше  $1,6-1,8$  м низкочастотная фильтрация спектра зондирующих импульсов по мере их распространения в нефтенасыщенной среде приводит к уменьшению среднего удельного затухания плотности потока энергии импульса приблизительно в два раза (с  $61,6$  дБ/м до  $25,6$  дБ/м для импульса длительностью  $3,0$  нс и с  $48,1$  дБ/м до  $27,9$  дБ/м для импульса длительностью  $0,3$  нс).

При распространении импульсов в нефтенасыщенной среде в присутствии ВНК по мере увеличения высоты расположения антенны над ВНК динамика формы отраженных от ВНК импульсов с увеличением расстояния до ВНК аналогична той, которая наблюдается при распространении импульса в однородной нефтенасыщенной среде (см. рис. 12 и 13). Значения коэффициентов удельного затухания прямых и отраженных от ВНК импульсов оказываются приблизительно одинаковыми, если расстояния, пройденные данными импульсами равны. Однако за счёт потерь при отражении от ВНК плотность потока энергии отраженных импульсов оказывается в среднем на  $16$  дБ меньше, чем при прямом распространении в однородной нефтенасыщенной среде. Если воспользоваться данными моделирования, представленными на рис. 14, то можно показать, что при динамическом диапазоне радара  $120$  дБ предельные дальности зондирования водонефтяного контакта составляют  $0,9$  м и  $1,3$  м соответственно для импульсов длительностью  $0,3$  нс и  $3,0$  нс.

**Обобщенный анализ затухания и скорости распространения СШП импульсов.** Также как в случае распространения импульсов с плоским фронтом (см. рис. 5 и 6) был проведен

анализ удельного затухания и скорости распространения СШП импульсов [14, 18] с цилиндрическим и сферическим фронтом, излученных нитью тока и диполем, а также импульсов, излученных вибраторной и щелевой антеннами. Результаты такого анализа, представлены на рис. 15 и 16.

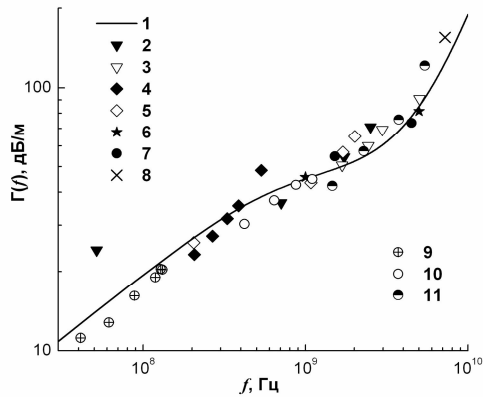


Рис.15. Зависимость от частоты удельного коэффициент затухания в нефтенасыщенной среде для амплитуды монохроматической волны (1) и зависимость локального удельного затухания полного потока энергии СШП импульсов от средней частоты  $f(\Delta L)$  их спектра на расстоянии  $\Delta L$  от входа в среду.

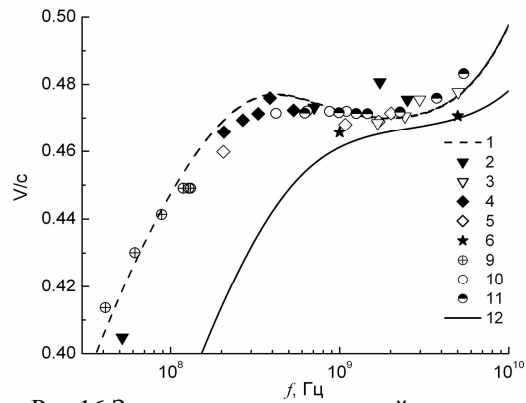


Рис.16. Зависимости групповой скорости распространения в нефтенасыщенной среде узкополосного импульса (1) от его частоты  $f$ , зависимость локальной скорости распространения СШП импульсов от средней частоты  $f(\Delta L)$  их спектра на расстоянии  $\Delta L$  от входа в среду и зависимость фазовой скорости монохроматической волны (12) от частоты  $f$ , рассчитанной по формуле  $V/c=1/n(\omega)$ .

Импульсы имели следующие источники и длительности: 2 – диполь  $T=1,5 \text{ нс}$ ; 3 – диполь  $T=0,1 \text{ нс}$ ; 4 – вибратор  $T=3,0 \text{ нс}$ ; 5 – вибратор  $T=0,3 \text{ нс}$ ; 6 – нитевидный источник  $T=1,0 \text{ нс}$ ,  $T=0,2 \text{ нс}$ ; 7 – щелевая антенна  $T=1,0 \text{ нс}$ ,  $T=0,1 \text{ нс}$ ; точка (8) соответствует значению, полученному в эксперименте (Эпов М.И., 2008); 9 – плоская волна  $T=10 \text{ нс}$ ; 10 – плоская волна  $T=1 \text{ нс}$ ; 11 – плоская волна  $T=0,1 \text{ нс}$ .

