



СБОРНИК ДОКЛАДОВ

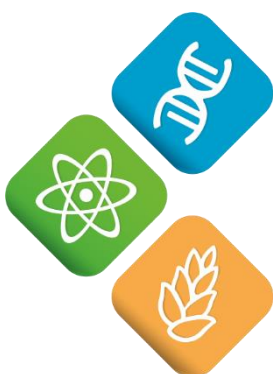


I МЕЖДУНАРОДНОЙ МОЛОДЕЖНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

18-21 октября 2022, Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ



GENTECH.RIRAE.RU



I Международная молодежная конференция
«Генетические и радиационные технологии
в сельском хозяйстве»

Ist International Young Scientists Conference
“Genetic and Radiation Technologies in Agriculture”

Ministry of Science and Higher Education of The Russian Federation
Russian Institute of Radiology and Agroecology

GENETIC AND RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

**Proceedings
of the 1st International Young Scientists Conference**

Obninsk, October 18-21, 2022

Obninsk
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт
радиологии и агроэкологии»

Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве

**Сборник докладов
I Международной молодежной конференции**

Обнинск, 18-21 октября 2022 г.

Обнинск
2022

УДК 577+57.04
ББК 28.0
Г 34

Редакционная коллегия:

О.А. Шубина, к.б.н. (отв. ред.), Е.В Гордиенко, О.Э. Пронина, Р.А. Микаилова

Г 34 **Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве:** сборник докладов I международной молодежной конференции, Обнинск, 18–21 октября 2022. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2022. – 281 с.: ил.

ISBN 978-5-903386-49-9

В сборнике представлены материалы I молодежной конференции «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве», которая проводится в соответствии с планом реализации мероприятий проекта № 5.ИП.21.0009 «Поиск генов устойчивости к абиотическим и биотическим стрессорам и создание стрессоустойчивых линий ячменя и люпина при помощи ионизирующих излучений и технологий редактирования генома», осуществляемого в рамках ФНТП развития генетических технологий на 2019–2027 гг. Сборник содержит материалы по следующим направлениям: геномные и постгеномные технологии, генетическое редактирование и маркер-ассоциированная селекция, радиобиологические исследования и радиационные технологии в сельском хозяйстве, фундаментальные и прикладные аспекты радиоэкологии и агроэкологии.

Ответственность за соблюдение законов об интеллектуальной собственности, достоверность приведенных сведений несут авторы публикуемых докладов. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на сборник докладов обязательна.

Genetic and Radiation Technologies in Agriculture: Proceedings of the 1st International Young Scientists Conference, Obninsk, October 18-21, 2022. Obninsk: RIRAE, 2022. – 281 p.

The collection contains materials from the 1st International Young Scientists Conference “Genetic and Radiation Technologies in Agriculture” which is held under the action plan of project No. 5.IP.21.0009 “Search for genes of resistance to abiotic and biotic stressors and the creation of stress-resistant lines of barley and lupine using ionizing radiation and genome editing technologies”, implemented within the framework of the federal scientific and technical program for the development of genetic technologies for 2019-2027. The book includes materials in the following areas: genomic and postgenomic technologies, genetic editing and marker-assisted selection, radiation biology research and radiation technologies in agriculture, and fundamental and applied aspects of radioecology and agroecology.

Authors of published material are responsible for compliance with intellectual property laws and reliability of the information provided. Editorial opinion may not coincide with the opinion of the authors of the publications. When reprinting, a reference to the Proceedings is obligatory.

УДК 577+57.04
ББК 28.0

ISBN 978-5-903386-49-9

© ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2022
© Авторы, 2022

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

Секция

ГЕНОМНЫЕ И ПОСТГЕНОМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / GENOMIC AND POSTGENOMIC TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE	15
<i>Болотина А.А., Полховская Е.С., Дудников М.В., Киров И.В. / Bolotina A.A., Polkhovskaya E.S., Dudnikov M.V., Kirov I.V.</i>	
Поиск новых генов, экспрессирующихся в процессе развития зерновки, с помощью нанопорового секвенирования / Search for New Genes Expressed During Seed Developing by Nanopore Sequencing	16
<i>Воронежская В.С., Подлущий М.С., Казакова Е.А., Шестерикова Е.М., Волкова П.Ю. / Voronezhskaya V.S., Podlutskiy M.S., Kazakova E.A., Shesterikova E.M., Volkova P.Yu.</i>	
Транскриптомный анализ растений <i>Vicia cracca</i>, произраставших на территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / Transcriptomic Analysis of <i>Vicia cracca</i> Plants Growing on the Territory of Chronic Radiation Pollution	17
<i>Jatgochian H.H.</i>	
Preparation of Recombinant Alpha-hemolysin <i>Staphylococcus aureus</i>	19
<i>Клабуков И.Д., Якимова А.О., Барановский Д.С., Красильникова О.А., Иванов С.А., Шегай П.В., Каприн А.Д. / Klabukov I.D., Yakimova A.O., Baranovsky D.S., Krasilnikova O.A., Ivanov S.A., Shegai P.V., Kaprin A.D.</i>	
Предвосхищая будущее геной инженерии и радиобиологии: 100 лет со дня начала научной работы Н.В. Тимофеева-Ресовского / Foreshadowing the future of genetic engineering and radiobiology: 100 years from the beginning of N.V. Timofeeff-Ressovsky's scientific work	23
<i>Меркулов П.Ю., Константинов З.С., Власова А.В., Киров И.В. / Merkulov P.Yu., Konstantinov Z.S., Vlasova A.V., Kirov I.V.</i>	
Методы анализа мобилома растений в реальном времени / Methods for Plant Mobilome Analysis in Real Time	25
<i>Остренко К.С., Колоскова Е.М., Лантев Г.Ю. / Ostrenko K.S., Koloskova E.M., Laptev G. Yu.</i>	
Оценка молекулярно-генетическими методами микробиома рубца овец на фоне применения аскорбата лития / Evaluation of the Sheep Rumen Microbiota by Molecular Genetic Methods Against the Background of the Use of Lithium ascorbate	26
<i>Пишенин И.А., Ханова А.С., Блинова Я.А., Смирнова А.С., Подобед М.Ю., Шестерикова Е.М., Горбатова И.В., Лыченкова М.А., Казакова Е.А., Волкова П.Ю. / Pishenin I.A., Khanova A.S., Blinova Ya.A., Smirnova A.S., Podobed M.Yu., Shesterikova E.M., Gorbatova I.V., Lychenkova M.A., Kazakova E.A., Volkova P.Yu.</i>	
Сравнительный анализ концентраций стрессовых метаболитов в проростках ячменя сортов Фокс 1 и Леон в ответ на низкодозовое гамма-облучение / Comparative Analysis of Concentrations of Stress Metabolites in Barley Sprouts of Foks 1 and Leon Varieties in Response to Low-Dose Gamma Irradiation	30
<i>Подлущий М.С., Празян А.А., Волкова П.Ю., Шестерикова Е.М., Казакова Е.А., Сабуров В.О., Моисеев А.С., Казаков Е.И., Сабитов А.Б. / Podlutskiy M.S., Prazyan A.A., Volkova P.Yu., Shesterikova E.M., Kazakova E.A., Saburov V.O., Moiseev A.S., Kazakov E.I., Sabitov A.B.</i>	
Изучение особенностей транскриптома <i>Hordeum vulgare</i> L. после воздействия различными видами ионизирующих излучений / The Transcriptomic Study of <i>Hordeum vulgare</i> L. after Exposure to Different Types of Ionizing Radiation	32
<i>Полховская Е.С., Болотина А.А., Дудников М.В., Соловьев А.А., Киров И.В. / Polkhovskaya E.S., Bolotina A.A., Dudnikov M.V., Soloviev A.A., Kirov I.V.</i>	
Идентификация неаннотированных генов развития зерновки с помощью нанопорового секвенирования / Identification of Unannotated Grain Developing Genes by Nanopore Sequencing	35

<i>Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Саакян С.Р., Дорошенко В.А., Саркисян Д.С., Золотов С.А. / Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Saakyan S.R., Doroshenko V.A., Sarkisyan D.S., Zolotov S.A.</i>	
Методы оценки современного селекционного материала на повышение урожайности / Methods for Assessing Modern Breeding Material to Increase Yield	38
<i>Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Саркисян Д.С., Саакян С.Р., Золотов С.А. / Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Sarkisyan D.S., Sahakyan S.R., Zolotov S.A.</i>	
Методы исследования клонального микроразмножения редких и ценных видов растений методом <i>in vitro</i> / Methods for Studying the Clonal Micropropagation of Rare and Valuable Plant Species by the <i>in vitro</i> Method	41
<i>Смирнова А.С., Горбатова И.В., Казакова Е.А., Волкова П.Ю. / Smirnova A.S., Gorbatova I.V., Kazakova E.A., Volkova P.Yu.</i>	
Изучение дифференциальной экспрессии гомологов генов CML39, PM19L и AOS2 на разных стадиях онтогенеза ячменя обыкновенного после γ-облучения семян / Study of Differential Expression of CML39, PM19L and AOS2 Homologues Genes at Different Stages of Barley Ontogenesis After γ-irradiation of Seeds	45
Секция	
ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ И МАРКЕР-АССОЦИИРОВАННАЯ СЕЛЕКЦИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / GENETIC EDITING AND MARKER-ASSISTED SELECTION IN AGRICULTURE	
49	
<i>Воденеев В.А. / Vodeneev V.A.</i>	
Методы высокопроизводительного фенотипирования в селекции / High-Performance Phenotyping Methods in Selection	50
<i>Куликов Е.И., Комарчев А.С., Мартынова В.Н. / Kulikov E.I., Komarchev A.S., Martynova V.N.</i>	
Влияние однонуклеотидной замены в гене рецептора фолликулостимулирующего гормона (FSHR) на продуктивность исходных линий кур яичного кросса / Effect of a Single Nucleotide Polymorphism in the Follicle-Stimulating Hormone Receptor (FSHR) Gene on the Productivity of the Egg Cross Chicken Lines	51
<i>Миколайчик И.Н., Морозова Л.А., Тимохина М.А., Масасина Е.В. / Mikolajchik I.N., Morozova L.A., Timokhina M.A., Masasina E.V.</i>	
Полиморфизм свиней породы ландрас по гену ESR эстрогенового репептора / Polymorphism Of Pigs of the Landrace Breed by the ESR Gene of the Estrogen Repeptor	55
<i>Немцова Ю.А., Кузнецова Д.В., Воденеев В.А., Гринберг М.А. / Nemtsova Y.A., Kuznetsova D.V., Vodeneev V.A., Grinberg M.A.</i>	
Поиск фотосинтетических показателей-предикторов устойчивости растений ячменя к засухе и засолению / Detection of Photosynthetic Indicators-Predictors of Resistance of Barley Plants to Drought and Salt Stress	57
<i>Пырсигов А.С., Полховская Е.С., Милюкова Н.А. / Pysrikov A.S., Polkhovskaya E.S., Milyukova N.A.</i>	
Новые молекулярные маркеры для установления взаимосвязи глиадинкодирующих локусов с хлебопекарными качествами яровой тритикале / New Molecular Markers for Estimation the Relationship of Gliadincoding Locus with Spring Triticale Baking Quality	60
<i>Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Золотов С.А., Саркисян Д.С., Саакян С.Р., Рева Е.Н. / Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Zolotov S.A., Sarkisyan D.S., Sahakyan S.R., Reva E.N.</i>	
Особенности селекции новых сортов зерновых культур / Features of Breeding New Varieties of Grain Crops	62
<i>Черноок А.Г., Баженов М.С., Дивашук М.Г. / Ghernook A.G., Bashenov M.S., Divashuk M.G.</i>	
Разработка маркера для гена фактора, регулирующего рост ScGRF3-2R / Marker Development for Growth Regulating Factor Gene ScGRF3-2R	64

Секция

РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ /

RADIATION BIOLOGY RESEARCH IN AGRICULTURE 67

Бабина Д.Д., Подобед М.Ю., Блинова Я.А., Шестерикова Е.М., Празян А.А., Подлутский М.С., Волкова П.Ю., Бондаренко Е.В. /
Babina D.D., Podobed M. Yu., Blinova Ya.A., Shesterikova E.M., Prazyan A.A., Podlutskiy M. S., Volkova P.Yu., Bondarenko E.V.

Анализ параметров прорастания *Arabidopsis thaliana* линии *cml39* после воздействия абиотических стрессоров / Analysis of the Parameters of *Arabidopsis thaliana* Germination After the Action of Abiotic Stressors 68

Бабина К.В., Амосова Н.В. /

Babina K.V., Amosova N.V.

Частота и спектр хромосомных aberrаций при действии ионов тяжелых металлов и γ -облучения на *Hordeum vulgare* L. / Frequency and Spectrum of Chromosomal Aberrations Under the Action of Metal Ions and γ -irradiation on *Hordeum vulgare* L. 71

Годжаева Г.А., Аллахвердиева Л.В., Мамедова Г.А., Эминова Н.М. /

Godjaeva G.A., Allahverdieva L.V., Mamedova G.A., Eminova N.M.

Участие каротиноидов, антоцианов и флавоноидов в защите *Alhagi Pseudalhagi* от хронического гамма-облучения / Participation of Carotenoids, Anthocyanins and Flavonoids in the Protection of *Alhagi Pseudalhagi* From Exposure to Chronic Gamma Radiation..... 75

Гринберг М.А., Немцова Ю.А., Агеева М.Н., Брилкина А.А., Воденев В.А. /

Grinberg M.A., Nemtsova Y.A., Ageyeva M.N., Brilkina A.A., Vodeneev V.A.

Влияние облучения в малых дозах на пространственно-временные характеристики вызванных электрическими сигналами ответов рН и фотосинтеза / Effect of Low-Dose Irradiation on Spatio-Temporal Characteristics of Electrical-Signal-Induced Responses of pH and Photosynthesis 77

Ильюхин Р.В. / Iliukhin R.V.

К вопросу об эффективности малых доз излучения для обработки ячменя / On the Issue of the Effectiveness of Small Doses of Radiation for Processing Barley 80

Казакова Е.А., Горбатова И.В., Шестерикова Е.М., Пишенин И.А., Празян А.А., Битаршвили С.В., Смирнова А.С.,

Блинова Я.А., Волкова П.Ю. /

Kazakova E.A., Gorbatoва I.V., Shesterikova E.M., Pishenin I.A., Prazyan A.A., Bitarishvili S.V., Smirnova A.S., Blinova Ya.A.,

Volkova P.Yu.

Валидация в вегетационном эксперименте на разных стадиях онтогенеза кандидатных генов радиационного гормезиса (гомологов *CML39*, *AOS2*, *PM19L*) / Validation in the Greenhouse Experiment at Different Stages of Ontogeny of Candidate Radiation Hormesis Genes (*CML39*, *AOS2*, *PM19L* Homologues) 83

Макаренко Е.С., Празян А.А., Волкова П.Ю. /

Makarenko E.S., Prazyan A.A., Volkova P.Yu.

Оценка активности каталазы, гваяколовой и аскорбатпероксидазы у травянистых растений из ближней зоны ЧАЭС / Evaluation of Catalase, Guaiacol Peroxidase and Ascorbate Peroxidase Activity in Herbaceous Plants From the Exclusion Zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant 85

Полякова И.В., Фролова Н.А., Губина О.А., Ефимова Е.С., Васильева Н.А., Чиж Т.В. /

Polyakova I.V., Frolova N.A., Gubina O.A., Efimova E.S., Vasilyeva N.A., Chizh T.V.

Исследование радиационной чувствительности культур *listeria monocytogenes*, выделенных из продуктов питания животного происхождения / Investigation of Radiation Sensitivity of *Listeria Monocytogenes* Cultures Isolated From Animal Origin Food Products 88

Смирнова Е.А., Крылова П.С., Бондаренко С.В., Бондаренко Е.В. Бондаренко В.С., Гераськин С.А. /

Smirnova E.A., Krylova P.S., Bondarenko S.V., Bondarenko E.V. Bondarenko V.S., Geras'kin S.A.

Полиморфизм IRAP маркеров в популяциях сосны обыкновенной в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / Polymorphism of Irap Markers in Scots Pine Populations From the Chernobyl Exclusion Zone 91

Тиурин К.Н., Поливанова О.В., Смолina Г.А.

Adaptive Responses of Tube Sunflower (*Helianthus Tuberosus* L.) Plants Under Conditions of Increased Radioactive Background 94

Ханова А.С., Крылова П.С., Бондаренко В.С., Битаршвили С.В., Подобед М.Ю., Празян А.А., Блинова Я.А., Бабина Д.Д., Бондаренко Е.В. /
Khanova A.S., Krylova P.S., Bondarenko V.S., Bitarishvili S.V., Podobed M.Yu., Prazyan A.A., Blinova Ya.A., Babina D.D., Bondarenko E.V.

Сравнительная оценка влияния гамма-облучения семян на развитие проростков *Lupinus angustifolius L.*, *Lupinus luteus L.* и *Lupinus albus L.* / Comparative Evaluation of the Effect of Gamma-Irradiation of Seeds on the Development of Seed Lings of *Lupinus Angustifolius L.*, *Lupinus Luteus L.*, and *Lupinus Albus L.* 97

Секция

РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ /

RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE 101

Авдюхина В.М., Ананьев В.Ю., Беклемишев М.К., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Гордонова И.В., Золотов С.А., Зубрицкая Я.В., Ипатова В.С., Малуга А.А., Никитина З.К., Никитченко А.Д., Родин И.А., Студеникин Ф.Р., Хмелевский О.Ю., Черняев А.П., Чуликова Н.С., Юров Д.С. /
Avdyukhina V.M., Ananiev V.Yu., Beklemishev M.K., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., Bolotnik T.A., Gordonova I.V., Zolotov S.A., Zubritskaya Ya.V., Ipatova V.S., Malyuga A.A., Nikitina Z.K., Nikitchenko A.D., Rodin I.A., Studenikin F.R., Khmelevsky O.Yu., Chernyaev A.P., Chulikova N.S., Yurov D.S.

Физико-химические аспекты радиационной обработки биообъектов / Physical and Chemical Aspects of Irradiation Treatment for Bioobjects 102

Андреанов С.В. / Andrianov S.V.

Перспективы применения гамма-облучения при хранении картофеля различного назначения / Prospects for the Use of Gamma Irradiation During Storage of Potatoes Intended for Various Purposes 104

Басырова Д.В., Харламов В.А., Горбатов С.А., Петрухина Д.И., Глущенко Н.В., Меджидов И.М., Шишко В.И., Тхорик О.В., Иванов И.А., Тихонов В.Н., Тихонов А.В. /
Basyrova D.V., Kharlamov V.A., Gorbatov S.A., Petrukhina D.I., Glushchenko N.V., Medzhidov I.M., Shishko V.I., Tkhorik. O.V., Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V.

Эффективность обработки дозиметра Фрикке нетермальной плазмой при разной скорости потока газа / Efficiency of Treatment of the Frickke Dosimeter with Non-Thermal Plasma at Different Gas Flow Rates 108

Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Дрогунов Е.В., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А. /
Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Voronin L.A., Drogunov E.V., Korobeynikov M.V., Maksimov S.A., Pak A.V., Radchenko V.M., Sidorov A.V., Tkachenko V.O., Shtarklev E.A.

Промышленные ускорители илу для радиационной обработки продукции электронным пучком и тормозным излучением / Industrial Accelerators Ilu for Radiation Treatment of Products by Electron Beam and Bremsstrahlung 111

Близнюк У.А., Беклемишев М.К., Авдюхина В.М., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., Зубрицкая Я.В. /
Bliznyuk U.A., Beklemishev M.K., Avdyukhina V.M., Chernyaev A.P., Borshchegovskaya P.Yu., Zubritskaya Ya.V.

Исследование возможности применения методов «отпечатков пальцев» для идентификации картофеля, обработанного ионизирующим излучением / Study of the Possibility of Applying «Fingerprinting» Methods for Identification of Irradiated Potatoes 115

Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Ипатова В.С., Никитченко А.Д., Родин И.А., Хмелевский О.Ю., Юров Д.С., Черняев А.П. /
Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., Bolotnik T.A., Ipatova V.S., Nikitchenko A.D., Rodin I.A., Khmelevsky O.Yu., Yurov D.C., Chernyaev A.P.

Воздействие ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на органические соединения в продуктах питания / Effects of 1 MeV Accelerated Electrons on Organic Compounds in Food 117

Гайнутдинов Т.Р. / Gaynutdinov T.R.