Как следует из этого анализа, зависимости локального удельного затухания и локальной скорости распространения СШП импульсов от расстояния, пройденного импульсом в нефтенасыщенной среде с частотной дисперсией, связаны с групповой скоростью узкополосного импульса и удельным затуханием монохроматических волны теми же соотношениями, что и в случае распространения импульсов с плоским волновым фронтом, в пределах относительной погрешности 2% и 17%, соответственно.

Используя полученные соотношения между локальной скоростью распространения СШП импульсов от расстояния, пройденного импульсом в нефтенасыщенной среде и групповой скоростью узкополосного импульса в данной среде (см. рис. 16), определим [14, 18] среднюю скорость распространения импульсной энергии СШП импульсов, прошедших расстояние  $L_{\text{эф}}$  по формуле:

$$V(L_{\text{эф}}) = \frac{1}{f_s(L_{\text{эф}}) - f_s(0)} \int_{f_s(L_{\text{эф}})}^{f_s(0)} V_g(f) df, \quad (5)$$

$V_g(f)$  – групповая скорость определяемая по кривой 1 (рис. 16),  $f_s(L_{\text{эф}})$  – частота, соответствующая средней частоте спектра амплитуды СШП импульса принятого на расстоянии,  $L_{\text{эф}}=(4D-\Delta L)^{1/2}$  – геометро-оптическое приближение (ГП) расстояния прошедшего в среде импульсом, отраженным от ВНК,  $\Delta L=0,2 \text{ м}$  – расстояние между антенной и точкой приёма,  $f_s(0)$  – средняя частота спектра амплитуды СШП импульса подаваемого на вход излучающей антенны. Далее, измерив временную задержку  $t_3$  импульсов, отраженных от ВНК, найдем измеренное эффективное расстояние  $L_{\text{эф,м}}=V(L_{\text{эф}}) \cdot t_3$ . Затем используя ГП, определим измеренную высоту положения излучающей антенны  $D_m$  над ВНК. Величины  $f_s(0)$  и  $f_s(L_{\text{эф}})$  были взяты из результатов моделирования распространения импульсов. В эксперименте эти вели-

чины могут быть измерены. Зависимость, найденной таким образом высоты  $D_m$  от истинной высоты  $D$ , показана на *рис. 17*.