Разработка способа получения радиозащитного препарата на основе *Fusobacterium necrophorum* / Development of a Method for Obtaining a Radioprotective Drug Based on *Fusobacterium necrophorum* 119

Галлямова М.Ю., Хаммадов Н.И., Вагин К.Н., Рахматуллина Г.И. /
Gallyamova M.Yu., Khammatov N.I., Vagin K.N., Rakhmatullina G.I.

Анализ изменчивости генома облученной *E. coli* / Analysis of the Genome Variability of Irradiated *E. coli* 122

Гусева О.А., Цыгвинцев П.Н., Зейрук В.Н., Деревягина М.К. /
Guseva O.A., Tsygvintsev P.N., Zejruk V.N., Derevyagina M.K.

Предпосевное облучение УФ-С клубней картофеля как фактор снижения заболеваемости фитопатогенами / Pre-Sowing Uv-C Irradiation of Potato Tubers as a Factor in Reducing The Incidence of Phytopathogens 125

Гусева Ю.Е. / Guseva Yu.E.

Влияние γ -облучения семян райграса однолетнего на содержание макроэлементов / Influence of γ -Irradiation of the Seeds of Annual Ryegass on the Content of Macroelements 129

Золотов С.А., Близняк У.А., Студеникин Ф.Р., Крусанов Г.А., Кречетов Н.Д., Соколов С.А. /
Zolotov S.A., Bliznyuk U.A., Studenikin F.R., Krusanov G.A., Krechetov N.D., Sokolov S.A.

Расчёт комбинации алюминиевых пластин для повышения однородности радиационной обработки ускоренными электронами / Calculation of Aluminium Plates Combination with Different Thickness to Increase Radiation Treatment Uniformity with Accelerated Electrons 133

Ипатова В.С., Близняк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Родин И.А., Хмелевский О.Ю., Черняв А.П., Юров Д.С. /
Ipatova V.S., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., Bolotnik T.A., Rodin I.A., Khmelevsky O.Yu., Chernyayev A.P., Yurov D.C.

Влияние ускоренных электронов на содержание летучих органических веществ в мясе курицы в течение двух недель хранения / Influence of Accelerated Electrons on the Content of Volatile Organic Compounds in Chicken Meat During Two Weeks of Storage 136

Камалова З.Р., Нефедова Р.В., Гайнуллин Р.Р., Низамов Р.Н. /
Kamalova Z.R., Nefedova R.V., Gainullin R.R., Nizamov R.N.

Изучение технологии конструирования антительного варианта диагностикума на основе высокодисперсных частиц бентонита / Study of Constructing Technology an Antibody Variant of a Diagnosticum Based on Highly Dispersed Particles of Bentonite 139

Кругляк А.И., Алексеёнок Ю.В., Дорошкевич А.С., Аппазов Н.О., Бакирулы К.Б., Мезенцева Ж.В., Ильина М.Н. /
Kruglyak A.I., Aleksiyayenak Yu. V., Doroshkevich A.S., Appazov N.O., Bakiruly K.B.

Получение засухоустойчивого сорта культуры риса в результате мутагенеза, индуцированного, сгенерированными на установке ЭГ-5 в ОИЯИ / Obtaining a Drought-Resistant Rice Variety as a Result of Mutagenesis Induced by Neutrons Generated at the EG-5 Facility in JINR 142

Маркова М.В., Мельникова Т.В., Полякова Л.П. /
Markova M.V., Melnikova T.V., Polyakova L.P.

Исследование радиационно-химической устойчивости альфа-, бета- и гамма-гхц в составе пестицидного препарата «Гексахлоран дуст» / Study of the Radiation-Chemical Stability of Alpha-, Beta- And Gamma-Hcch in the Composition of the Pesticide Preparation "Hexachlorane Dust" 145

Medzhidov I.M., Polyakova I.V., Gorbатов S.A., Shishko V.I., Gluchshenko N.V., Tkhorik O.V., Basyrova D.V., Petrukhina D.I.,
Kharlamov V.A.

Investigation of Dried Apple Samples for Identification of Radiation Treatment by EPR Method 147

Московская К.А., Лой Н.Н., Сулова О.В., Шубина С.И. /
Moskovskaya K.A., Loi N.N., Suslova O.V., Shubina S.I.

Оценка воздействия предпосевого электронного облучения на морфометрические показатели ячменя в фазу колошения / Assessment of the Effect of Pre-Sowing Electronic Irradiation on the Morphometric Parameters of Barley in the Earing Phase 150

Нефедова Р.В., Камалова З.Р., Гайнуллин Р.Р., Калимуллин Ф.Х., Вафин Ф.Р. /
Nefedova R.V., Kamalova Z.R., Gainullin R.R., Kalimullin F.Kh., Vafin F.R.

Теоретические основы образования РТ в облученном организме и направления создания бифункциональных препаратов как для индикации, так и элиминации их из организма животных / Theoretical Foundations for RT Formation in the Irradiated Organism and Directions of Creating Bifunctional Drugs for Both Indication And Eliminating Them from the Animal Body 153

Петрухина Д.И., Шишко В.И., Харламов В.А., Горбатов С.А., Меджидов И.М., Тхорик О.В., Басырова Д.В., Глущенко Н.В.,
Иванов И.А., Тихонов В.Н., Тихонов А.В. /
Petrukhina D.I., Shishko V.I., Kharlamov V.A., Gorbатов S.A., Medzhidov I.M., Tkhorik O.V., Basyrova D.V., Glushchenko N.V.,
Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V.

Исследование влияния нетермальной аргоновой плазмы на структуру урожая ярового ячменя / The Research of the Effect of Non-Thermal Argon Plasma on the Structure of the Spring Barley Crop 156

<i>Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П., Ханкин В.В., Крусанов Г.А., Золотов С.А., Соколов С.А., Кречетов Н.Д. / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyev A.P., Khankin V.V., Krusanov G.A., Zolotov S.A., Sokolov S.A., Krechetov N.D.</i>	
Метод модификации пучка электронов для повышения равномерности радиационной обработки объектов на промышленных ускорителях / Method of Modification of Electron Beam for Increasing the Uniformity Radiation Processing of Objects at Industrial Accelerators	159
<i>Суслова О.В., Лой Н.Н., Московская К.А., Шубина С.И. / Suslova O.V., Loy N.N., Moskovskaya K.A., Shubina S.I.</i>	
Влияние электронного облучения семян ярового ячменя на пораженность корневыми гнилями / Influence of Electron Irradiation of Spring Barley Seeds on Affection with Root Rots	162
Секция	
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ / FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF RADIOECOLOGY AND AGROECOLOGY	166
<i>Бондаренко С.В., Крылова П.С., Смирнова Е.А., Бондаренко Е.В., Бондаренко В.С., Гераськин С.А. / Bondarenko S.V., Krylova P.S., Smirnova E.A., Bondarenko E.V., Bondarenko V.S., Geras'kin S.A.</i>	
Радиоэкологическое исследование красной японской сосны при помощи полиморфизма IRAP-маркеров / Radioecological Assessment of Japanese Red Pine Using IRAP-Marker Polymorphism	167
<i>Горбатов С.А., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Тихонов А.В., Меджидов И.М. / Gorbatov S.A., Tikhonov V.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V., Medzhidov I.M.</i>	
СВЧ плазматрон на основе волноводного моста / Plasmatron Based on a Waveguide Bridge	170
<i>Горбунов И.Ю., Карпов А.Д., Поляков Р.К., Пророков А.А., Белов А.А. / Gorbunov I.Yu., Karpov, A.D., Polyakov R.K. Prorokov A.A., Belov A.A.</i>	
Удельная активность цезия-137 в побегах текущего года ели европейской (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.) в зависимости от положения в кроне по высоте и сторонам света / The Specific Activity of Caesium-137 in the Shoots of the Current Year of the European Spruce (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.), Depending on the Position in the Crown in Height and Cardinal Directions	172
<i>Дикарев А.В., Битарихвили С.В., Казакова Е.А., Гераськин С.А. / Dikarev A.V., Bitarichvili S.V., Kazakova E.A., Geras'kin S.A.</i>	
Исследование формирования сортовой стрессоустойчивости ярового двурядного ячменя на основе физиолого-биохимических показателей / The Researching of the Spring Barley Variants Stress-Tolerance Formation on the Base of Physiological and Biochemical Parameters	176
<i>Дьячкова В.Г., Крайнова М.Д., Лялин В.И. / Dyachkova V.G., Kraynova M.D., Lyalin V.I.</i>	
Возможности ФГУП «ВНИИФТРИ» по изготовлению и калибровке специальных мер активности радионуклидов для метрологического обеспечения измерений активности радионуклидов при радиационном контроле / Possibilities of FSUE «VNIIFTRI» for the Manufacture and Calibration of Special Measures of Radionuclide Activity for Metrological Support of Measurements of Radionuclide Activity During Radiation Monitoring	178
<i>Карпов А.Д., Горбунов И.Ю., Калнин В.В., Раздаиводин А.Н., Радин А.И. / Karpov A.D., Gorbunov I.Yu., Kalnin V.V., Razdaivodin A.N., Radin A.I.</i>	
Волновой характер распределения Cs-137 в стволе сосны обыкновенной / Wave Character of Distribution Cs-137 in a Scots Pine Trunk	182
<i>Кречетников В.В., Титов И.Е., Кречетникова Е.О., Спиридонов С.И. / Krechetnikov V.V., Titov I.E., Krechetnikova E.O., Spiridonov S.I.</i>	
Разработка моделей вертикальной миграции ¹³⁷Cs по профилю почвы кормовых угодий Тульского НИИСХ / Development of Models of ¹³⁷Cs Vertical Migration According to the Soil Profile Forage Lands of the Tula Research Institute of Agriculture	185
<i>Кречетникова Е.О., Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А. / Krechetnikova E.O., Krechetnikov V.V., Titov I.E., Shubina O.A.</i>	
Создание базы данных «Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель» / Creation of the Database "Complex Radiation and Environmental Monitoring of Alienated Agricultural Land"	189

<i>Кривицкий П.Е., Ларионова Н.В., Монаенко В.Н., Турченко Д.В. / Krivitskiy P.Ye., Larionova N.V., Monayenko V.N., Turchenko D.V.</i>	
Тритий в растительном покрове на площадке «Сары-Узень» Семипалатинского испытательного полигона / Tritium in the Vegetation Cover at the Sary-Uzen Site of the Semipalatinsk Test Site	193
<i>Крыленкин Д.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Саруханов А.В., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Корнеев Ю.Н. / Krylenkin D.V., Anisimov V.S., Anisimova L.N., Sarukhanov A.V., Sanzharov A.I., Dikarev D.V., Korneev Yu.N.</i>	
Влияние внесения в почву возрастающих количеств цинка на подвижность кадмия в системе почва-почвенный раствор-растение / Impact of Increasing Amounts of Zinc Content Introduction to Soil on Cadmium Mobility in Soil-Soil Solution-Plant System	196
<i>Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В., Новикова Н.В. / Kurbakov D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova E.V., Sarukhanov A.V., Dementieva N.V., Novikova N.V.</i>	
Влияние различных технологий производства черной металлургии на содержание тяжелых металлов в снежном покрове / Influence of Different Ferrous Metal Industry Production Technologies on the Content of Heavy Metals in Snow Cover	199
<i>Лукашенко С.Н., Красношеев С.А., Эдомская М.А., Томсон А.В. / Lukashenko S.N., Krasnoшееv S.A., Edomskaya M.A., Tomson A.V.</i>	
Исследование миграции трития по механизму «воздух-растение» / Study of Tritium Migration in the “Air-Plant” System	202
<i>Орлов П.М., Аканова Н.И. / Orlov P.M., Akanova N.I.</i>	
Прогноз уровней загрязнения почв ¹³⁷Cs Брянской, Калужской, Тульской и Орловской области в 2022 и 2025 г. / Forecast of Soil Pollution Levels of ¹³⁷Cs of the Bryansk, Kaluga, Tula and Orel Regions in 2022 and 2025	207
<i>Пирогова П.А., Здобнова Т.А., Гринберг М.А., Воденеев В.А. / Pirogova P.A., Zdobnova T.A., Grinberg M.A., Vodeneev V.A.</i>	
Анализ механизмов влияния ионизирующего излучения на электрические сигналы растений / Analysis of the Mechanisms of Influence of Ionizing Radiation on Electrical Signals of Plants	210
<i>Подобед М.Ю., Бабина Д.Д., Блинова Я.А., Морозова Н.С., Крылова П.С., Бондаренко Е.В. / Podobed M.Yu., Babina D.D., Blinova Ya.A., Morozova N.S., Krylova P.S., Bondarenko E.V.</i>	
Изучение морфометрических параметров растений <i>Arabidopsis thaliana</i> линии CML39 в ответ на двухфакторную комбинацию абиотических стрессоров / Study of Morphometric Parameters of CML39 Arabidopsis Thaliana Plants in Response to the Two-Factor Combination of Abiotic Stressors	212
<i>Попов Е.В., Курдин В.Ф., Штырхунув В.Д., Конончук В.В., Тимошенко С.М. / Popov E.V., Kiridin V. F., Shtyrkhunov V.D., Kononchuk V.V., Timoshenko S.M.</i>	
Особенности мероприятий по реабилитации почв в условиях воздействия неблагоприятных радиоэкологических факторов в центральном экономическом районе Нечерноземья / Features of Soil Rehabilitation Measures Under the Influence of Adverse Radioecological Factors in the Central Economic Region of the Non-Chernozem Region	216
<i>Празян А.А., Шестерикова Е.М., Макаренко Е.С., Гераськин С.А. / Prazyan A.A., Shesterikova E.M., Makarenko E.S., Geras'kin S.A.</i>	
Оценка активности глутатионпероксидазы каталазы в популяциях <i>Pinus sylvestris</i> L., произрастающих в зоне ЧАЭС / Evaluation of the Glutathione Peroxidase in Populations of <i>Pinus sylvestris</i> L. Growing in the Chernobyl Exclusion Zone	221
<i>Ратников А.Н., Санжарова Н.И., Свириденко Д.Г., Суслов А.А., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Баланова О.Ю. / Ratnikov A.N., Sanzharova N.I., Sviridenko D.G., Suslov A.A., Ivankin N.G., Petrov K.V., Balanova O.Y.</i>	
Влияние комплекса ГУМИТОН на продуктивность картофеля и переход ¹³⁷Cs в урожай в Брянской области / Effect of Complex GUMITON on Potato Productivity and Transfer of ¹³⁷Cs to Yield in Bryansk Region	224
<i>Рыбак А.В., Майстренко Т.А. / Rybak A.V., Maystrenko T.A.</i>	
Изучение последствий радиоактивного загрязнения почвы для дождевых червей: разнообразие подходов и методов / The Study of Effects of Radioactive Contamination of Soil to Earthworms: a Variety of Approaches and Methods	226

Рыбникова П.В., Губарева О.С., Цыгвинцев П.Н., Грудина Н.В., Исамов Н.Н. /
Rybnikova P.V., Gubareva O.S., Tsygvintsev P.N., Grudina N.V., Isamov N.N.

Применение новых видов сорбентов и кормовых добавок для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных и получения экологически чистой продукции в зонах техногенного загрязнения / Use of New Types of Sorbents and Feed Additives to Increase Productivity of Farm Animals and Produce Environmentally Friendly Products in Man-Made Pollution Zones 229

Саруханов А.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Крыленкин Д.В., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Корнеев Ю.Н. /
Sarukhanov A.V., Anisimov V.S., Anisimova L.N., Krylenkin D.V., Sanzharov A.I., Dikarev D.V., Korneev Yu.N.

Влияние разных сочетаний содержания Zn и Cd в супесчаной дерново-подзолистой почве на их распределения по формам фиксации / Impact of Different Zn and Cd Content in Soddy Podzolic Soil on their Distribution in Exchangable and Carbonate Bound Fractions..... 232

Свириденко Д.Г., Санжарова Н.И., Ратников А.Н., Суслов А.А., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Баланова О.Ю. /
Sviridenko D.G., Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Suslov A.A., Ivankin N.G., Petrov K.V., Balanova O.Y.

Влияние комплекса ГУМИТОН на продуктивность и качество кукурузы и переход ¹³⁷Cs в урожай в Брянской области / Effect of Complex GUMITON on the Productivity and Quality of Corn and the Transfer of ¹³⁷Cs to Yield in Bryansk Region..... 236

Середин Т.М., Баранова Е.В., Ушакова О.В., Марчева М.М., Солдатенко А.В. /
Seredin T.M., Baranova E.V., Ushakova O.V., Marcheva M.M., Soldatenko A.V.

Особенности накопления радионуклидов луком батунном в условиях Брянской области / Peculiarities of Radionuclide Accumulation by Batun Onion Under the Conditions of the Bryansk Region..... 239

Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Сержанова З.Б. /
Timonova L.V., Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Serzhanova Z.B.

Тритиевое загрязнение почвы СИП / Tritium Pollution of the Soil of the STS 241

Титов И.Е., Кречетников В.В., Кречетникова Е.О., Шубина О.А. /
Titov I.E., Krechetnikov V.V., Krechetnikova E.O., Shubina O.A.

Оценка риска получения сельскохозяйственной продукции с превышением содержания ¹³⁷Cs для 5 юго-западных районов Брянской области / Assessment of the Risk of Obtaining Agricultural Products with Exceeding the Content of ¹³⁷Cs for 5 South-Western Regions of the Bryansk Region 243

Толкаева М.С. / Tolkaeva M.S.

Экологические аспекты синергического взаимодействия солей тяжёлых металлов и физических агентов / Environmental Aspects of Synergic Interaction of Heavy Metal Salt and Physical Agents 246

Шаврина К.Е., Лаврентьева Г.В., Удалова А.А., Шпилько М.А., Мельникова Т.В. /
Shavrina K.E., Lavrentyeva G.V., Oudalova A.A., Shpilko M.A., Melnikova T.V.

Изучение миграционных показателей гамма-излучающих радионуклидов в системе «почва-растение» в зоне влияния НИФХИ им. Л.Я. Карпова / Study of Migration Indicators of Gamma-Emitting Radionuclides in the "Soil-Plant" System in the Zone of Influence of the L.Y. Karpov NIFHI 249

Шестерикова Е.М., Бондаренко В.С., Битаршвили С.В., Празян А.А., Волкова П.Ю. /
Shesterikova E.M., Bondarenko V.S., Bitarishvili S.V., Prazyan A.A., Volkova P.Yu.

Анализ транскрипционной активности генов в популяциях многолетних травянистых растений (*Achillea millefolium* L. и *Chelidonium majus* L.), произрастающих в Чернобыльской зоне отчуждения / The Transcriptional Activity of Genes in Populations of Perennial Herbaceous Plants (*Achillea Millefolium* L. And *Chelidonium Majus* L.) from the Chernobyl Exclusion Zone 253

Шпилько М.А., Мельникова Т.В., Шаврина К.Е., Удалова А.А., Лаврентьева Г.В. /
Shpilko M.A., Melnikova T.V., Shavrina K.E., Lavrentieva G.V.

Исследование химического и радиоактивного загрязнения водных объектов вблизи АО НИФХИ им. Л.Я. Карпова (2021–2022 гг.) / Study of Chemical and Radioactive Pollution of Water Objects Near Joint-Stock Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry (2021–2022) 255

ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА

«BioSkills 2022: наука как образ жизни»	259
<i>Астахина С.О., Комарова Л.Н. / Astakhina S.O., Komarova L.N.</i>	
Закономерности формирования ответных реакций ячменя посевного после действия гамма-излучения / Patterns of Formation of Responses of Barley after the Action of Gamma Radiation	260
<i>Афонин А.А., Комарова Л.Н. / Afonin A.A., Komarova L.N.</i>	
Закономерности действия ионизирующего излучения и солей ртути на организмы гидробионтов / Regularities of the Effect of Ionizing Radiation and heavy Metal Salts on Hydrobiont Organisms	263
<i>Блинова Я.А., Казакова Е.А. / Blinova Ya.A., Kazakova E.A.</i>	
Влияние абиотических стрессовых факторов на морфофизиологические параметры <i>Arabidopsis thaliana</i> / Influence of Abiotic Stress Factors on Morpho-Physiological Parameters of <i>Arabidopsis thaliana</i>	265
<i>Домнин И.А.</i>	
Динамика зарастания песчаного карьера на территории Боровского района	268
<i>Исаев Д.В.</i>	
Биоразнообразие и распространение макрозообентоса на участке реки Ипуть Брянской области в районе радионуклидного загрязнения	269
<i>Купцова П.С., Выпова Е.Р., Берсенева А.А., Комарова Л.Н. / Kuptsova P.S., Vupova E.R., Berseneva A.A., Komarova L.N.</i>	
Изучение радиозащитных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения разного качества на клетки человека / Studying the Radioprotective Properties of Fumaric Acid and 3-Oxypyridine Fumarate Under the Action of Ionizing Radiation of Different Qualities on Human Cells.....	270
<i>Мельникова А.А. / Melnikova A.A.</i>	
Анализ применения комбинированного действия тяжелых заряженных частиц и доxorубицина на клеточные линии SK-N-BE(2) и hTERT / Analysis of the Use of the Combined Action of Heavy Charged Particles and Doxorubicin on SK-N-BE(2) and hTERT Cell Lines	273
<i>Степанова Е. А., Рассказова М. М., Манухов И. В., Новоятлова У.С.</i>	
Исследование эффективности штамма <i>Bacillus subtilis</i> 168 pNKlexA для детекции генотоксичных веществ в почве (на примере почв о. Оленевский)	275
<i>Суворова С.Ю., Рассказова М.М.</i>	
Создание базы данных водной экосистемы участка реки Ипуть Брянской области в районе следа аварии на Чернобыльской АЭС	277
<i>Шупик Д.А., Лукашенко С.Н., Рассказова М.М. / Shupuk D.A., Lukashenko S.N., Rasskazova M.M.</i>	
Вариабельность накопления Fe, Zn, Mn внутри одного сорта с/х культуры на примере листового салата сорта «Надин Агро» / Accumulation Variability of Fe, Zn, Mn within a Same Varieties of Agricultural Crops on the Example of Leafy Salad Varieties "Nadin Agro"	278

ФЕНОМЕНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

КОМПАНИЯ ФЕНОМИКА ПРЕДЛАГАЕТ ШИРОКИЙ СПЕКТР ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ И УСЛУГ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ: ФЕНОТИПИРОВАНИЕ РАСТЕНИЙ, МЕДИЦИНА И КРИМИНАЛИСТИКА, НАУКА.



- СИСТЕМЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ФЕНОТИПИРОВАНИЯ РАСТЕНИЙ
- СИСТЕМЫ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
- ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ И МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЕ КАМЕРЫ
- КАМЕРЫ РОСТА РАСТЕНИЙ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ ФИТОТРОНОВ
- ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ФЕНОТИПИРОВАНИЯ РАСТЕНИЙ
- АРЕНДА ОБОРУДОВАНИЯ
- ПОДДЕРЖКА ПО РАБОТЕ С ОБОРУДОВАНИЕМ
- ОБУЧЕНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ МАСТЕР-КЛАССОВ
- ЭНДСКОПИЯ
- МИКРОСКОПИЯ
- КРИМИНАЛИСТИКА

PHENOSPEx
Smart Plant Analysis



PHENOMICS.RU

Секция

ГЕНОМНЫЕ И ПОСТГЕНОМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

GENOMIC AND POSTGENOMIC TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



ПОИСК НОВЫХ ГЕНОВ, ЭКСПРЕССИРУЮЩИХСЯ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ЗЕРНОВКИ, С ПОМОЩЬЮ НАНОПОРОВОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Болотина А.А.², Полховская Е.С.¹, Дудников М.В.^{1,2}, Киров И.В.^{1,2}

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии»
127550 г. Москва, ул. Тимирязевская 42, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»
141701 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9, Российская Федерация
e-mail: boloti.anya@yandex.ru

Изучение принципов и закономерностей регуляции биологических процессов, определяющих практически значимые признаки сельскохозяйственных культур, является перспективным для селекции растений. На молекулярном уровне существенный вклад в рост и развитие организмов, в т.ч. растений, могут вносить механизмы регуляции экспрессии генов, опосредованные длинными некодирующими РНК (днРНК). С целью идентификации днРНК, экспрессирующихся на ранних стадиях развития (10-ый день после цветения) зерновки тритикале нами было проведено прямое нанопоровое секвенирование РНК. Путём биоинформатического анализа были идентифицированы 796 днРНК, в том числе не аннотированные ранее. Нами также были выявлены структурные вариации в виде инсерций и делеций в 8 генах днРНК среди 23 образцов коллекции тритикале.

Ключевые слова: тритикале, длинные некодирующие РНК, онтогенез зерновки, нанопоровое секвенирование

Тритикале имеет огромный потенциал для производства, однако к настоящему времени существует необходимость в исследованиях молекулярно-генетических основ регуляции формирования зерновки. У злаковых культур процесс формирования зерновки относится к наиболее перспективным для исследования, но в то же время характеризуется высокой сложностью и динамичностью. Известно, что на молекулярном уровне помимо структуры белок-кодирующих генов существенный вклад в рост и развитие организмов, в т.ч. растений, могут вносить эпигенетические пути регуляции. Многочисленными исследованиями было показано, что у растений днРНК могут регулировать сайленсинг генов, время цветения, репродукцию, реакцию на стресс [1-2]. Так, например, Madhawan et al. [3] был проведён анализ транскриптомных данных, соответствующих стадиям развития зерновки пшеницы (14 и 30 день после цветения), позволивший предположить о роли специфичных днРНК в биосинтезе устойчивого крахмала. Однако в настоящий момент не известно, какие типы днРНК экспрессируются на более ранних стадиях развития зерновки.

В нашей работе было проведено прямое нанопоровое секвенирование РНК зерновки тритикале на 10-ый день после цветения. Биоинформатический анализ полученных прочтений позволил идентифицировать 796 днРНК, кодируемых 780 локусами в субгеномах А (167 днРНК), В (212 днРНК) и R (410 днРНК). Обнаруженные днРНК экспрессировались на ранних стадиях развития зерновок тритикале, из которых 281 днРНК ранее не были аннотированы в субгеномах А и В. С использованием общедоступных

RNAseq данных пшеницы был произведен поиск днРНК, обладающих возможной специфической ролью во время разных стадий развития зерновок тритикале. Было обнаружено, что паттерн экспрессии идентифицированных днРНК является тканеспецифичным, причём почти половина днРНК демонстрирует максимальный уровень экспрессии во время развития зерновки.

Для валидации полученных данных были выбраны 16 днРНК, которые потенциально могли выполнять специфическую роль в регуляции развития зерновки, а также имели наибольшее покрытие. Анализ структурных вариаций генов днРНК среди сортообразцов коллекции яровой тритикале выявил инсерции и делеции в 8 генах днРНК у 23 образцов коллекции тритикале. Среди проанализированных генотипов линия С95 является наиболее вариабельной, ввиду наличия 6 нереперенсных аллелей. Полиморфизм (InDel размером 4-48 п.н.) был детектирован для 50 % (8) генов днРНК включая 3A17113Del (4 п.н.); 1A59 (12 п.н.); 6A12 (14 п.н.); 3B75 (28 п.н.); 7B70 (38 п.н.); 6A36075InDel (10 п.н.), делеции в размере 13 и 54 п.н. были отмечены в локусах 1A2828Ins и 3B61, соответственно.

В ходе данного исследования был выявлен уникальный набор днРНК, экспрессирующихся на ранних стадиях развития зерновки и полиморфизм для 50% генов днРНК у 23 образцов коллекции тритикале, что в дальнейшем может быть использовано для изучения их функционального потенциала и связи с фенотипическими вариациями у яровой тритикале.

Список литературы

1. Xuan H. et al. PLNlncRbase: a resource for experimentally identified lncRNAs in plants // *Gene*. 2015. Т. 573. №. 2. С. 328–332.

2. Jin J. et al. PLncDB V2. 0: a comprehensive encyclopedia of plant long noncoding RNAs // *Nucleic Acids Research*. 2021. Т. 49. №. D1. С. D1489-D1495.

3. Madhawan A. et al. Identification and characterization of long non-coding RNAs regulating resistant starch biosynthesis in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Genomics*. 2020. Т. 112. №. 5. С. 3065-3074.

SEARCH FOR NEW GENES EXPRESSED DURING SEED DEVELOPING BY NANOPORE SEQUENCING

Bolotina A.A.², Polkhovskaya E.S.¹, Dudnikov M.V.^{1,2}, Kirov I.V.^{1,2}

¹All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

The study of the principles and patterns of regulation of biological processes that determine practically significant features of agricultural crops is promising for plant breeding. At the molecular level, the mechanisms of gene expression regulation mediated by long non-coding RNA (lncRNA) play a significant role in the growth and development of organisms, incl. plants. To identify lncRNAs expressed in the early stages of triticale seed development (day 10 after flowering), we performed Nanopore direct RNA sequencing. Bioinformatics analysis showed that 796 lncRNAs are expressed, including previously unannotated. Structural variations (indels) in 8 lncRNA genes were also revealed among 23 samples of the triticale collection.

Keywords: triticale, long non-coding RNAs, seed ontogenesis, nanopore sequencing

Triticale has a huge production potential, but now there is a need to study the molecular genetic basis of the regulation of seed formation. In cereal crops, the process of cereal crops seed formation is one of the most promising for research, but at the same time it is characterized by high complexity and dynamism. It is well known that at the molecular level, epigenetic regulatory pathways can make a significant contribution to the regulation of the growth and development of organisms, incl. plants. Numerous studies have shown that lncRNAs in plants can regulate gene silencing, flowering time, reproduction, and response to stress. Recently, Madhawan et al. analyzed transcriptome data representing two stages of seed development (14- and

30-days post-flowering) and identified specific lncRNAs with a potential role in resistant starch biosynthesis. However, it is not currently known what types of lncRNA are expressed in the early stages of wheat seed development.

Here, using Nanopore direct RNA sequencing, we have identified hundreds of previously unknown lncRNAs that were expressed in the early stages of seed development. We also revealed polymorphism in 50% lncRNA genes in 23 samples of the triticale collection, which can be further used to study their functional potential and relationship with phenotypic variations in spring triticale.

УДК 575.117.2

ТРАНСКРИПТОМНЫЙ АНАЛИЗ РАСТЕНИЙ *VICIA CRASSA*, ПРОИЗРАСТАВШИХ НА ТЕРРИТОРИИ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Воронежская В.С., Подлущий М.С., Казакова Е.А., Шестерикова Е.М., Волкова П.Ю.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: voronezhskaya.vs@gmail.com

Проведена работа по сборке и анализу транскриптомов растений горошка мышиного *Vicia cracca*, собранных на территории хронического радиационного загрязнения в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: транскриптомный анализ, сборка *de novo*, немодельный организм, секвенирование РНК, хроническое облучение

Травянистые растения, произрастающие на территориях, загрязненных радионуклидами, являются перспективным объектом для изучения механизмов адаптации к многолетней антропогенной нагрузке. Транскриптомный анализ является одним из подходов к выявлению кандидатных генов, обуславливающих устойчивость растений к неблагоприятным условиям.

На территориях зоны отчуждения Чернобыльской АЭС произрастают популяции горошка мышиного (*Vicia cracca* L.). Это многолетнее травянистое растение семейства Бобовые, которое является ценной кормовой культурой, содержащей много белка. Используется для залужения неудобий и бросовых земель, а также для сенокосно-пастбищного использования.

Образцы растения были отобраны на территориях с различным уровнем радиационного загрязнения. Было выбрано два слабо загрязненных (контрольных) участка: Бабчин (поглощенная доза 0,29 мкГр/ч), Ломыш (поглощенная доза 0,27–0,61 мкГр/ч), и два участка с повышенным радиоактивным фоном: Кулажин (поглощенная доза 1,5–5,0 мкГр/ч) и Масаны (поглощенная доза 8,0 мкГр/ч).

Для анализа транскриптома отбирали три образца листьев *V. cracca*, каждый образец состоял из ткани листьев 3–5 растений. Образцы немедленно замораживали в жидком азоте и хранили в нем до анализа. Тотальную РНК выделяли из 100 мг листовой ткани с использованием GeneJET Plant RNA Purification Mini Kit (Thermo Fisher Scientific, США) по протоколу производителя. 12 образцов РНК были переданы в компанию ЗАО «Евроген» для выполнения секвенирования на приборе Illumina NovaSeq 6000 (США). Длина полученных парных прочтений составила 150 пар оснований (п.о.). Общее количество прочтений – 1 090 239 068 пар оснований (в среднем по 270 тыс. п.о. на одну биологическую и 45 тыс. п.о. на одну техническую повторность).

Для анализа транскриптомных данных было необходимо провести оценку качества полученных прочтений: оценить качество прочтений в формате phred 33, GC-состав и загрязнение техническими последовательностями. Оценка качества была выполнена с использованием программного обеспечения FastQC v.0.11.9 и MultiQC v.1.10.

В результате было обнаружено загрязнение техническими последовательностями, падение качества конца прочтений, а также большая разница в уровнях содержания нуклеотидов на начальном участке прочтения (выше 20 %). Чтобы добиться

удовлетворительного качества полученных прочтений было использовано программное обеспечение Trimmomatic v.0.40 [1]. Очистка парных прочтений осуществлялась с применением следующих параметров: удаление адаптеров Illumina (ILLUMINACLIP:TruSeq3-PE.fa:2:30:10), первых 11 п.о. (HEADCROP:11), удаление оснований низкого качества из начала и конца прочтения (LEADING:3 TRAILING:3), применение метода скользящего окна (SLIDINGWINDOW:4:20), режима мягкого устранения ошибочных оснований (MAXINFO:130:1) и минимальную длину прочтений в 50 пар (MINLEN:50). В результате сохранилась в среднем половина парных прочтений и половина непарных «правых» (forward reads). До 10 % п.о. в каждом образце было триммировано.

Сборка транскриптома по референсным последовательностям близкородственных видов (*Vicia faba*, *Vicia sativa*) оказалась неэффективной – наблюдался малый процент выравнивания. В настоящий момент проводится сборка транскриптома *de novo*, используя ассемблер Trinity v.2.9.1 [2] на бесплатной открытой платформе Galaxy/Europe [3]. Для этого была выполнена нормализация парных и непарных прочтений *in silico*, чтобы упростить задачу алгоритма. Непарные прочтения были присоединены к «левым» парным прочтениям. На конференции будет представлен анализ дифференциальной экспрессии генов с использованием сборки *de novo* в качестве референсной.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-74-10004).

Список литературы

1. Bolger A.M., Lohse M., Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data // Bioinformatics. 2014. Т. 30. Trimmomatic. N 15. С. 2114–2120.
2. Grabherr M.G., Haas B.J., Yassour M. et al. Full-length transcriptome assembly from RNA-Seq data without a reference genome // Nature Biotechnology. 2011. Vol. 29. No. 7. P. 644–652.
3. Jalili V., Afgan E., Gu Q. et al. The Galaxy platform for accessible, reproducible and collaborative biomedical analyses: 2020 update // Nucleic Acids Research. 2020. Т. 48. The Galaxy platform for accessible, reproducible and collaborative biomedical analyses. N 14. С. 8205–8207.

TRANSCRIPTOMIC ANALYSIS OF VICIA CRACCA PLANTS GROWING ON THE TERRITORY OF CHRONIC RADIATION POLLUTION

Voronezhskaya V.S., Podlutskii M.S., Kazakova E.A., Shesterikova E.M., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Assembly and analysis of transcriptomes of *Vicia cracca* plants collected in the territory of chronic radiation contamination of the Chernobyl exclusion zone.

Keywords: transcriptomic analysis, de novo assembly, non-model organism, RNA sequencing, chronic irradiation

УДК 58.083

PREPARATION OF RECOMBINANT ALPHA-HEMOLYSIN STAPHYLOCOCCUS AUREUS

Jamgochian H.H.

Russian State Agrarian University of Agriculture K. A. Timiryazev,
127550 Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russian Federation
e-mail: hamesdja22@gmail.com

This work is devoted to the development of methods for obtaining recombinant alpha-hemolysin *Staphylococcus aureus*. In accordance with the chosen topic, an analysis of the literature of both domestic and foreign sources was carried out. The literature review presents a detailed description and mechanism of action of alpha-hemolysin, its role in the pathogenesis of diseases associated with *S. aureus* approaches to the development of vaccines based on alpha-hemolysin. The review includes drawings and diagrams, which makes the presented materials more informative. The experimental part includes the use of modern high-tech methods, such as genetic engineering (obtaining vectors for the expression of the target product), microbiological (cultivation of *E. coli* M15 strains), biochemical (isolation and purification of alpha-hemolysin protein). The specific activity of recombinant alpha-hemolysin was evaluated by *in vitro* (on rabbit erythrocytes) and *in vivo* (on laboratory mice) methods. The results include sections devoted to individual research tasks, the preparation of the plasmid construction of the *hla* gene, the expression of the recombinant pTZ57R-*hla* construct, the preparation, purification and study of the specificity of the recombinant alpha-hemolysin protein.

Keywords: *Staphylococcus aureus*, alpha-hemolysin, *hla* gene, pTZ57R, cloning, pQE-30 plasmid, recombinant protein, mouse

Introduction

In the structure of diseases caused by conditionally pathogenic bacteria, *Staphylococcus aureus* occupies about 50 %. Staphylococcal infection is one of the causes of endocarditis, peritonitis, pneumonia, mastitis, keratitis and sepsis. The introduction of antibiotics into the practice of healthcare has led to a temporary decrease in morbidity. However, the emergence of multi-drug resistance with the formation of so-called methicillin-resistant strains has returned this indicator to its previous level, which makes it expedient to develop anti-staphylococcal vaccines and immunoglobulins. Alpha-hemolysin is one of the main factors of *S. aureus* pathogenicity and has high immunogenic activity. Therefore, it is used for the development of protective immunity and the production of specific immunoglobulins. The most effective method for obtaining this

antigen is to create its recombinant form using a bacterial producer based on *Escherichia coli*.

The purpose of the work

Cloning of the gene encoding *S. aureus* alpha-hemolysin and obtaining the corresponding recombinant protein.

Materials and methods

The *hla* gene encoding the alpha-hemolysin protein was obtained by PCR using *S. aureus* FDA 209-P (ATCC 6538-P) genomic DNA as a matrix. The following primers were used for PCR: for forward primer: 5'-GGA TCC GCA GAT TCT GAT ATT AAT ATT AAA ACC G and for reverse primer: 5'-AAG CTT AAT TTG TCA TTT CTT CTT TTT CCC AAT C.

The straight primer corresponded to the beginning of the *hla* gene and included an additional restriction site *Bam*HI, and the reverse primer was complementary to the nucleotides flanking the end of the *hla* gene and included an additional restriction site *Hind*III. The amplified *hla* gene was cloned using the InsT/Aclone PCR Product Cloning Kit (Fermentas). As a result, it was embedded in the pTZ57R plasmid. The selection of recombinant clones was carried out by restriction analysis and sequencing. Next, the cloned *hla* gene was embedded in the pQE-30 plasmid at the restriction sites

*Bam*HI and *Hind*III. The expression of the recombinant gene was carried out using IPTG in the strain *E. coli* M15. Proteins were analyzed in a 12% polyacrylamide gel using the Lammley method. The recombinant protein was purified in a column with Ni-sepharose in an 8 M buffer solution of urea. For dialysis, a 50 mM solution of Tris-HCl pH 9.0 was used. The activity of recombinant alpha-hemolysin was evaluated *in vitro* on rabbit erythrocytes and *in vivo* on white mongrel mice weighing 14-16 g, injecting the drug intraperitoneally.