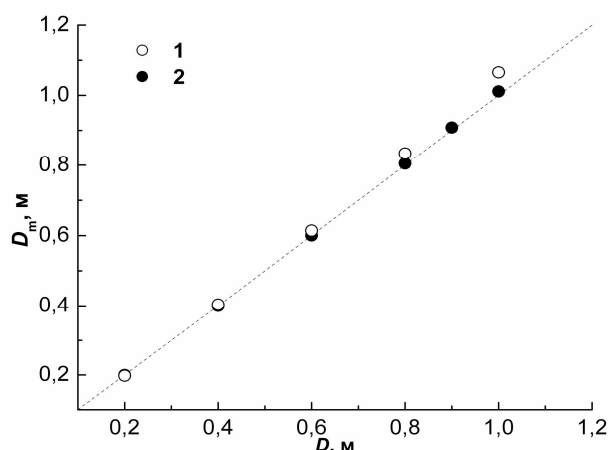


Рис. 17. Зависимость измеренной высоты  $D_m$  от истинной высоты  $D$  положения вибраторной антенны над ВНК. Среднеквадратичное отклонение измеренной  $D_m$  от истинной  $D$  высоты составило: 6,6% и 1,3% для импульса длительностью 1)  $T=3,0$  нс и 2)  $T=3,0$  нс соответственно.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обосновано применение спектроскопической рефракционной модели КДП сред нефтегазового коллектора, в которой учтены их петрофизические характеристики (долевое содержание нефти, водного солевого раствора, метана и песчаника), для численного моделирования процесса распространения нано- и субнаносекундных импульсных электромагнитных полей в неоднородных средах нефтегазового коллектора.
2. Обосновано применение метода дискретных источников для численного расчёта импульсных СШП электромагнитных полей в нефтенасыщенной среде нефтегазового коллектора, излученных электрическим вибратором и щелью, прорезанной на идеально проводящем цилиндре.
3. Показано, что каждый из слоев нефтегазового коллектора имеет свойства низкочастотного фильтра с частотами среза: 1) водонасыщенный слой  $f_{0,5}=14,2$  МГц, 2) нефтенасыщенный слой  $f_{0,5}=93,6$  МГц.
4. При распространении в нефтенасыщенной среде импульсной волны с плоским фронтом предельная временная форма биполярного импульса стремится к производной от импульсной характеристики среды.
5. При возбуждении нити электрического тока узкополосным радиоимпульсом с гауссовой огибающей удельный коэффициент затухания импульсов  $-45,6$  дБ/м и  $-81,5$  дБ/м длительностью  $T=1,0$  нс и  $T=0,2$  нс соответственно с относительной погрешностью менее 4% совпадает с коэффициентом затухания ( $-44,8$  дБ/м и  $84,8$  дБ/м) плоской монохроматической волны, частота которой соответствует несущей частоте спектра амплитуды радиоимпульсов.
6. Показано, что вследствие низкочастотной фильтрации спектров СШП импульсов в процессе распространения локальный удельный коэффициент затухания импульсного потока энергии уменьшается в нефтенасыщенной среде на расстояние от 0,2 м до 2,8 м более чем в два раза для импульсов с длительностью от 0,1 до 3,0 нс для всех типов рассмотренных излучателей.
7. Установлено, что локальная скорость движения в пространстве потока энергии СШП импульсов длительностью 0,1-3,0 нс на заданном расстоянии с погрешностью менее 2 % совпадает с групповой скоростью распространения узкополосного волнового пакета при условии, что частота волнового пакета равна средней частоте спектра амплитуды СШП импульса на этом расстоянии. (в пределах трассы распространения до 3,0 м).
8. Предложен метод определения расстояния от излучателя до границы ВНК, основанный на использовании формулы для групповой скорости волнового пакета в нефтенасыщенной сре-



де и формулы для длины трассы в приближении геометрической оптики. Метод предусматривает измерение средней частоты в спектрах излученного и принятого георадаром импульсов и временной задержки отраженного импульса. Погрешность определения дальности с использованием предложенного метода при удалении излучающей антенны от водонефтяного контакта на расстояние до 1,0 м не превышает 7 %.

9. Установлено, что локальный коэффициент удельного затухания импульсного потока энергии СШП импульсов на заданном расстоянии с погрешностью менее 17 % совпадает с коэффициентом удельного затухания амплитуды плоской монохроматической волны, частота которой равна средней частоте СШП импульса на этом расстоянии. Показано, что в случае вибраторной антенны при динамическом диапазоне скважинного георадара 120 дБ предельные дальности зондирования водонефтяного контакта составляют 0,9 м и 1,3 м соответственно для импульсов длительностью 0,3 нс и 3,0 нс.

Данные выводы диссертации ограничены конкретными петрофизическими параметрами нефтегазового коллектора и температурой 40°C, для которой были получены все численные результаты в исследовании.

## ЛИТЕРАТУРА

- Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Советское радио.-1957.-581 с.
- Сараев Д.В., Лунёв И.В., Гафарова Л.И., Юсупова Т.Н., Гусев Ю.А., Романов Г.В. Метод диэлектрической спектроскопии в исследовании диэлектрической дисперсии нефтяных масел// Структура и динамика молекулярных систем.-2003.-Вып. 10, ч.2.- С. 1-12.
- Эпов М.И., Миронов В.Л., Бобров П.П., Савин И.В., Репин А.В. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0,05–16 ГГц //Геология и геофизика.-2009.- Т. 50, №5.-С. 613-618.
- Эпов М.И., Якубова О.В., Тельпуховский Е.Д., Миронов В. Л., Якубов В.П. Метод сверхширокополосного радиоволнового каротажа горизонтальных скважин //Известия вузов. Физика.-2008.- Т. 51, №9.-С. 63-70.
- Avdikos G.K., Anastassiou H.T. Antennas Computational cost estimations and comparisons for three methods of applied electromagnetics (MoM, MAS, MMAS)// IEEE Propagation Magazine.-2005.-Vol. 47, № 1.-P. 121–129.
- Chen Y.-H., Coates R. T., Chew W. C. FDTD Modeling and Analysis of a Broadband Antenna Suitable for Oil-Field Imaging While Drilling // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing.- 2002.- Vol. 40, № 2.- P. 434-442.
- Ebihara S. Analysis of Eccentered dipole antenna for borehole radar // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.-2009.-Vol. 47, № 4.-P. 1073-1088.
- Hansen T.B. The Far Field of a Borehole Radar and Its Reflection at a Planar Interface// IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing.-1999.-V 37, №4.-P. 1940-1950.
- Sixin L., Motoyuki S. Electromagnetic Logging Technique Based on Borehole Radar// IEEE Transactions on geoscience and remote sensing.-2002.-Vol. 40, No. 9.-P. 2083-2092.
- Stogryn A. Equation for calculation the dielectric constant of saline water// IEEE Trans. Microwave Theory Thech.-1971.-V. MTT-19.-P. 733-736.
- Ulaby F., Moore R, Fung A. Microwave Remote Sensing: Active and Passive- Volume III: Artech House.- 1986.- P. 2162.
- Vossen S. H. J. A. A two-wire antenna system for detecting objects in a homogeneous dielectric half space. PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.- 2003.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дифракция электромагнитного импульса на объекте в неоднородной среде/ Музалевский К.В. // Тез. док. тридцать первой науч. конф. студентов, аспирантов. - Барнаул, 2004.-С. 34-35.