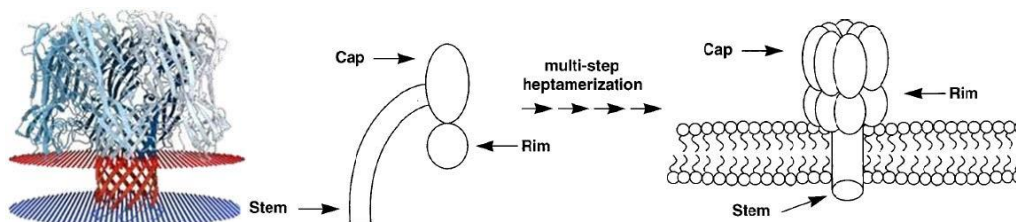


Fig. 1. *S. aureus* alpha-hemolysin protein (molecular weight 35 kDa) and pattern of pore formation

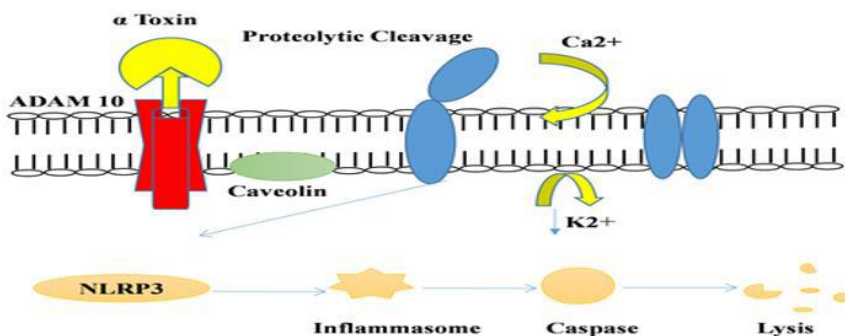


Fig. 2. The figure shows a diagram of the formation of pores in the cell membrane by cytolysin toxins. The rim domain of the toxin adheres to the membrane, and the intertwined regions of the trunk are responsible for the formation of a pore with an exclusion radius of 14 Å

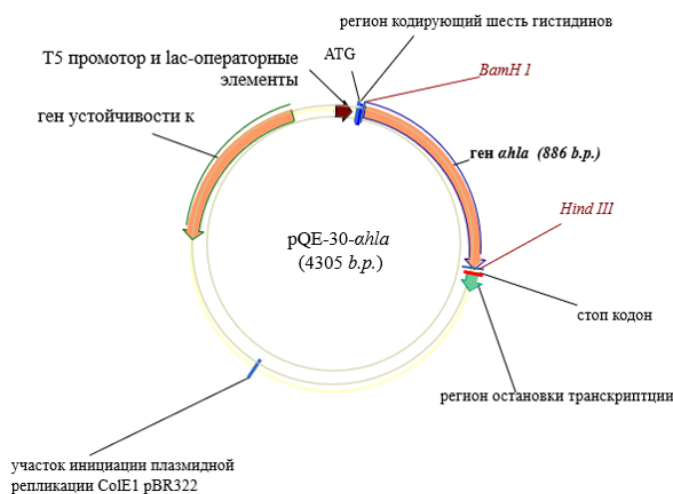


Fig. 3. Scheme of genetic engineering design for the production of recombinant alpha-hemolysin protein in *E. coli* cells (strain M15). The selection of recombinant clones was carried out by restriction analysis and sequencing. The cloned *hla* gene was embedded in the pQE-30 plasmid at the restriction sites *Bam*HI and *Hind*III. (Vector construction, author's scheme)

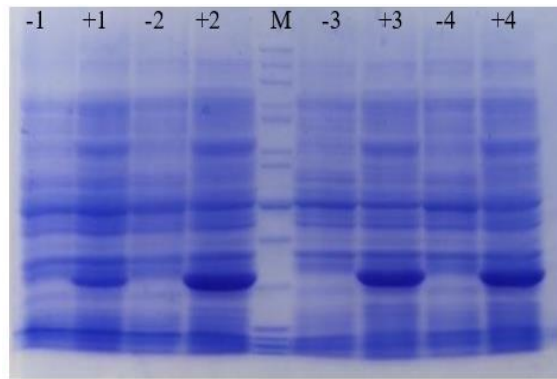


Fig. 4. Analysis of protein products derived from *hla* gene expression by Polyacrylamide gel 12% by the Lamley method (SDS-PAGE painted Coomassie R250). (+) producer proteins with induction, (-) Progenitor proteins without induction

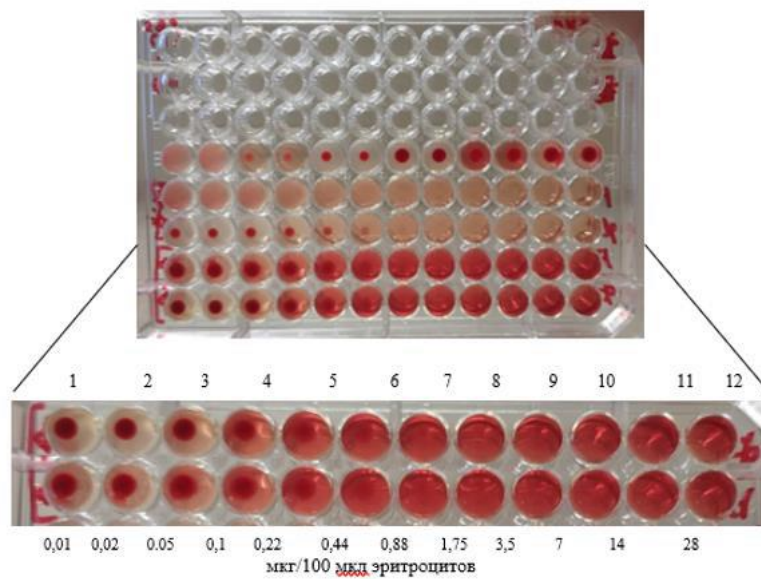


Fig. 5. Lysis of rabbit erythrocytes by recombinant alpha-hemolysin *in vitro*



Fig. 6. Condition of mice one week after intraperitoneal injection of recombinant alpha-hemolysin

Results

As a result of restriction analysis and sequencing of recombinant constructs, the cloning of the *hla* gene was confirmed, and its sequence turned out to be identical to four of the twelve reference sequences from the GenBank database (CP020741, NBSI01000003, CP019563, MTFQ01000004), which were used for the selection of primers. As a result of the expression of the *hla* gene embedded in the plasmid vector pQE-30 under the control of the modified prokaryotic promoter T5, a recombinant protein was synthesized. Electrophoresis in polyacrylamide gel showed that its size was about 35 kDa, which corresponded to the calculated data – 34.7 kDa. This recombinant protein was successfully chromatographically purified and used to evaluate its functional activity. It was shown that recombinant protein in the amount of 0.88 mcg effectively destroyed rabbit erythrocytes obtained from 50 ml of whole blood. Recombinant alpha-hemolysin was administered intraperitoneally to mice. After administration of the drug in the first week, depression of the vital activity of animals was observed with the manifestation of disheveled, lethargy, extensive ulcers on the skin and diarrhea.

Conclusion

As a result of the study, a functionally active recombinant alpha-hemolysin was obtained, which can later be used in the development of staphylococcal toxoid.

References

1. Bhakdi S., Trantum-Jensen J. Alpha-toxin of *Staphylococcus aureus* // Microbiol. Rev. 1991. 55. 4. 733–751.
2. Essmann F., Bantel H., Totzke G. et al. *Staphylococcus aureus* alpha-toxin-induced cell death: predominant necrosis despite apoptotic caspase activation // Cell Death Differ. 2003. 10. 11. 1260–1272.
3. Onogawa T. Staphylococcal alpha-toxin synergistically enhances inflammation caused by bacterial components // FEMS Immunol. Med. Microbiol. 2002. 33. 1. 15–21.
4. Gray G.S., Kehoe M. Primary sequence of the α -toxin gene from *Staphylococcus aureus* Wood 46 // Infect. Immun. 1984. 46:615–618.
5. O'Reilly M., Kreiswirth B.N., Foster T. J. Molecular analysis of a nonexpressed α -toxin gene (*hla*) of clinical isolates of *Staphylococcus aureus*, 1990. p. 439–443. In R. P. Novick (ed.), Molecular biology of the staphylococci. VCH Publishers Inc, New York, N.Y.
6. Bernheimer, A. W., and L. L. Schwartz. Isolation and composition of staphylococcal alpha toxin // J. Gen. Microbiol. 1963. 30:455.
7. Harshman S., Sugg N., Cassidy P. Preparation and purification of staphylococcal alpha toxin // Methods Enzymol. 1988. 165:3–7.
8. Valeva A., Palmer M., Bhakdi S. Staphylococcal exotoxin: formation of the heptameric pore is cooperative and proceeds through multiple intermediate stages // Biochemistry. 1997. 36:13298–13304.
9. Ohlsen K., Koller K.P., Hacker J. Analysis of expression of the alpha-toxin gene (*hla*) of *Staphylococcus aureus* by using a chromosomally encoded *hla*:lacZ gene fusion // Infect. Immun. 1997. 65:3606–3614.
10. Divyakolu S. et al. Hemolysins of *Staphylococcus aureus*—An Update on Their Biology, Role in Pathogenesis and as Targets for Anti-Virulence Therapy // Advances in Infectious Diseases. 2019. 9. 80–104, <http://www.scirp.org/journal/aid>
11. Oganesyan V. et al. Mechanisms of neutralization of a human anti- α -toxin antibody // J. Biol. Chem. American Society for Biochemistry and Molecular Biology Inc. 2014. Vol. 289, no. 43. pp. 29874–29880.
12. Bhakdi S. et al. Staphylococcal alpha-toxin, streptolysin-O, and Escherichia coli hemolysin: prototypes of pore-forming bacterial cytolysins // Arch Microbiol. 1996. 165, 73–79.
13. Sucharit Bhakdil, Jogdep Trantum-Jensen. Alpha-Toxin of *Staphylococcus aureus* 1991 // American Society for Microbiology 1991, p. 733–751.
14. Bhakdi, S., Bayley, H., Valeva, A. et al. Staphylococcal alpha-toxin, streptolysin-O, and Escherichia coli hemolysin: prototypes of pore-forming bacterial cytolysins // Arch Microbiol 165. 73–79 (1996).
15. Bryan J Berube, Juliane Bubeck Wardenburg, *Staphylococcus aureus* α -Toxin: Nearly a Century of Intrigue. 2013 Jun. 5(6):1140-66.
16. Malachowa N., DeLeo FR. Mobile genetic elements of *Staphylococcus aureus* // Cell Mol Life Sci. 2010. 67 (18):3057–3071.
17. Langley R., Patel D., Jackson N. et al. Staphylococcal superantigen super-domains in immune evasion // Crit Rev Immunol. 2010. 30(2):149–165.
18. Nguyen M.T., Kraft B., Yu W. et al. The nuSaalpha Specific Lipoprotein Like Cluster (lpl) of *S. aureus* USA300 Contributes to Immune Stimulation and Invasion in Human Cells PLoS Pathog. 2015;11(6): e1004984.
19. Cheung G.Y.C., Bae J.S., Otto M. Pathogenicity and virulence of *Staphylococcus aureus* // Virulence. Taylor & Francis. 2021. Vol. 12, no. 1. pp. 547–569.
20. Kailasan S., Kort. T., Mukherjee I. et al. Rational design of toxoid vaccine candidates for *Staphylococcus aureus* leukocidin AB (LukAB) // Toxins (Basel). 2019. 11:339, doi: 10.3390/toxins11060339.

ПРЕДВОСХИЩАЯ БУДУЩЕЕ ГЕННОЙ ИНЖЕНЕРИИ И РАДИОБИОЛОГИИ: 100 ЛЕТ СО ДНЯ НАЧАЛА НАУЧНОЙ РАБОТЫ Н.В. ТИМОФЕЕВА- РЕСОВСКОГО

Клабуков И.Д., Якимова А.О., Барановский Д.С., Красильникова О.А., Иванов С.А.,
Шегай П.В., Каприн А.Д.

ФГБУ НМИЦ радиологии Минздрава России,
249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4, Российская Федерация
e-mail: ilya.klabukov@gmail.com

2021 год ознаменовался знаменательной датой – 100 лет назад блестящий радиобиолог и генетик Н.В. Тимофеев-Ресовский начал свою научную работу. Среди новых направлений, разработанных им с 1921 по 1981 год, были физическая биология, основные принципы генной инженерии, принцип усилителя и популяционная радиобиология. Многие из его идей были развиты в возглавляемом им Отделе радиационной генетики и общей радиобиологии ИМП АН СССР в городе Обнинске - прародителе Экспериментального сектора МРНЦ им. А.Ф. Цыба. Наша работа раскрывает взаимосвязи работ Тимофеева-Ресовского с деятельностью его современников и продуктивными идеями сегодняшнего дня.

Ключевые слова: *генная инженерия, Обнинск, радиобиология, радиорезистентность, Тимофеев-Ресовский*

В 2021 году исполнилось 100 лет с момента начала научной работы великого радиобиолога и генетика Н.В. Тимофеева-Ресовского. Среди новых направлений, разрабатываемых им с 1921 по 1981 годы, были физическая биология, базовые принципы генетической инженерии, принцип усилителя, популяционная радиобиология и другие. Примечательно, что многие из его идей были развиты в возглавляемом им Отделе радиационной генетики и общей радиобиологии ИМП АН СССР в городе Обнинске - прародителе Экспериментального сектора МРНЦ им. А.Ф. Цыба.

В нашей работе мы провели систематизацию наследия Н.В. Тимофеева-Ресовского, воспользовавшись его собственными представлениями о четырех уровнях строения и изучения живых организмов: первый – молекулярно-генетический уровень, второй – уровень онтогенетический, третий – популяционно-эволюционный и четвертый – биосферно-биогеоценотический уровень. В рамках данных четырех уровней впервые выделены такие новые научные идеи, как физический подход к биологии; количественная радиобиология; биологические аспекты самоорганизации живых систем; синтетическая теория эволюции и генетическая инженерия; кибернетические биосистемы и многоуровневая организация живых машин; генетически и фенотипически обусловленная радиорезистентность; индивидуальная норма и влияние эпигенетики на развитие фенотипа; экспосом человека, биосфера и биогеноценоз (Рисунок 1).

Примечательно, что творческий вклад Николая Владимировича не ограничивался рамками его лаборатории. Напротив, неукротимый и пылкий творческий ум требовал расширения научных контактов с лучшими мировыми лабораториями, с биологами, физиками, химиками из институтов Советского Союза, Германии, Англии и США. В нашей работе раскрывается связь творчества Н.В. Тимофеева-Ресовского с работами его современников и плодотворными идеями современности (Рисунок 2).

Сегодня не только идеи Н.В. Тимофеева-Ресовского нашли свое развитие: принцип организации научной работы “*нельзя заниматься наукой со звериной серьёзностью*” и талант человеческого общения, которые привлекали и меняли людей вокруг него, способствовали формированию важной для научной работы гуманитарной оболочки - его *научной школы радиационной генетики*.

Символично, что в 2021 году команда Обнинского филиала МИФИ под научным руководством сотрудников НМИЦ радиологии завоевала бронзовую медаль на международном конкурсе по инженерной биологии iGEM-2021 с проектом по созданию синтетической микробиоты для стимулирования радиорезистентности и предотвращения развития лучевой болезни. Подобный синтез идей генной инженерии, радиобиологии и освоения космического пространства возможен исключительно в сотрудничестве с ведущими российскими научными центрами.

Карта идей Н.В. Тимофеева-Ресовского

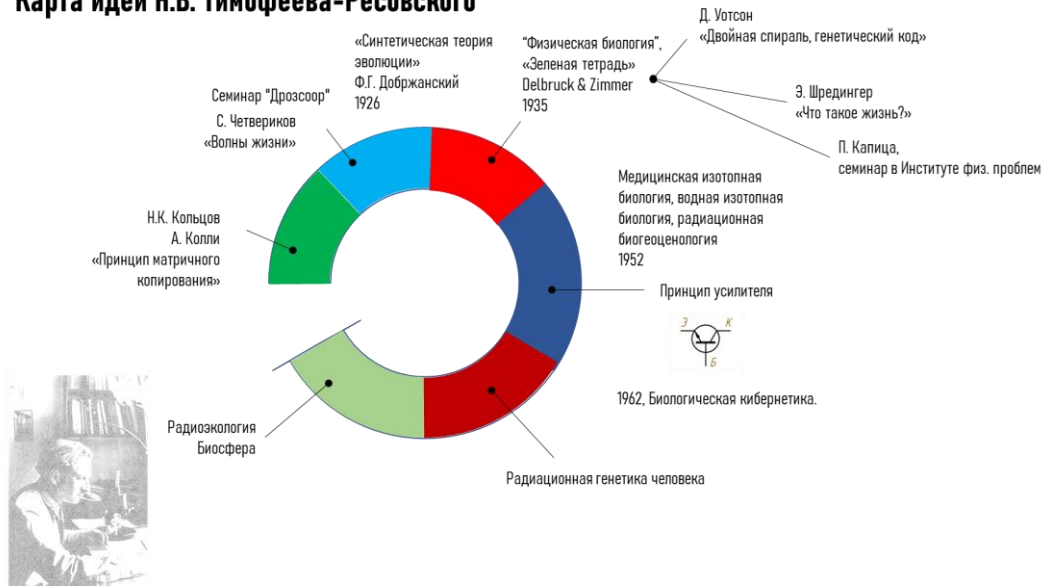


Рисунок 1. Карта идей Н.В. Тимофеева-Ресовского в области радиобиологии и радиационной генетики

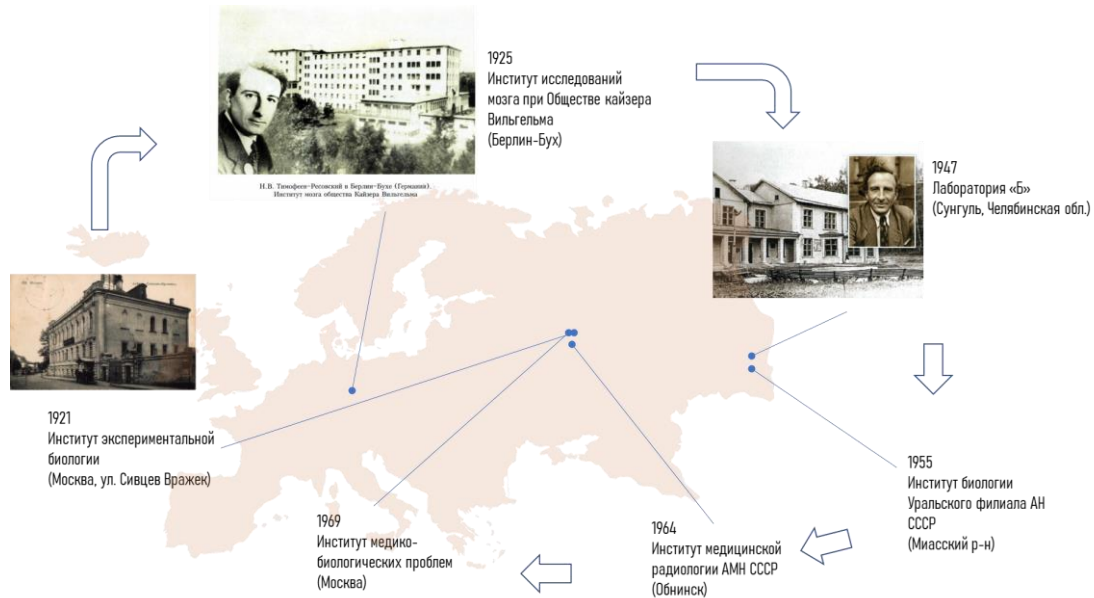


Рисунок 2. Карта-схема жизненного пути и организаций

FORESHADOWING THE FUTURE OF GENETIC ENGINEERING AND RADIOBIOLOGY: 100 YEARS FROM THE BEGINNING OF N.V. TIMOFEEFF-RESSOVSKY'S SCIENTIFIC WORK

Klabukov I.D., Yakimova A.O., Baranovsky D.S., Krasilnikova O.A., Ivanov S.A., Shegai P.V., Kaprin A.D.

National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of Russia, Obninsk, Russian Federation

The year 2021 was marked with a significant date - 100 years ago, brilliant radiobiologist and geneticist N.V. Timofeeff-Ressovsky started his scientific work. Among the new directions developed by him from 1921 to 1981 were physical biology, basic principles of genetic engineering, amplifier principle, and population radiobiology. It is noteworthy that many of his ideas were developed in the former Department of Radiation Genetics and General Radiobiology of the Institute of Medical Radiology in Obninsk then, which is now called the Experimental Sector of the A.F. Tsyb MRRC. Our work reveals the interconnections of Timofeeff-Ressovsky's works with the activities of his contemporaries and productive ideas of today.

Keywords: *genetic engineering, Obninsk, radiobiology, radioresistance, Timofeev-Ressovsky*

УДК 577.29

МЕТОДЫ АНАЛИЗА МОБИЛОМА РАСТЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Меркулов П.Ю., Константинов З.С., Власова А.В., Киров И.В.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии»

127550 г. Москва, ул. Тимирязевская 42, Российская Федерация

e-mail: paulmerkulov97@gmail.com

Мобильные элементы (транспозоны) представляют одну из движущих сил эволюции многих видов растений. Несмотря на важную роль транспозонов в биологии растений, динамика их мобилизации в растительных клетках остаётся малоизученной, так как значительная часть исследований посвящена изучению наследуемых инсерций. Детекция мобилизации транспозонов в реальном времени является необходимым этапом в решении задач по изучению динамики мобилома растений.

Ключевые слова: *мобилом, транспозоны, растения, нанопоровое секвенирование, методы*

В геномах растений, в особенности сельскохозяйственных, мобильные элементы (транспозоны) выступают как один из основных структурных компонентов. Многочисленными исследованиями продемонстрировано активное участие в создании генетического разнообразия, эволюции и адаптации видов [1, 2]. Однако изучение динамики формирования мобилома растений долгое время не было возможным ввиду следующих трудностей: (1) высокая повторяемость последовательностей мобильных элементов; (2) немногие мобильные элементы сохранили способность к транспозиции; (3) наследование и закрепление в потомстве новых инсерций является редким событием ввиду действия многоуровневой системы сайленсинга мобильных элементов. В последнее время были предприняты попытки преодолеть существующие трудности и разработать новые методы и инструменты для обнаружения активных транспозонов и их мобилизации в реальном времени.

Для детекции мобилизации в реальном времени существует ряд методов, основанных на амплификации линейных и кольцевых форм внехромосомных ДНК транспозонов (англ. eсlDNA и ессDNA соответственно). Метод SIRT (англ. Sequence-independent Retrotransposon Trapping) предполагает выявление eсlDNA транспозонов путём лигирования к ним адаптеров и последующую амплификацию. Однако, использование данного метода требует предварительных знаний о последовательностях активных элементов, а также затруднительно в случае анализа

больших геномов. Более чувствительный метод ALE-seq (англ. amplification of LTR extrachromosomal DNA followed by sequencing) не требует предварительных знаний о последовательности мобильных элементов, однако позволяет амплифицировать только 5'-конец транспозонов. Информацию о полной последовательности мобилизующихся транспозонов можно получить при помощи метода mobilome-seq, предполагающего удаление линейной геномной ДНК, дальнейшую амплификацию реакцией по типу катящегося кольца и секвенирование амплифицированной ессDNA.

Достаточной чувствительностью для детекции соматических инсерций транспозонов обладают такие методы, как капельная цифровая ПЦР (кцПЦР) и нанопоровое секвенирование. С помощью кцПЦР возможно определить изменения копийности транспозонов, однако не представляется возможности установить положение новых инсерций в геноме. Нанопоровое секвенирование в свою очередь позволяет определить место новых инсерций в геноме, однако при изучении растений с большим геномом или популяции возникает необходимость проводить полногеномное секвенирование, что является затратным. Для преодоления трудностей в решении подобных задач не так давно был использован метод CANS (англ. Cas9-mediated adaptor ligation and long-read sequencing) с целью Cas9-направленного нанопорового секвенирования мест инсерций мобильных элементов в геноме.

В заключении, методологические достижения в исследованиях транспозонов в значительной степени способствовали пониманию жизненного цикла и роли транспозонов и в перспективе смогут позволить расширить наши знания о динамике формирования мобилома.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-64-00076.

Список литературы

1. Domínguez M., Dugas E., Benchouaia M. et al. The impact of transposable elements on tomato diversity // Nat Commun. 2020. Vol. 11. № 1. P. 4058.

2. Cai X., Lin R., Liang J. et al. Transposable element insertion: a hidden major source of domesticated phenotypic variation in *Brassica rapa* // Plant Biotechnol J. 2022. Vol. 20. № 7. PP. 1298-1310.

3. Kirov I., Merkulov P., Gvaramiya S. et al. Illuminating the plant transposon insertion landscape in real time using Cas9-targeted Nanopore sequencing and a novel pipeline // bioRxiv 2021.06.11.448052.

METHODS FOR PLANT MOBILOME ANALYSIS IN REAL TIME

Merkulov P.Yu., Konstantinov Z.S., Vlasova A.V., Kirov I.V.

All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

Mobile elements (transposons) are powerful drivers of evolution of many plant species. Despite the important role of transposons in plant biology, the dynamics of their mobilization in plant cells remains poorly understood, since most studies are devoted to the analysis of only heritable inserts. Real-time detection of transposon mobilization is an important step in solving problems of the dynamics of plant mobilome dynamics.

Keywords: mobilome, transposons, plants, nanopore sequencing, molecular methods

In plant genomes, especially crops, transposable elements (transposons) act as one of the main structural components. Numerous studies have demonstrated active participation in the creation of genetic diversity, evolution and adaptation of species. Recently, attempts have been made to overcome the existing difficulties and develop new methods and tools for the detection of active transposons and their mobilization in real time.

For real-time detection of mobilization, there are a number of methods based on the amplification of linear

and circular forms of extrachromosomal DNA of transposons (ecDNA and eccDNA, respectively). Sufficient sensitivity for the detection of somatic insertions of transposons is possessed by such methods as droplet digital PCR (ddPCR) and nanopore sequencing, including the CANS method (Cas9-mediated adapter ligation and long-read sequencing). In conclusion, new molecular approaches and methods have greatly contributed to the understanding of the life cycle and the role of transposons and may expand our knowledge of the dynamics of mobilome formation in the future.

УДК 636.3:612.32:579.25:57.088.7

ОЦЕНКА МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ МИКРОБИОМА РУБЦА ОВЕЦ НА ФОНЕ ПРИМЕНЕНИЯ АСКОРБАТА ЛИТИЯ

Остренко К.С.¹, Колоскова Е.М.¹, Лаптев Г.Ю.²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста

249013 Калужская область, г. Боровск, Российская Федерация

²ООО «Биотроф», Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: ostrenkoks@gmail.com

От состояния рубца и пищеварения в кишечнике напрямую зависят здоровье и продуктивность жвачных животных. Нормальная микрофлора защищает организм от патогенных микробов, стимулирует иммунную систему, участвует в метаболических реакциях и играет важную роль в энергетическом обмене. Состав микробиоты рубца овец-ярок, содержащихся в условиях вивария, определяли методом секвенирования NGS. Всего было выявлено 37 филумов, 76 классов, 98 порядков, 225 семейств и 894 вида микроорганизмов. Было установлено, что введение аскорбата лития в дозе 10 мг/кг живой массы в основной рацион овец способствовало увеличению доли

целлюлозолитических бактерий с $(73,6 \pm 1,6) \%$ до $(75,4 \pm 0,9) \%$. Количество патогенных бактерий снижалось от 2,7 % у овец контрольной группы до 1,6 % у животных опытной группы, при этом содержание полезных бацилл увеличилось от 0,3 % до 0,5 % соответственно. У овец опытной группы снизилось содержание нежелательной и условно-патогенной микрофлоры. Полученные данные подтверждают положительное влияние адаптогена аскорбата лития, введенного в рацион в дозировке 10 мг / кг живой массы, на качественный и количественный состав микробиоты рубца овец.

Ключевые слова: микробиота, аскорбат лития, овцы, рубец, NGS-секвенирование

Введение

Здоровье и продуктивность жвачных животных напрямую связаны с состоянием рубцового и кишечного пищеварения. Рубец крупного рогатого скота и мелких жвачных животных - сложная симбиотическая экосистема, состоящая из бактерий, простейших, грибов и архей, представленных огромным разнообразием видов. В рубце расщепляется до 60 % клетчатки, около 95 % легкопереваримых углеводов, 60–80 % белка кормов. Наряду с полезными, в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) уживаются условно-патогенные и патогенные микроорганизмы (МО) [1]. Видовой состав МО рубца меняется при смене рационов, стрессах различной этиологии, условий содержания, состояния здоровья животных [2]. Соответственно, нарушение ранней бактериальной колонизации или микробиологии кишечника, нарушения микробиома у сформировавшегося организма могут спровоцировать и вызывать множество заболеваний, например – ожирение, заболевания иммунной системы, болезни системы кровообращения, воспалительные заболевания кишечника, онкологию [3], диарею, кишечные колики, бронхиальную астму, синдром раздраженного кишечника и др. Кишечный микробиом, ранее рассматривавшийся как часть двухкомпонентной кишечно-мозговой оси (коммуникативной системы, обеспечивающей сложное функционирование ЦНС и ЖКТ), является полноправным звеном «микробиом-кишечно-мозговой оси» («microbiome-gut-brain axis») [4]. Данная система включает нервные, иммунные, эндокринные и паракринные механизмы. Между стрессом, иммунитетом и кишечной микробиотой существует тесная взаимосвязь. Стресс оказывает значительное влияние на изменение бактериального баланса кишечника, что в свою очередь влияет на иммунитет. Стресс влияет на увеличения проницаемости кишечного эпителия, что может быть связано как с самим кишечником, так и с сигналами, исходящими из головного мозга [5]. Технологические стрессы, промышленные яды, применение химиопрепаратов, пестицидов, высокая концентрация поголовья на ограниченных территориях, особенно в условиях стойлового содержания животных, нарушение технологии кормления и содержания, неполноценные и несбалансированные рационы кормления, применение кормовых антибиотиков приводят к нарушению микрофлоры кишечника и возникновению стресса.

Методы изучения микробиоты. В отличие от классических методов изучения микроорганизмов

(микроскопия, культивирование на питательных средах, биохимические) современные методы молекулярно-генетического анализа NGS позволяют без стадии культивирования изучить практически 100% популяции МО и получить полный профиль биологического разнообразия. Основным объектом метагеномных исследований является ген 16S рРНК, кодирующий 16S рибосомную РНК - маркер для идентификации микроорганизмов [6].

Молекулярно-генетические исследования, в отличие от традиционных посевов на питательные среды, дают возможность выявлять статистически значимые различия в составе микробиома рубца жвачных разного возраста, уровня продуктивности и здоровья [8].

Для исследования микробиома рубца интенсивно используется NGS-анализ [9].

Материалы и методы исследований

Эксперимент проводили на овцах романовской породы в возрасте 18–24 месяцев на базе вивария ВНИИФБиП животных. Было сформировано 2 группы животных (опытная и контрольная группы) по 8 голов в каждой, по принципу парных аналогов. Все подопытные животные содержались в одном помещении.

Органическую соль лития вводили в основной рацион, начиная с первого дня исследования, в дозировке 10 мг/кг живой массы. Продолжительность эксперимента составила 60 дней.

Тотальную бактериальную ДНК из исследуемых образцов выделяли с использованием набора «Genomic DNA Purification Kit». Для проведения молекулярно-генетических исследований точную концентрацию выделенной ДНК определяли с помощью флуориметра Qubit («Invitrogen, Inc.», США) с использованием наборов «Quant-iT dsDNA Broad-Range Assay Kit» («Invitrogen, Inc.», США). Амплификацию для последующего проведения NGS-секвенирования осуществляли с использованием ДНК-амплификатора Verity («Life Technologies, Inc.», США) с помощью зубактериальных праймеров (IDT), 343F (5'-CTCCTACGGRRSGCAGCAG-3') и 806R (5'-GGACTACNVGGGTWTCTAAT-3'), фланкирующих переменный участок V1V3 гена 16S рРНК. Метагеномное секвенирование было осуществлено в ООО «Биотроф» на геномном секвенаторе MiSeq («Illumina, Inc.», США) с набором MiSeq Reagent Kit v3 («Illumina, Inc.», США). Определение таксономической принадлежности микроорганизмов до рода проводили с

применением программы RDP Classifier (<https://rdp.cme.msu.edu/classifier/classifier.jsp>).

Результаты и их обсуждение

Таксономическая иерархия микроорганизмов рубца овец, основанная на результатах NGS секвенирования, представлена следующими результатами. Основными обнаруженными доменами являлись *Bacteria* (бактерии) – (95,66±0,52) % от общего числа МО) и *Archaea* (археобактерии) – (0,18±0,05) %. Микробиота рубца овец была представлена 37 филумами (типами) бактерий, из них 8 – с долей более 1 % от общего числа микроорганизмов. Доминирующими

филумами были *Bacteroidetes* (53–60 %) и *Firmicutes* (24–29 %) (рис. 1А). Филум *Bacteroidetes* был представлен в основном классом *Bacteroidia* (около 55 % от общего количества МО). Микроорганизмы филума *Firmicutes* в рубце овец были представлены преимущественно классами *Clostridia* (около 20 %), *Bacilli* (1%) (рис.1В). Всего в содержимом рубца овец было обнаружено 76 классов бактерий (10 из них с долей выше 1 %, 98 порядков бактерий (7 порядков – с долей более 1 %, главные из которых - *Bacteroidales* – 55% и *Clostridiales* – до 20 %), идентифицировано 225 семейств микроорганизмов. В целом было определено 894 вида микроорганизмов, большинство из которых - некультивируемы.

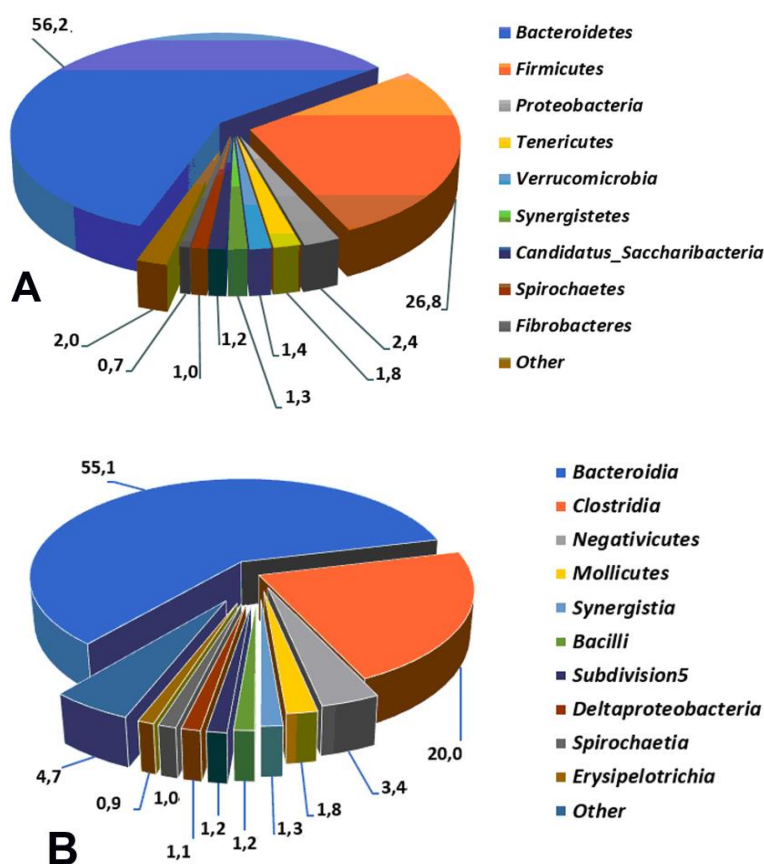


Рисунок 1. Основные филумы (А) и классы (В) микробиоты рубца овец (% содержания от общего количества микроорганизмов). Показаны первые 10 самых крупных из обнаруженных филумов и классов

Целлюлозолитические бактерии, расщепляющие клетчатку растительных кормов до летучих жирных кислот, являются доминирующими бактериями рубца мелких и крупных жвачных животных. Общая доля целлюлозолитических бактерий в тотальной рубцовой микробиоте у овец контрольной и опытной групп была высокой: 73,6 % и 75,4 % соответственно. В содержимом рубца изученных овец они были представлены бактериями семейств *Ruminococcaceae* (11–12 %), *Lachnospiraceae*, *Clostridiaceae*, *Eubacteriaceae*, *Thermoanaerobacteraceae* филума *Firmicutes*, *Prevotellaceae* (32-37 %) и *Flavobacteriaceae* филума

Bacteroidetes (табл.1). Кроме того, нормальная микрофлора рубцового содержимого овец была представлена лактат-утилизирующими (ЛЖК-синтезирующими) бактериями (*Veillonellaceae*), ферментирующими молочную кислоту до летучих жирных кислот, используемыми организмом в метаболических процессах. Их содержание в рубце исследованных овец было 2,7 % и 2,3 % у овец контрольной и опытной группы. Полезные бифидобактерии (*Bifidobacteriales*) в пробах рубцового содержимого овец отсутствовали у 43 % исследованных проб, составляя в остальных до 0,005 %. Суммарная доля

бацилл в пробах рубцового содержимого овец опытной группы была достоверно выше, чем у овец контрольной группы (0,52 % против 0,31 %).

Увеличение долей нежелательной, условно-патогенной и патогенной микрофлоры в симбионтном сообществе рубца напрямую взаимосвязано со снижением уровня продуктивности и состоянием здоровья животных. Лактобактерии, ферментирующие моносахара до молочной кислоты, относятся к нежелательной микрофлоре рубца: в результате их избыточного содержания (выше 1 % для коров в период сухостоя) происходит значительное понижение pH рубцовой жидкости, что негативно сказывается на ферментативной активности целлюлозолитических бактерий.

У клинически здоровых животных в рубце, помимо представителей нормальной микрофлоры, в небольших количествах выявляются возбудители различных заболеваний. В образцах рубцового содержимого овец контрольной и опытной групп было обнаружено более 50 видов патогенных микроорганизмов. Доминировали 3 группы патогенов: микоплазмы, трепонемы и стрептококки, доля которых, тем не менее, была невысокой. В незначительных количествах были обнаружены моракселлы, псевдомонады, стафилококки, сукцинивибрио, эризипелотрикссы и хольдемании.

Общее содержание условно-патогенной и патогенной микрофлоры было незначительным в рубце у животных обеих групп. Однако, по сравнению с контрольной группой, суммарное содержание патогенов у животных опытной группы было достоверно ниже (1,58 % против 2,65 %), что свидетельствует о положительном влиянии аскорбата лития на качественный состав микробиоты.

Выводы

В настоящем исследовании при использовании NGS впервые изучено влияние адаптогена аскорбата лития на бактериальное сообщество рубца овец-ярок романовской породы. Введение органической соли лития в состав основного рациона в дозировке 10 мг/кг живой массы способствовало усилению процессов ферментации в рубце, достоверному росту целлюлозолитической активности, снижению

суммарной доли патогенных и доли некоторых условно-патогенных микроорганизмов в рубцовом содержимом. Полученные данные свидетельствуют о благотворном влиянии введения аскорбата лития в качестве добавки к основному рациону на состав микробиоты рубца овец.

Список литературы

1. Сенчук И.В. Диагностика нарушений рубцового пищеварения у овец // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2019. Т. 180. № 17. С. 156-163.

2. Glassner K.L., Abraham B.P., Quigley E.M.M. The microbiome and inflammatory bowel disease // J Allergy Clin Immunol. 2020. Vol.145, N 1. P.16-27. doi: 10.1016/j.jaci.2019.11.003.

3. Олескин А.В., Шендеров Б.А. Пробиотики, психобиотики и метабиотики: проблемы и перспективы // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2020. № 2 (3). С. 233–243. DOI: 10.36425/rehab25811

4. Ажмулдинов Е.А., Тутов М.Г., Кузаев М.А. и др. Воздействие теплового стресса на микробиоту кишечника // Животноводство и кормопроизводство. 2019. № 102(4). С. 163–173. <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-teplovogo-stressa-na-mikrobiotu-kishechnika>

5. Wang L., Zhang K., Zhang C. et al. Dynamics and stabilization of the rumen microbiome in yearling Tibetan sheep // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, N 1. Article 19620. DOI: 10.1038/s41598-019-56206-3

6. Qin J., Li R., Raes J., Arumugam M. et al. A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing // Nature. 2010. Vol.464. N 7285. P. 59-65. DOI: 10.1038/nature08821

7. Quince C., Walker A.W., Simpson J.T. et al. Shotgun metagenomics, from sampling to analysis // Nat. Biotechnol/ 2017. Vol. 35. N 9. P. 833–844. DOI: 10.1038/nbt.3935

8. Лантев Г.Ю., Новикова Н.И., Ильина Л.А. и др. Нормы содержания микрофлоры в рубце крупного рогатого скота // Методические рекомендации. С-Пб: БИОТРОФ. 2014. 32 С.

EVALUATION OF THE SHEEP RUMEN MICROBIOTA BY MOLECULAR GENETIC METHODS AGAINST THE BACKGROUND OF THE USE OF LITHIUM ASCORBATE

Ostrenko K.S.¹, Koloskova E.M.¹, Laptev G. Yu.²

¹ All-Russian Research Institute of Physiology, Biochemistry and Animal Nutrition – Branch of the Federal Science Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Borovsk, Kaluga Region, Russian Federation

²“BIOTROF” Ltd 19, St. Petersburg, Russian Federation

The health and productivity of ruminants directly depend on the state of the rumen and digestion in the intestinal tract. Normal microflora protects the organism from pathogenic microbes, stimulates the immune system, participates in metabolic reactions and plays an important role in energy metabolism. The composition of the microbiota of the rumen of young sheep contained in vivarium conditions was determined by NGS sequencing. In total, 37 phylums, 76 classes, 98 orders, 225 families and 894 species of microorganisms were identified. It was found that the introduction of lithium ascorbate at a dose of 10 mg / kg of live weight into the main diet of sheep contributed to an increase in the proportion of cellulolytic bacteria from (73.6±1.6) % to (75.4±0.9) %. The number of pathogenic bacteria decreased from 2.7 % in sheep of the control group to 1.6% in animals of the experimental group, while the content of beneficial bacilli increased from 0.3 % to 0.5 %, respectively. The content of undesirable and conditionally pathogenic microflora decreased in the sheep of the experimental group. The obtained data confirm the positive effect of the adaptogen lithium ascorbate, introduced into the diet at a dosage of 10 mg / kg of live weight, on the qualitative and quantitative composition of the microbiota of sheep rumen.