2. Комаров С.А., Музалевский К.В. Импульсное зондирование неоднородной среды //Известия АлтГУ.- 2005.- Вып. 1, № 1.-С. 103-105.
3. Импульсное электромагнитное возбуждение нефтесодержащей слоистой среды/ Миронов. В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В.// Тез. докл. международной научно-практической конференции «Инновационные технологии для нефтегазового комплекса».- Новосибирск, 2005.
4. GPR Signal Simulations in the Course of Freeze/Thaw Process for a Permafrost Area/ Komarov S.A., Mironov V.L. and Muzalevsky K.V.// Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'05).- Seoul, Korea, 2005.- Vol. VII.- P. 4600-4603.
5. Моделирование подповерхностного радарного зондирования активного слоя вечной мерзлоты/ Миронов. В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В.// Тез. докл. Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва, 2005.
6. Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Электромагнитное зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами: Препринт - 836Ф.- Институт физики СО РАН, 2006.- 24 с.
7. Комаров С.А., Музалевский К.В. Метод дискретных источников в задаче импульсного возбуждения вибратора в слоистой среде// Известия вузов. Физика.- 2007.- № 10, .- с. 95 –96.
8. Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Электромагнитное зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами //Геология и геофизика.- 2007.-Т. 48, №12.- С. 1357-1365.
9. Pulse Electromagnetic Sounding of the Petroleum-Containing Layered Medium/ Komarov S.A., Mironov V.L., Muzalevsky K.V. // Proceeding of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'07).- Barcelona, Spain, 2007.- P. 766 – 768.
10. Музалевский К.В., Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А. Возможности применения широкополосных электромагнитных импульсных сигналов для геонавигации в слоистой среде нефтегазового коллектора //Известия вузов. Физика.- 2008.- Т. 51, №9/2.- С. 50-55.
11. Тестирование теоретической модели широкополосного зондирования водонефтяного контакта/ Эпов М.И., Музалевский К.В., Миронов В.Л., Комаров С.А.// Тез. докл. XII международной научной конференции «Решетневские чтения».- Красноярск, 2008.- С. 114-115.
12. Эпов М.И., Миронов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Распространение сверхширокополосного электромагнитного импульса в средах флюидонасыщенного слоистого коллектора //Геология и геофизика.- 2009.- Т. 50, №2.- С.58-66.
13. Testing of the Theoretical Model for a Wideband Pulse Propagation in the Oil-Gas Collector Media/ Mironov V. L., Muzalevskiy K.V.// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009).- Moscow, 2009.- P.297-299.
14. Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В. Локальная скорость и коэффициент затухания нано- и субнаносекундных импульсов при распространении в нефтенасыщенной среде нефтегазового коллектора: Препринт-848Ф.- Институт физики СО РАН, 2009.- 8 с.
15. Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В. Применение метода дискретных источников для расчёта импульсного электромагнитного скважинного зонда: Препринт-849Ф.- Институт физики СО РАН, 2009.- 16 с.
16. Эпов М.И., Миронов В.Л., Шайдунов Г.Я., Музалевский К.В., Есин А.Ю. Предельная дальность обнаружения идеально проводящей плоской границы расположенной под слоем влажного засоленного песка при зондировании георадаром ОКО-2: Препринт 850Ф.- Институт физики СО РАН, 2009.- 12с.
17. Метод дискретных источников для расчёта токов электрического вибратора, расположенного в скважине/ Музалевский К.В., Колчигин Н.Н. // Тез. докл. XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения».- Красноярск, 2009.- С. 183-185.
18. Метод определения расстояния до водонефтяного контакта с помощью СШП импульсов/ Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В.// Тез. докл. XIII Международной научной конференции «Решетневские чтения».- Красноярск, 2009.- С. 194-195.

---

Музалевский Константин Викторович  
Импульсное сверхширокополосное электромагнитное  
зондирование водонефтяного контакта в нефтегазовом  
коллекторе.  
Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук.  
Подписано к печати 07.04.2010 г. Формат 60x84/16  
Тираж 70 экз., 0,9 усл. печ. л. Заказ №9  
Отпечатано на ротапринте ИФ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок

---