Keywords: *microbiota, lithium ascorbate, sheep, rumen, NGS sequencing*

УДК 539.1.047:539.16.04:58.01/07:57.033:57.084.1:57.088.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИЙ СТРЕССОВЫХ МЕТАБОЛИТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ СОРТОВ ФОКС 1 И ЛЕОН В ОТВЕТ НА НИЗКОДОЗОВОЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ

Пишенин И.А., Ханова А.С., Блинова Я.А., Смирнова А.С., Подобед М.Ю., Шестерикова Е.М., Горбатова И.В., Лыченкова М.А., Казакова Е.А., Волкова П.Ю.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: Pishenin.Ivan@gmail.com*

Воздействие малых доз γ -излучения на семена сельскохозяйственных культур в ряде случаев приводит к стимуляции роста и увеличению массы растений. Изучение изменений метаболических путей в ответ на различные воздействия окружающей среды может быть ключом к созданию стрессоустойчивых растений. В предыдущей работе было проведено гамма-облучение семян девяти сортов озимого и ярового ячменя селекции ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской». Морфометрический анализ длины и массы корней и побегов проростков позволил установить зависимость действия излучения на исследуемые показатели сортов и провести их последующую градацию в зависимости от величины радиобиологического эффекта. Были выявлены контрастные по чувствительности к дозе 20 Гр сорта озимого и ярового ячменя, из которых сорта Фокс 1 со стимулирующим эффектом и Леон с ингибирующим эффектом были выбраны для данной работы. Разработан метод определения концентрации целевых метаболитов с использованием системы ВЭЖХ. Сравнение с контрольной группой показало изменения концентраций метаболитов, связанных со стрессовой реакцией растений, сигнальными путями, регуляторными и транспортными функциями в ответ на низкодозовое облучение.

Ключевые слова: *метаболизм, аминокислоты, γ -облучение, низкие дозы, стимуляция, ингибирование*

Низкодозовое γ -облучение семян перед посевом ведет к целому ряду положительных эффектов, таких как увеличение биомассы, ускорение прорастания и развития растения, улучшение иммунного ответа и сопротивления стрессорам [1–3]. Изучение изменений в метаболических путях после низкодозового γ -облучения семян сельскохозяйственных культур позволяет определить вероятные детерминанты эффекта гормезиса, которые могут быть использованы для получения продуктивных и стрессоустойчивых сельскохозяйственных культур.

В данном эксперименте было изучено содержание следующих протеиногенных аминокислот: лизин, аланин, аргинин, метионин, глутамин. Анализ выполнен на двух сортах ячменя обыкновенного (*Hordeum*

vulgare L.): Фокс 1 и Леон, которые в результате ранее проведенных исследований [6] показали стимулирующее и ингибирующее воздействие низкодозового γ -облучения соответственно. Облучение семян производилось при помощи уникальной научной установки «ГУР-120», ФГБНУ ВНИИРАЭ (источник – ^{60}Co). Помещенные в пластиковые зип-пакеты семена были облучены в дозе 20 Гр (при мощности дозы 60 Гр/час). Необлученные семена каждого сорта были использованы в качестве контроля. Семена были посажены в горшки с землей и выращивались в теплице ФГБНУ ВНИИРАЭ. Через семь дней проросшие побеги и корни были отобраны для анализа (по 1 грамму биомассы корней и побегов с каждого горшка, соответственно), и помещены в жидкий азот.

Для качественного и количественного анализа использовался высокоэффективный жидкостной хроматограф LC30 Nexera с диодно-матричным детектором SPDМ20А. Для анализа использовалась обратно-фазовая колонка С18 Nanosphere Eco 80 ODS-1. Стандартные образцы исследуемых метаболитов, фенилизотиоцианат, триэтиламин были закуплены в компании Sigma-Aldrich. Все реагенты являются особо чистыми (HPLC grade). Вода получена методом обратноосмотической дистилляции. Далее была проведена реакция дериватизации в присутствии триэтиламина и фенилизотиоцианата, которая длилась 1

час при температуре 4 °С. Дериватизированные и недериватизированные экстракты были пропущены через SPE колонки ISOLUTE C18. Для ВЭЖХ-анализа использовали 10 мкл полученного раствора [4].

Оба исследуемые сорта ячменя характеризовались различными концентрациями целевых метаболитов в ответ на радиационное воздействие. Отношения изменения концентраций исследуемых метаболитов в побегах облученных растений относительно необлученных представлены в таблице 1, аналогичные данные для корней представлены в таблице 2.

Таблица 1

Отношение содержания метаболитов в побегах облученных растений ячменя двух сортов к контрольным образцам

	Лизин	Аланин	Аргинин	Метионин	Глутамин
Фокс 1	1.52	87.3	3.15	8.91	1.03
Леон	1.11	0.56	0.3	0.67	1.58

Таблица 2

Отношение содержания метаболитов в корнях облученных растений ячменя разных сортов к контрольным образцам

	Лизин	Аланин	Аргинин	Метионин	Глутамин
Фокс 1	0.9	1.54	1.01	0.09	0.45
Леон	2.78	1.55	3.81	1.82	1.23

Примечание: в таблицах 1 и 2 жирным выделены значимые ($p < 0.05$, U-тест Манна-Уитни) изменения концентраций метаболитов облученных растений относительно контроля.

В результате проведенного исследования были выявлены некоторые закономерности в изменении концентрации стрессовых метаболитов в корнях и побегах проростков ячменя. Содержание аланина и аргинина в проростках сорта озимого ячменя Фокс 1 было значимо увеличено по сравнению с контрольными образцами, в 87 раз для аланина и почти в 3 раза для аргинина, что согласуется с данными, полученными нами ранее [5]. В то же время, содержание лизина и аланина в корнях γ -ингибированного сорта Леон было статистически значимо увеличено в 2,78 и 1,55 раз соответственно. Дальнейшее исследование требуются для определения роли аргинина, аланина и лизина в модуляции процессов роста в контрастных по радиочувствительности сортах ячменя.

Список литературы

1. Volkova P.Y., Duarte G.T., Soubigou-Taconnat L. et al. Early response of barley embryos to low- and high-dose gamma irradiation of seeds triggers changes in the transcriptional profile and an increase in hydrogen peroxide content in seedlings // J Agro Crop Sci. 2020. 206. P. 277–295. doi:10.1111/jac.12381.
2. Araújo S. de S., Paparella S., Dondi D. et al. Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and

Challenges in Seed Technology // Front. Plant Sci. 2016. P. 7. doi:10.3389/fpls.2016.00646.

3. Gudkov S.V., Grinberg M.A., Sukhov V., Vodeneev V. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants. Journal of Environmental Radioactivity. 2019. 202. 8–24. doi:10.1016/j.jenvrad.2019.02.001.

4. Битаршвили С.В., Волкова П.Ю., Гераськин С.А. Влияние γ -облучения семян на фитогормональный статус проростков ячменя // Физиология растений 2018. Т. 65. № 3. С. 223–231.

5. Pishenin I., Gorbatova I., Kazakova E. et al. Free Amino Acids and Methylglyoxal as Players in the Radiation Hormesis Effect after Low-Dose γ -Irradiation of Barley Seeds. Agriculture. 2021. 11. 918. https://doi.org/10.3390/agriculture11110918.

6. Казакова Е.А., Макаренко Е.С., Подлуцкий М.С. и др. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфо-логического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян // Зерновое хозяйство России. 2020. № 2. С. 23–28. https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONCENTRATIONS OF STRESS METABOLITES IN BARLEY SPROUTS OF FOKS 1 AND LEON VARIETIES IN RESPONSE TO LOW-DOSE GAMMA IRRADIATION

Pishenin I.A., Khanova A.S., Blinova Ya.A., Smirnova A.S., Podobed M.Yu., Shesterikova E.M., Gorbatova I.V., Lychenkova M.A., Kazakova E.A., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The impact of low doses of γ -radiation on seeds of crops in some cases leads to growth stimulation and an increase in plant weight. Studying the changes in metabolic pathways in response to various environmental impacts may be the key to creating stress-tolerant plants. The previous work included gamma irradiation of seeds of nine varieties of winter and spring barley bred by the Agricultural Research Center "Donskoy". Morphometric analysis of the length and weight of the roots and shoots of seedlings made it possible to establish the dependence of the effect of radiation on the studied parameters of varieties and to carry out their subsequent gradation depending on the magnitude of the radiobiological effect. The authors identified varieties of winter and spring barley contrasting in sensitivity to a dose of 20 Gy; varieties Fox 1 having a stimulating effect and Leon having an inhibitory effect were selected for this work. A method has been developed for determining the concentration of target metabolites using an HPLC system. The comparison with the control group showed changes in the concentrations of metabolites associated with the stress response of plants, signalling pathways, and regulatory and transport functions in response to low-dose irradiation.

Keywords: *metabolome, amino acids, γ -irradiation, low doses, stimulation, inhibition*

УДК 575.117.2

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРАНСКРИПТОМА *HORDEUM VULGARE* L. ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Подлущий М.С.¹, Празян А.А.¹, Волкова П.Ю.², Шестерикова Е.М.¹, Казакова Е.А.¹, Сабуров В.О.³, Моисеев А.С.³, Казаков Е.И.³, Сабитов А.Б.³

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: mikhail.podlutskii@gmail.com

² Независимый исследователь, 2440, провинция Антверпене, г. Гел, Бельгия
e-mail: volkova.obninsk@gmail.com

³ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба
249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 4, Российская Федерация

В данной работе представлены предварительные данные об особенностях транскриптома *Hordeum vulgare* L. после воздействия на проростки различными видами ионизирующих излучений.

Ключевые слова: *транскриптомный анализ, выделение и секвенирование РНК, дифференциальная экспрессия генов, γ -излучение, облучение протонами, облучение нейтронами, облучение электронами*

Облучение индуцирует стрессовый ответ в растениях, который существенно влияет на биохимические и физиологические процессы и сопровождается изменениями профиля экспрессии генов и системы внутри- и межклеточного сигналинга. Однако до сих пор существует значительный пробел в понимании механизмов действия нелетальных доз ионизирующих излучений на молекулярные, биохимические и физиологические процессы, формирующие основу

для проявления эффекта облучения на организменном уровне. Разнообразие реакций растений на облучение открывает перспективы использования разных видов излучений в практических целях, в частности, в активно развивающихся в последнее время радиационных технологиях [1].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали оригинальные семена *Hordeum vulgare* L. сорта Фокс 1 (озимый ячмень). Данный сорт ячменя востребован в сельскохозяйственном производстве, поскольку обладает высокой пластичностью и способен эффективно использовать активную инсоляцию и фотосинтетические ресурсы (даже в условиях острой засухи). Также известно, что γ -излучение оказывает стимулирующее действие на морфологические показатели проростков Фокс 1 после облучения семян [2].

Семена высаживали в пластмассовые вегетационные сосуды. Предварительно в каждый сосуд помещали слой керамзита таким образом, чтобы полностью покрыть дно, и сверху накрывали его двумя слоями марли. На технических весах взвешивали 120 г почвы «Волшебная грядка» (Россия) и аккуратно переносили в подготовленные ранее горшки. В полученные вегетационные сосуды высевали по 5 семян, используя трафарет и ручку препаровальной иглы для углубления семян в почву (глубина посева – 2 см). После посадки в каждый сосуд добавляли 50 мл дистиллированной воды и помещали в фитотрон. Всего было использовано 20 вегетационных сосудов: 4 контрольных сосуда и по 4 сосуда для каждого вида ионизирующего излучения (γ -излучение, электроны, протоны, нейтроны).

Облучение проводили на 7-й день после посадки на базе МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

Источником γ -излучения (поглощенная доза для проростков ячменя составила 15 Гр) являлась установка «Агат» (Россия) с изотопом ^{60}Co . Горшки были установлены в радиационном поле $12 \times 12 \text{ см}^2$ так, чтобы в зону облучения попадали и побеги, и корневая система. Расстояние от выходного окна радиационной головки до объекта облучения равнялось 10 см.

Источником электронного излучения (поглощенная доза – 15 Гр) являлся терапевтический интраоперационный линейный ускоритель электронов NOVAC11 (Италия). Горшки были установлены в пучке электронов образом, чтобы в зону облучения попадали и побеги, и корневая система.

Облучение нейтронами (поглощенная доза – 5 Гр) проводили на стенде с нейтронным генератором НГ-14 (Россия), устанавливая две емкости с биологическими объектами друг напротив друга. Расстояние от источника нейтронов до барицентра проростка *H. vulgare* L. составляло 4,75 см.

Облучение протонами (поглощенная доза – 15 Гр) проводили на комплексе протонной терапии «Прометеус» (Россия). Биологические объекты устанавливали в изокентр установки напротив друг друга. Облучение проводили на начальной фазе кривой Брэгга.

По истечении 24 часов после облучения проростки *H. vulgare* L. замораживали в жидком азоте для последующего выделения РНК с использованием специализированного набора GeneJet Plant RNA Purification Mini Kit (Thermo Fisher Scientific, США) по

протоколу производителя [3]. Полученные образцы РНК были переданы в компанию ЗАО «Евроген» для последующего выполнения секвенирования парных прочтений (*Paired-end Sequencing*) на приборе Illumina NovaSeq 6000 (США) в трех повторностях для всех исследуемых условий. В результате секвенирования было получено 2 574 183 012 прочтений.

Первичная фильтрация и определение принадлежности полученных прочтений к определенному организму была выполнена при помощи *fastq-screen v.0.15.2* путем сопоставления с небольшим рядом эталонных последовательностей (адаптеры и векторы) и геномов (*Mus musculus*, *Homo sapiens*, *Rattus norvegicus*, *Escherichia coli*, *Hordeum vulgare Morexv3*, *Hordeum vulgare GoldenPromise*, *Arabidopsis thaliana*). Качество полученных прочтений для каждого образца оценивали при помощи *fastqc v.0.11.8* и *multiqc v.1.13*.

По результатам анализа качества подбирали параметры для дальнейшего триммирования полученных данных с помощью *trimomatic v.0.39*. Очистка выполнялась в режиме парных прочтений (*paired end mode*) с использованием основных терминальных параметров: *ILLUMINACLIP* – поиск и удаление заданных последовательностей адаптеров, *HEADCROP* – удаление определенного количества пар оснований с начала каждого прочтения, *SLIDINGWINDOW* – фильтрация и удаление прочтений методом «скользящего окна», чьи уровни качества ниже заданных пороговых значений и *MINLEN* – фильтрация прочтений по заданной минимальной длине.

Для выравнивания и сопоставления полученных очищенных прочтений на эталонные геномы (*Hordeum vulgare Morexv3* и *Hordeum vulgare GoldenPromise*) [4] использовали стандартное программное обеспечение *hisat2 v.2.1* и *bwa v.0.7.17* с включенным дополнительным выравниванием, необходимым для правильной работы специализированных сборщиков транскриптов. По результатам выравнивания было установлено, что только 50–60 % исходных прочтений картируются на референсные геномы, что являлось неудовлетворительным показателем для дальнейшей обработки полученных результатов.

Для анализа транскриптома без использования референсных геномов была выполнена количественная оценка уровня экспрессии на основе псевдовыравнивания на транскриптом ячменя *BaRTv2.18* [5] при помощи программного пакета *kallisto v.0.48.0*. В качестве количественной меры экспрессии транскриптов использовали показатель TPM (*transcripts per million*).

Анализ дифференциальной экспрессии генов выполняли с использованием программного пакета *DESeq2*, алгоритмы которого позволяют обрабатывать значения TPM, полученные при выполнении псевдовыравнивания с помощью *kallisto*. Воздействие различными видами излучений (протоны, электроны, нейтроны и гамма) использовали в качестве исследуемого экспериментального фактора сравнения (*factor*), на основе которого формировали четыре

группы (*factor name*), которые и сравнивали с показателями TPM, полученными для необлученных растений *H. vulgare* L.

Дифференциальную экспрессию генов представляли в виде логарифма кратного изменения (\log_2FC). Повышенным считался уровень экспрессии $\log_2FC \geq 1$, пониженным – $\log_2FC \leq -1$. Принятый уровень статистической значимости для полученных результатов анализа с учетом FDR составил 0,05.

Основные результаты

При анализе проростков *H. vulgare* L., подвергшихся воздействию γ -излучения, были обнаружены 119 дифференциально экспрессируемых генов (ДЭГ): 104 гена с повышенной экспрессией (*BaRT2v18chr1HG036030* – лакказа, *BaRT2v18chr6HG306790* – серин/треонин-протеинкиназа FLS2 растительного типа и *BaRT2v18chr2HG108330* характеризовались максимальным уровнем \log_2FC) и 15 генов с пониженной экспрессией (*BaRT2v18chr7HG379560* – предполагаемая серин/треонин-протеинкиназа, подобная липофориновому рецептору, *BaRT2v18chr3HG146800* – белок, родственник триптофанаминотрансферазе и *BaRT2v18chr5HG254230* характеризовались минимальным уровнем логарифма кратного изменения).

В проростках *H. vulgare* L., подвергшихся воздействию электронов, были выявлены 484 ДЭГ. Из 428 генов, характеризующихся повышенной экспрессией, *BaRT2v18chr1HG043690* (рибосомный белок L35A), *BaRT2v18chr7HG341910* (пектинэстераза) и *BaRT2v18chr5HG221430* (неизвестный белок) имели самые высокие значения \log_2FC – 2,91, 2,8 и 2,87 соответственно. Из 56 генов с пониженной экспрессией минимальные значения логарифма кратного изменения составили -2,72, -2,51 и -2,37 и относились к генам *BaRT2v18chr2HG065610* (неизвестный белок), *BaRT2v18chrUnG392650* (неизвестный белок) и *BaRT2v18chr3HG153740* (глицерофосфодиэфирфосфодиэстераза).

Для проростков ячменя обыкновенного, подвергшихся воздействию нейтронов, было обнаружено 178 ДЭГ: 93 гена с повышенной экспрессией и 85 генов с пониженной экспрессией. *BaRT2v18chrUnG391890* (неизвестный белок), *BaRT2v18chr2HG061030* (неизвестный белок) и *BaRT2v18chr1HG005570* (неизвестный белок) описывались максимальными уровням логарифма кратного изменения – 2,20, 2,01 и 1,85 соответственно. Минимальные уровни \log_2FC составили -2,63, -2,01 и -1,93

и относились к *BaRT2v18chr5HG268350* (неизвестный белок), *BaRT2v18chr5HG247860* (неизвестный белок) и *BaRT2v18chr1HG039240* (тирозин/3,4-дигидрокси-фенилаланин декарбоксилаза 2).

Для проростков *H. vulgare* L., подвергшихся воздействию протонами, было выявлено 409 ДЭГ. Из 338 генов, характеризующихся повышенной экспрессией, *BaRT2v18chrUnG391890* (неизвестный белок), *BaRT2v18chr4HG206760* (неизвестный белок) и *BaRT2v18chr1HG017920* (неизвестный белок) описывались самым высокими уровнями \log_2FC – 5,32, 2,72 и 2,70 соответственно. Из 71 генов с пониженной экспрессией минимальные уровни \log_2FC составили -4,18, -3,20 и -2,82 и относились к генам *BaRT2v18chrUnG389090* (неизвестный белок), *BaRT2v18chr6HG295600* (неизвестный белок) и *BaRT2v18chr3HG153740* (глицерофосфодиэфирфосфодиэстераза).

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-1068 от 28.09.2021)

Список литературы

1. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. (ред.) Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ. 2015. С. 87–92.
2. Казакова Е.А., Макаренко Е.С., Подлуцкий М.С. и др. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян // Зерновое хозяйство России. 2020. № 2. С. 23–28. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28>
3. Product Information/ Thermo Scientific GeneJET Plant RNA Purification Mini Kit #K0801, #K0802 [Электронный ресурс] // ThermoFisher Scientific URL: https://tools.thermofisher.com/content/sfs/manuals/MAN0012668_GeneJET_Plant_RNA_Purification_UG.pdf (дата обращения: 15.08.2022)
4. *Hordeum vulgare*. Genome assembly [Электронный ресурс] // EnsemblPlants URL: <http://ftp.ensemblgenomes.org/pub/plants/release-54/fasta/> (дата обращения: 01.08.2022)
5. Barley Reference Transcript (BaRTv2.18) Dataset [Электронный ресурс] // The James Hutton Institute URL: https://ics.hutton.ac.uk/barleyrtd/bart_v2_18.html (дата обращения: 04.08.2022)

THE TRANSCRIPTOMIC STUDY OF *HORDEUM VULGARE* L. AFTER EXPOSURE TO DIFFERENT TYPES OF IONIZING RADIATION

Podlutskii M.S.¹, Prazyan A.A.¹, Volkova P.Yu.², Shesterikova E.M.¹, Kazakova E.A.¹, Saburov V.O.³, Moiseev A.S.³, Kazakov E.I.³, Sabitov A.B.³

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

² Independent Researcher, Geel, Belgium

³ National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russian Federation

The work provides preliminary information on the transcriptomic analysis of *Hordeum vulgare* L. after exposure to different types of ionizing radiation.

Keywords: transcriptome analysis, RNA isolation and sequencing, differential gene expression, γ -radiation, proton irradiation, neutron irradiation, electron irradiation

Total RNA was extracted with a GeneJet Plant RNA Purification Mini Kit (USA). All further sample preparation for Illumina Sequencing (poly(A) enrichment and synthesis of cDNA with random primers) was performed by Evrogen company (Russia). The pool of DNA libraries was sequenced on an Illumina NovaSeq 6000.

The highest number of differentially expressed genes (DEGs) were identified for the *Hordeum vulgare* L. after exposure to electron irradiation, with 484 genes in total. Of those, 428 were upregulated and 56 were downregulated. The most upregulated genes included BaRT2v18chr1HG043690 (ribosomal protein L35A), BaRT2v18chr7HG341910 (pectinesterase) and BaRT2v18chr5HG221430 (unknown protein), and the most downregulated ones included BaRT2v18chr2HG065610 (unknown protein), BaRT2v18chrUnG392650 (unknown protein) and

BaRT2v18chr3HG153740 (glycerophosphodiester phosphodiesterase).

409 DEGs were identified for the *Hordeum vulgare* L. after exposure to proton irradiation, with 338 upregulated and 71 downregulated. The most upregulated genes included BaRT2v18chrUnG391890 (unknown protein), BaRT2v18chr4HG206760 (unknown protein) и BaRT2v18chr1HG017920 (unknown protein). The strongest repression levels were observed for BaRT2v18chrUnG389090 (unknown protein), BaRT2v18chr6HG295600 (unknown protein) и BaRT2v18chr3HG153740 (glycerophosphodiester phosphodiesterase).

Significantly fewer DEGs were identified for the *Hordeum vulgare* L. after exposure to γ -radiation (119 genes in total, 104 were upregulated, 15 were downregulated) and neutron irradiation (178 genes in total, with 93 upregulated and 85 downregulated).

УДК 577.29

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕАННОТИРОВАННЫХ ГЕНОВ РАЗВИТИЯ ЗЕРНОВКИ С ПОМОЩЬЮ НАНОПОРОВОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Полховская Е.С.¹, Болотина А.А.², Дудников М.В.^{1,2}, Соловьев А.А.^{1,3}, Киров И.В.^{1,2}

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии» 127550 г. Москва, ул. Тимирязевская 42, Российская Федерация

e-mail: eynzeynkreyu@gmail.com

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Российская Федерация

³ ФГБНУ Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Москва, Российская Федерация

Длинные некодирующие РНК (днРНК) играют важную роль в регуляции роста и развития растений. Регуляторная роль днРНК в развитие зерновки злаковых культур, включая пшеницу и тритикале, остается слабо изученной. В данном исследовании было проведено нанопоровое секвенирование РНК и кДНК развивающейся зерновки тритикале на 10, 20 и 30 день после цветения. Сборка транскриптома и биоинформатический анализ выявили 796 днРНК, большинство из которых ранее не были аннотированы в геномах ржи и пшеницы. Дальнейший анализ позволил определить полиморфные сайты целевых генов в коллекции тритикале.

Ключевые слова: длинные некодирующие РНК (днРНК), развивающаяся зерновка, Нанопоровое секвенирование, тритикале

Современные исследования показывают, что функциональная роль днРНК выходит за рамки транскрипционного шума, и появляется все больше информации о том, что днРНК играют важную роль в разнообразных биологических процессах у эукариот. Широко продемонстрировано, что геномы высших эукариот могут транскрибировать огромное количество нкРНК, которые выполняют незаменимые регуляторные функции в эпигенетическом контроле траекторий развития [1, 2]. нкРНК можно классифицировать на малые РНК, нкРНК среднего размера и длинные нкРНК на основе их размера.

Длинная нкРНК (днРНК) определяется как транскрипты с размером более 200 п.н. и не имеющие заметного кодирующего потенциала [3], которые далее могут быть классифицированы как длинные межгенные нкРНК (lincRNAs), интронные нкРНК (incRNAs), смысловые днРНК и естественные антисмысловые транскрипты (NATs), транскрибируемые из комплементарной цепи ДНК ассоциированных генов [4].

Как правило, днРНК функционирует либо как цис-, либо как транс-элемент, воздействуя на соседние локусы или выполняя дистальный регуляторный эффект, в качестве усилителей, или в белковых комплексах для контроля экспрессии генов [5]. С развитием технологий секвенирования следующего поколения были проведены обширные исследования по общегеномной характеристике и функциональной валидации днРНК.

В растениях днРНК были функционально охарактеризованы как участвующие во множестве биологических процессов, таких как время цветения, половое размножение, органогенез корней, биотические и абиотические реакции на стресс [6, 7]. Например, в исследовании Сао Р. (2021) были идентифицированы 24 днРНК и их потенциальные регуляторные гены, как связанные с развитием колосьев на основе данных RNA-seq шести линий пшеницы [8].

Одновременно, по сравнению с человеком и другими модельными животными, биогенез, функция и эволюция днРНК в растениях, особенно тех, которые лежат в основе важных сельскохозяйственных признаков, недостаточно изучены. У злаковых культур наиболее перспективным для исследования является процесс формирования зерновки, но в то же время данный показатель характеризуется высокой сложностью и динамичностью. На сегодняшний момент имеется информация о транскриптомных изменениях во время развития зерна пшеницы и многие гены были аннотированы в пшенице, в то время как днРНК остаются неисследованными.

Сао Р. (2021) в своем исследовании на пшенице подчеркивает 2753 дифференциально экспрессируемых днРНК в шести тканях колоса, содержащих меристему соцветия, цветочную меристему, меристему колоска, зачаток чешуи, зачаток тычинки и пестика, демонстрируя регуляторные сети в развитии колоса пшеницы [8]. Хотя существует информация о многих исследованиях днРНК растений, было проведено мало исследований на яровой тритикале и ее днРНК,

связанных с урожайностью, развитием колоса и зерновок, особенно на популяционном транскриптоме, а не на индивидуальном уровне.

Нами проведено нанопоровое секвенирование для обнаружения днРНК, которые специфически экспрессируются на стадии клеточной пролиферации развития семян (10 день после цветения) в яровой тритикале. Было идентифицировано 796 днРНК тритикале, кодируемые 780 локусами в субгеномах А (167 днРНК), В (212 днРНК) и R (410 днРНК), причем большинство из них ранее не были аннотированы. днРНК также экспрессировались во время развития семян пшеницы и обладали высокой стадийной специфичностью. Для дальнейшего анализа были взяты днРНК субгеномов А и В и изучен полиморфизм их генов в коллекции тритикале. Для валидации полученных данных были выбраны 16 днРНК, для которых были разработаны специфичные пары праймеров, после чего проводилась ПЦР на геномной ДНК коллекционных образцов яровой тритикале. В ходе амплификации выявлены структурные вариации в виде инсерций и делеций в генах днРНК в 23 образцах коллекции тритикале. Анализа полиморфизма генов с помощью подобранных праймеров выявил 8 нереперенсных аллелей днРНК среди всей коллекции, из которой одна линия является наиболее вариативной.

Еще одним этапом исследования являлось выделение стабильной фракции суммарной РНК из зародыша и эндосперма развивающейся зерновки (10 и 20 день после цветения). Синтезированная при помощи набора MINT-Universal ("Евроген", Россия) суммарная двуцепочечная кДНК (дц-кДНК) далее подвергалась Нанопоровому секвенированию с использованием баркодирования, которое позволяет производить одновременный анализ всех образцов. Общая длина прочтений варьировалась от 514 Mb на 20 дне после цветения в зародыше до 1451 Mb на 10 дне после цветения в эндосперме.

Список литературы

1. Amaral P. et al. The eukaryotic genome as an RNA machine. *Science*. 2008;319(5871):1787–9.
2. Statello L. et al. Gene regulation by long non-coding RNAs and its biological functions. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2021;22(2):96–118.
3. Chekanova J. Long non-coding RNAs and their functions in plants. *Curr Opin Plant Biol*. 2015; 27:207–16
4. Liu X. et al. Long non-coding RNAs and their biological roles in plants. *Genomics Proteomics Bioinformatics*. 2015;13(3):137–47.
5. Quinn J., Chang H. Unique features of long non-coding RNA biogenesis and function. *Nat Rev Genet*. 2016;17(1):47–62.
6. Yu Y. et al. Plant Noncoding RNAs: Hidden Players in Development and Stress Responses. *Annu Rev Cell Dev Biol*. 2019; 35:407–431.

7. Jha U. et al. Long non-coding RNAs: emerging players regulating plant abiotic stress response and adaptation. *BMC Plant Biol.* 2020;20(1):466.

8. Cao P. et al. Genome-wide profiling of long noncoding RNAs involved in wheat spike development. *BMC Genomics.* 2021;22(1):493.

9. Kirov I. et al. Nanopore RNA sequencing revealed long non-coding and LTR retrotransposon-related RNAs expressed at early stages of triticale SEED development // *Plants.* – 2020. – Т. 9. – №. 12. – С. 1794.

IDENTIFICATION OF UNANNOTATED GRAIN DEVELOPING GENES BY NANOPORE SEQUENCING

Polkhovskaya E.S.¹, Bolotina A.A.², Dudnikov M.V.^{1,2}, Soloviev A.A.^{1,3}, Kirov I.V.^{1,2}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russian Federation

³N.V. Tsitsin Main Botanical Garden RAS, Moscow, Russian Federation

Long non-coding RNAs (lnc-RNAs) play an important role in the regulation of plant growth and development. Transcriptomic analyses revealed profiling of gene expression in the development of wheat ears, however, the possible regulatory role of lnc-RNAs in the morphogenesis of grain ears in general and triticale in particular remains largely unclear. In this study, Nanopore sequencing was performed, thanks to which it was possible to identify 796 lnc-RNAs, most of which had not previously been annotated in triticale. Further analysis made it possible to determine structural variations in the form of insertions and deletions in the triticale collection.

Keywords: long non-coding RNA (lnc-RNAs), developing grain, Nanopore sequencing, triticale

For a long time it was believed that lnc-RNAs do not go beyond transcriptional noise, but there is more and more information that lnc-RNAs play an important role in a variety of biological processes in eukaryotes. In plants, lncRNAs are functionally characterized as participating in a variety of biological processes, in general, and in the formation of the ear of grain crops, in particular. To date, transcriptomic changes during grain development have been well studied and many genes have been annotated in wheat, while the expressed lnc-RNAs remain unexplored.

In this study, Nanopore sequencing was performed to detect lnc-RNAs that are specifically expressed at the stage of cell proliferation of seed development (10 days after flowering) in spring triticale. 796 triticale lnc-RNAs encoded by 780 loci in subgenomes A (167 lnc-RNAs), B (212 lnc-RNAs) and R (410 lnc-RNAs) have been identified, and most of them have not been previously annotated. lnc-RNAs were also expressed during the development of wheat seeds and had high stage specificity. For further analysis, the lnc-RNAs of subgenomes A and B were taken and the polymorphism of

their genes in the triticale collection was studied. To validate the data obtained, 16 lnc-RNAs were selected, for which specific pairs of primers were developed, after which PCR was performed on the genomic DNA of spring triticale collection samples. The amplification revealed structural variations in the form of insertions and deletions in the lnc-RNAs genes in 23 samples of the triticale collection. Analysis of gene polymorphism using selected primers revealed 8 non-reference lnc-RNAs alleles among the entire collection, of which one line is the most variable.

Another stage of the study was the isolation of a stable fraction of total RNA from the embryo and endosperm of the developing grain (10 and 20 days after flowering). The total double-stranded cDNA (dc-cDNA) synthesized using the MINT-Universal kit (Eurogen, Russia) was further subjected to Nanopore sequencing using barcoding, which allows simultaneous analysis of all samples. The total length of readings ranged from 514 Mb on the 20 day after flowering in the embryo to 1451 Mb on the 10 day after flowering in the endosperm.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННОГО СЕЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПОВЫШЕНИЕ УРОЖАЙНОСТИ

Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Саакян С.Р., Дорошенко В.А., Саркисян Д.С., Золотов С.А.

Донской государственный технический университет
344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Российская Федерация
e-mail: sirunik.saakyan2016@yandex.ru

В статье рассмотрено влияние селекции на качество и адаптивность возделываемых культур. Дан анализ современного положения семеноводства в Российской Федерации, а также представлены методы оценки современного селекционного материала. Актуальность данной темы заключается в создании высокопродуктивных, устойчивых к болезням и вредителям сортов сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: селекция, зерно, адаптивность, зерновые культуры, генетика, сельское хозяйство, урожайность

Тенденции развития селекции и семеноводства в России

Россия – аграрная страна, и сельское хозяйство невозможно представить без качественных семян и сортового разнообразия, гарантированного селекцией и производством семян. Качество зерна риса

оказывает сильное влияние на конкурентоспособность на рынке, при этом внешний вид зерна играет все более важную роль с точки зрения потребителя.

Процент зарубежных гибридов, разрешенных к использованию на территории Российской Федерации, очень высок (рис. 1) [1].

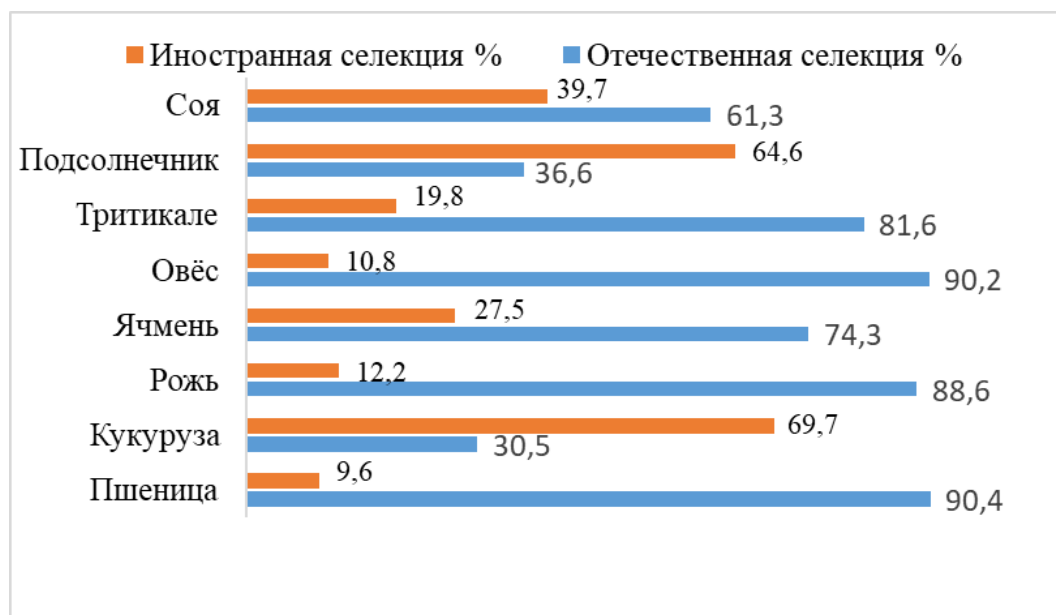


Рисунок 1. Доля сортов отечественной и иностранной селекции, допущенных к использованию в Российской Федерации

Для подсолнечника снизился процент одобренных отечественных сортов с 80 % до 36,6 %. Такое происходит по ряду причин: исключение сорта из реестра в связи с истечением срока регистрации; утрата хозяйственной полезности сорта, который не охраняется патентом и т.д. (рис. 2).

За последние 6 лет также можно отметить положительную динамику доли сортов национальной селекции, зарегистрированных в национальных реестрах (рис. 3).

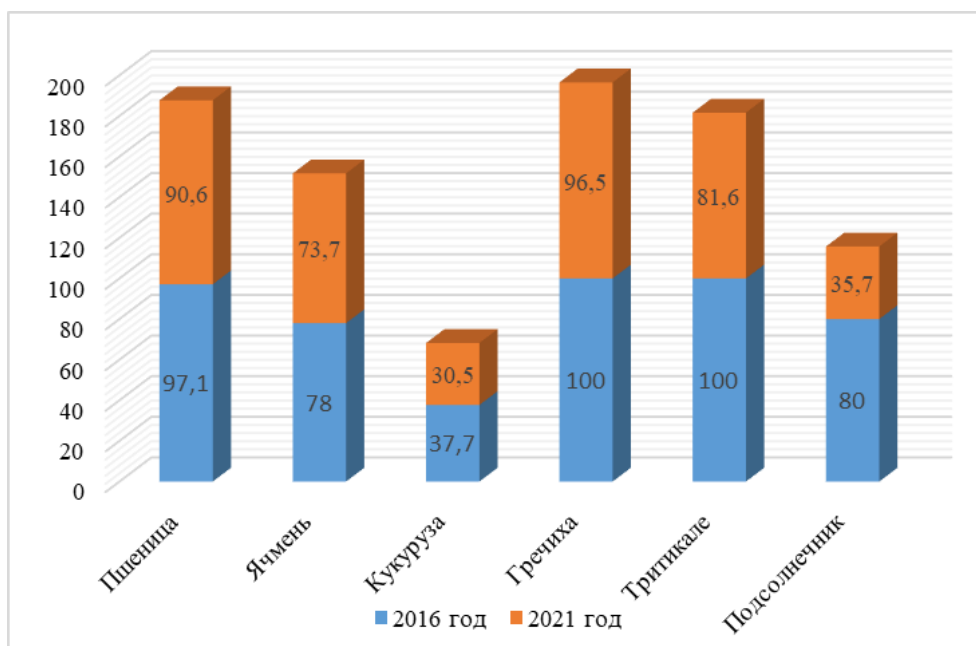


Рисунок 2. Изменения доли сортов отечественной селекции, допущенных к использованию в Российской Федерации

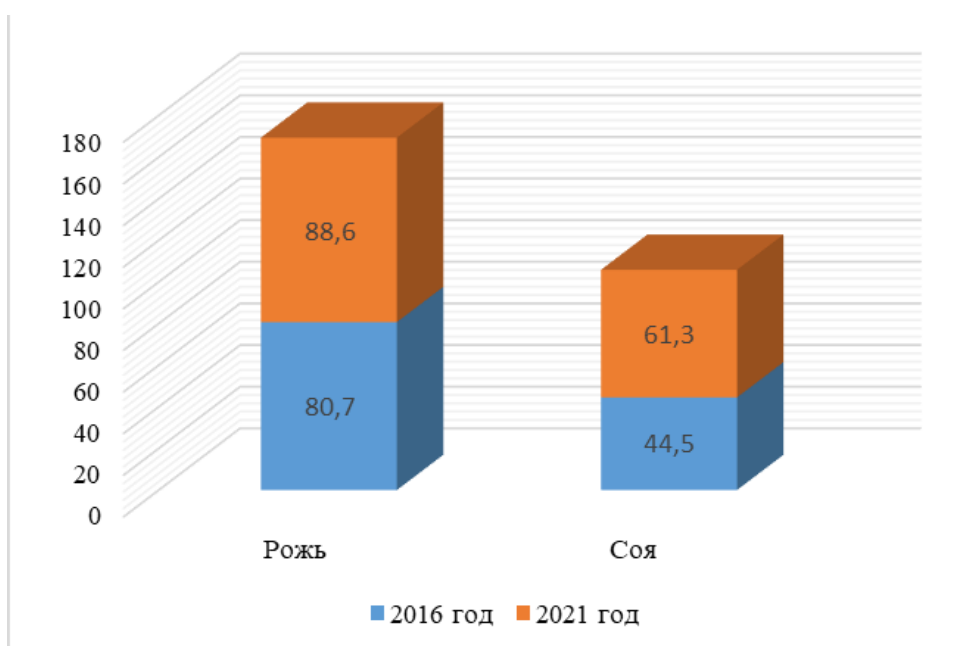


Рисунок 3. Положительные изменения доли сортов отечественной селекции, допущенных к использованию в Российской Федерации

Методы оценки современного селекционного материала

В процессе селекции, от начала до получения новой породы или гибрида, селекционер оценивает племенной материал. Под оценкой семенного материала подразумевается учет хозяйственно-биологических и характеристических свойств хозяйственной ценности созданных линий, семейств, сортов и гибридов.

По результатам оценки отбирают пары для скрещивания, родительские растения из гибридов, мутантов или других популяций для последующей селекции, либо выделяют элитные растения для инкубации семян на первичной стадии семеноводства. Таким образом, при перемещении скота по схеме племенного процесса поголовье комплексно оценивается по достаточно большому количеству хозяйственно-биологических, морфологических и характеристических признаков [2].

Биотехнологические или генетически модифицированные культуры, продукт технологии рекомбинантной ДНК и тщательных научных исследований, были самой быстро внедряемой сельскохозяйственной технологией когда-либо разработанной. Аргументы за и против использования рекомбинантной ДНК в сельском хозяйстве имеют решающее значение для понимания изменений в сельскохозяйственной практике, вызванных технологией рекомбинантной ДНК. Рекомбинантная ДНК позволяет вводить гены в «уникальные» зерновые культуры. Также по сравнению с традиционной селекцией, такой процесс сокращает время исследований, избавляя от необходимости использовать «ненужные» гены, но и также позволяет приобретать «полезные» гены из множества различных видов зерновых культур. Сельскохозяйственным производителям эта генетическая модификация дает преимущества, включая повышение устойчивости сельскохозяйственных культур к насекомым, болезням и гербицидам [3].

Селекция на повышение урожайности и качества зерна

Одной из основных направлений селекции зерновых культур – это повышение качества фуражного зерна. Общим требованием к сортам фуражного зерна является способность давать стабильный урожай хорошего качества [4]. Это свойство обеспечивается определенными сочетанием признаков, например, устойчивость к болезням, вредителям, пригодность к механизированному земледелию, урожайность и др. Основной частью многих биологических характеристик культур является продуктивность и урожайность, которые обеспечивают полную реализацию генетического потенциала, что обусловлено засухоустойчивостью, зимостойкостью и т.д.

Сорт (гибрид) считается адаптивным, когда происходит сбалансированное сочетание большого набора признаков, в котором предпочтение отдается наиболее ценным. Степень адаптации зависит от конкретных экологических условий, созданных в агро-среде [5]. К адаптивному сорту предъявляются следующие требования: экологическая пластичность (способность давать минимум один средний урожай в широком диапазоне климатических условий); неоднородность сельскохозяйственных популяций (наличие их в составе посевов различается по высоте, глубине корней, засухоустойчивости, срокам цветения и др.); скороспелость (способность быстро расти и развиваться); интенсивность (способность быстро реагировать на улучшение условий выращивания, таких как количество осадков); устойчивость к грибкам и другим заболеваниям; низкая чувствительность к насекомым [6].

Заключение

Современные сорта и гибриды недостаточно приспособлены для высокопродуктивных агроэкосистем. Оценка устойчивости, пластичности сортов зерновых культур позволяет получить информацию, необходимую для выбора ценного материала в селекции на адаптивность.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 01.06.2022 г. № 075-15-2022-1045, и в рамках исполнения гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1700.2021.5, соглашение № 075-15-2021-179).

Список литературы

1. Полухин А.А. и др. Тенденции развития селекции и семеноводства в России в условиях реализации политики импортозамещения на ресурсных рынках // Вестник аграрной науки. 2020. № 4(85). С. 118–129. DOI 10.17238/issn2587-666X.2020.4.118. EDN OVIXAC.
2. Умарова Д.Е. Роль селекции в повышении продуктивности зерновых культур // VIII Международная студенческая электронная научная конференция «СТУДЕНЧЕСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ 2016». 2016.
3. Дорохов Б.Л., Баранина И.И. // Физиология и биохимия культурных растений. 1972 Т. 4. Вып. 3. С. 287–291.
4. Рыбась И.А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 5. С. 617–626. DOI 10.15389/agrobiology.2016.5.617rus. EDN WZIQEN.
5. Rudoy D., Pakhomov V., Olshevskaya A. et al. Review and analysis of perennial cereal crops at different maturity stages // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022111. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022111
6. Рудой Д.В., Пахомов В.И., Мальцева Т.А. и др. Обзор и анализ многолетних зерновых культур // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2021»): сб. науч. трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: ООО "ДГТУ-ПРИНТ", 2021. С. 48–52.

METHODS FOR ASSESSING MODERN BREEDING MATERIAL TO INCREASE YIELD

Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Saakyan S.R., Doroshenko V.A., Sarkisyan D.S., Zolotov S.A.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The paper discusses the influence of selection on the quality and adaptability of cultivated crops. The work presents the results of an analysis of the current state of seed production in the Russian Federation and methods for evaluating modern breeding materials. The relevance of this topic lies in the creation of highly productive, resistant to diseases and pests crop varieties.

Keywords: *selection, grain, adaptability, crops, genetics, agriculture, productivity*

УДК 57.085.23

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛОНАЛЬНОГО МИКРОРАЗМНОЖЕНИЯ РЕДКИХ И ЦЕННЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ МЕТОДОМ *IN VITRO*

Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Саркисян Д.С., Саакян С.Р., Золотов С.А.

Донской государственный технический университет
344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Российская Федерация
juliasarkisyan16@yandex.ru

Клонирование более редких и экономически ценных видов, создание генетических банков на основе трансплантационных культур и криобанков, получение биомассы в качестве источника ценных биологически активных веществ – все это различные области биотехнологии для сохранения генофонда растительных ресурсов. В данной статье рассмотрены преимущества использования системы *in vitro* по сравнению с традиционными методами обслуживания коллекций растений.

Ключевые слова: *растения, селекция, генетика, микроразмножение, in vitro*

Актуальность научных исследований в области совершенствования клонального микроразмножения редких и ценных видов растений

Защита биоразнообразия растений, а также метод микроклональной дисперсии являются одними из перспективных направлений биотехнологии, которые позволяют получать потомство и большое количество растений без генетической идентификации исходного материала.

Методика культивирования *in vitro* редких видов растений

Основными задачами в области сохранения биоразнообразия являются изучение и сохранение в первозданном виде генетических ресурсов природной флоры, сбор и уход за заготовками живых видов растений, а также разработка объекта многолетнего семеноводства, оптимальных режимов хранения, обеспечения жизнеспособности и стабильности семян. Особый интерес представляет изучение

возможностей защиты у видов с нарушенной или сложной природной устойчивостью [1].

Культивирование редких видов на этапе микроразмножения

По данным литературных источников, питательная среда Мурасиге-Скуга является наиболее универсальной и поэтому часто используется при выращивании разных видов растений. При выращивании растений класса Однодольные используются питательные среды Кнудсона и Гамбурга. Для разработки *Iris pumila* использовались следующие варианты сред: 1) Питательная среда Мурасиге-Скуга (МС) без добавления фитогормонов; 2) Питательная среда Гамбурга (B5) без добавления фитогормонов; 3) Питательная среда Кнудсона (Кн) без добавления фитогормонов (агар 10 %); 4) Питательная среда Мурасиге-Скуга (МС) с добавлением 0,1 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП) и 0,1 мг/л индолилуксусной кислоты (ИУК); 5) Питательная среда Мурасиге-Скуга (МС) с добавлением 0,5 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП); 6) Питательная среда Мурасиге-Скуга (МС) с

добавлением 0,3 мг/л 2-изопентениладенин. Показано, что многолетнее культивирование растений на цитокинин содержащих средах приводит к задержке

роста растений из-за появления большого количества различных аномалий развития (рис. 1).

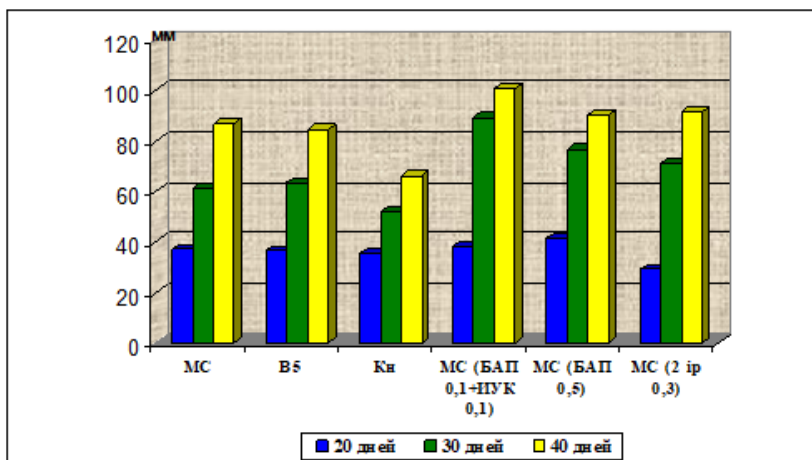


Рисунок 1. Изменение длины наиболее развитого листа у проростков *Iris pumila*, культивируемых на различных вариантах питательных сред

Равномерный рост растений наблюдали на средах без фитогормонов (рис. 1), наибольшие значения длины первого листа и количества листьев зафиксированы на среде MS. Однако на этой среде при росте растения более месяца наблюдается большое

количество увлажненных побегов и большое количество отмерших листьев. Медленный, но устойчивый рост наблюдался на среде Kn, в то время как растения имели нормальную морфологию и мало отмерших листьев через 1 месяц культивирования (рис. 2).

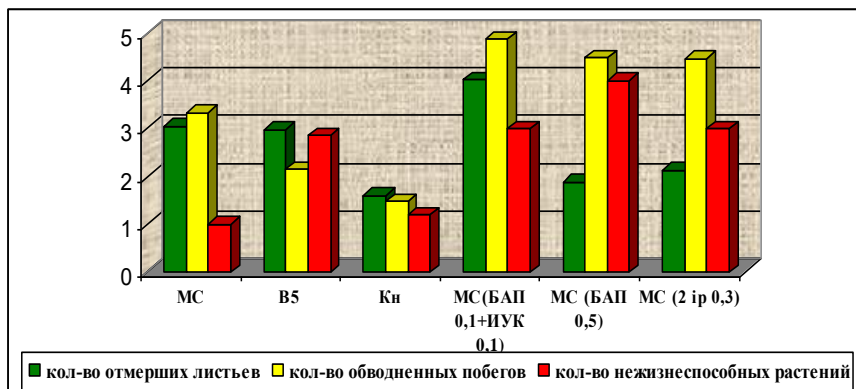


Рисунок 2. Нарушение роста и развития у проростков *Iris pumila* на экспериментальных питательных средах

На среде MS (БАП 0,1 ИУК 0,1) рост растений был динамичным (рис. 1), длина первого листа была наибольшей из всех вариантов питательных сред, но и показатели онтогенетических нарушений в росте и развитии растений (рис. 2) были одними из самых высоких. В результате исследовательского процесса установлено, что оптимальной питательной средой для рода *Iris* является питательная среда Кнудсона [2]. На этой среде растения демонстрируют одинаково медленный рост, при этом количество аномальных и нежизнеспособных растений очень мало, что позволяет поддерживать коллекцию *in vitro* в течение длительного времени. Среди всех исследованных цитокининов наибольший коэффициент размножения, равный 4, наблюдался при использовании 6-БАП в

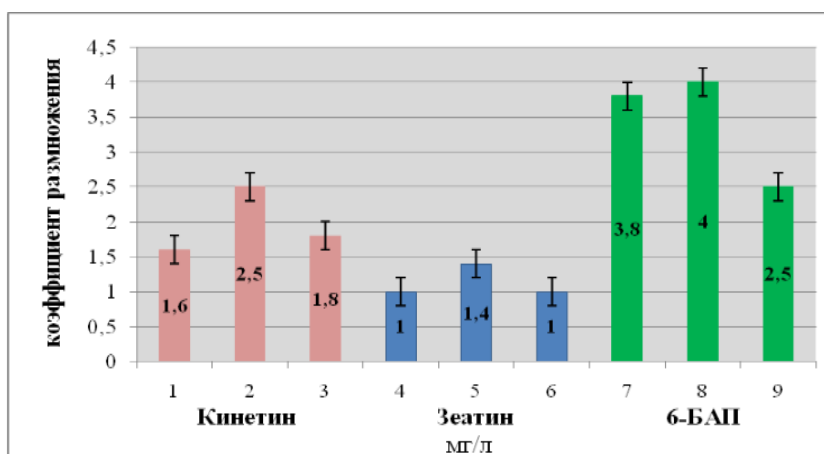
концентрации 0,5 мг/л (рис. 3). При этом также отмечались изменения в морфологии побегов: уменьшались междоузлия побегов, уменьшались размеры листьев и изменялась их форма. Кроме того, у половины побегов при концентрации 6-БАП 1,0 мг/л наблюдалась витрификация побегов [3].

В качестве проб взяты фрагменты побегов длиной 710 мм. Оптимальное время передачи *S. volgarica* составляет 30–35 дней. Коэффициент размножения не увеличивался, а скорость роста, наоборот замедлялась. Кроме того, у значительной части растений *in vitro* наблюдалось засыхание листьев (40 %).

По интенсивности размножения изученные виды условно разделены на 3 группы: в первую группу

входят представители семейства *Caryophyllaceae* (*Silene cretacea*) и семейства *Brassicaceae* (*Lepidium meyeri*, *Matthiola fragrans*), $K_p \geq 7$; во вторую группу входят виды семейства *Ranunculaceae* (*Clematis recta*,

C. orientalis, *C. integrifolia*) – $4 \leq K_p \leq 7$; в третью группу с наименьшей регенерационной способностью вошли виды семейства *Fabaceae* (*Calophaca wolgarica*, *Hedysarum grandiflorum*, *Hedysarum cretaceum*) (рис. 4).



1 – кинетин 1,0 мг/л; 2 – кинетин 2,0 мг/л; 3 – кинетин 5,0 мг/л; 4 – зеатин 0,1 мг/л; 5 – зеатин 0,5 мг/л; 6 – зеатин 1,0 мг/л; 7 – 6-БАП 0,1 мг/л; 8 – 6-БАП 0,5 мг/л; 9 – 6-БАП 1,0 мг/л

Рисунок 3. Нарушение роста и развития у проростков *Iris pumila* на экспериментальных питательных средах

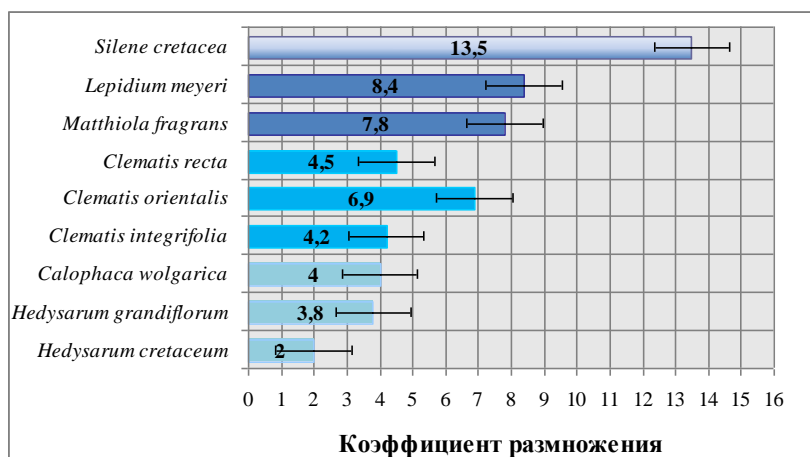


Рисунок 4. Коэффициент размножения редких и исчезающих видов растений на среде с добавлением 0,5 мг/л 6-БАП

Благодаря сравнительному анализу влияния известных видов на воспроизводство редких и исчезающих видов растений можно выявить различия между родственными видами (представителями рода *Hedysa*) и между видами, принадлежащими к разным семействам [4]. В это же время, незначительные различия в репродуктивных параметрах имеются между близкородственными видами одного семейства. Значительную разницу между редкими видами разных семейств выявил анализ полученных данных по интенсивности размножения (коэффициент размножения между семействами *Caryophyllaceae* и *Fabaceae* составил 6 раз – от 2 до 13,5). Эти различия помогают

определить уровень регенеративной активности между семьями в культурах *in vitro* [5].

Продолжительность пассажа

Важным показателем при разведении редких видов является количество подвидов. В то же время было отмечено, что скорость роста эксплантов при культивировании с разными видами *существенно различалась*. Так, для *Lepidium meyeri* и *Matthiola fragrans* (представителей семейства *Brassicaceae*) максимальные значения коэффициента (12, *Astragalus dasyanthus*) имеют другую формулу. Максимальный множитель 4,8 был уменьшен на шаг 4–5 (рис. 5).

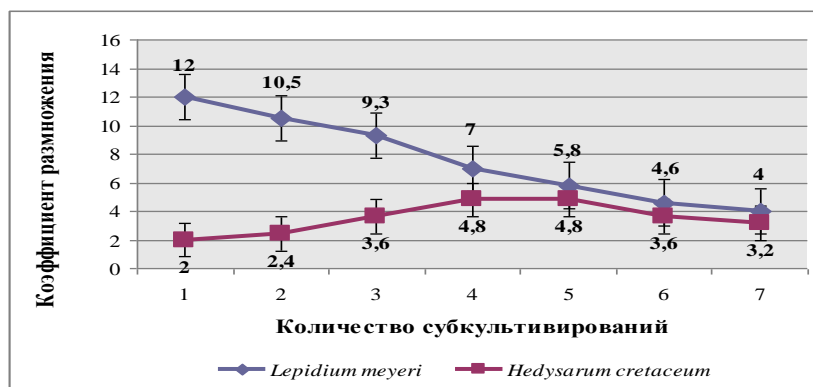


Рисунок 5. Сравнение темпов развития *Lepidium meyeri* и *Hedysarum cretaceum* в зависимости от количества субкультивирований

Укоренение и адаптация микропобегов редких видов растений

Результаты экспериментов по подбору сред на этапе укоренения показывают значительные отличия процента укоренения в зависимости, как от видовых особенностей редких и исчезающих видов, так и от концентрации ауксинов, применяемых для индукции ризогенеза [6]. Модельными объектами для опытов по укоренению были выбраны представители семейства *Ranunculaceae* и *Brassicaceae*. В ходе работы изучалось влияние ИУК и ИМК на процесс укоренения. Укоренившиеся побеги *Lepidium meyeri* высаживали на питательную среду, минеральная основа которой была полной и разбавленной в 2 раза, модифицированной по Мурасиге и Скугу с добавлением 20 г/л сахарозы, 6,5 г/л агара и количества витаминов в среде. Опыт укоренения редких видов растений показал, что при использовании полной минеральной основы MS требуются более высокие уровни ауксина, начиная с 1,0 мг/л. При возделывании однодольных растений семейств *Asphodelaceae*, *Iridaceae*, *Hyacinthaceae*, *Liliaceae*, *Orchidaceae*, *Melanthiaceae* на стадии фактического микроразмножения обнаружено спонтанное корнеобразование около 90 % на различных составах питательных сред без добавления фитогормонов [7]. Адаптация регенерантов редких и исчезающих видов растений проходила при $t=25$ °C, освещенности 3 клк, влажности 80 %. В качестве субстрата использовалась следующая смесь: торф; песок; лужайка (1:1:2). Выход растений-регенерантов редких видов был менее 50 % [8].

В результате исследований модифицированы и адаптированы методы клонального микроразмножения некоторых редких и исчезающих видов растений. Установлено, что реализация морфогенетического потенциала у редких и исчезающих видов растений определяется видовыми особенностями исходных растений, видом эксплантата, его физиологическим состоянием, составом питательных сред и условиями культивирования.

Заключение

На основании приведенных экспериментальных данных можно сделать вывод, что индекс пролиферации возрастает с увеличением содержания цитокинов в исследуемой среде (от 0,5 до 1,0 мг/л во всех вариантах), мелких клубнях (растения диоскореи) и многих дополнительных почках (растения Бересклета). Установлено, что на морфогенетический потенциал растений влияют генотипические свойства растения-донора и оптимальная среда по соответствующему гормональному составу.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 01.06.2022 г. № 075-15-2022-1045.

Список литературы

1. Атанасов А.И. Биотехнология в растениеводстве. Новосибирск: изд-во ИЦиГ СО РАН, 1993. 241 с.
2. Батыгина Т.Б., Васильева В.Е. Размножение растений. СПб.: Изд-во СПб. Ун-та, 2002. 230 с.
3. Белокурова В.Б., Листван Е.В., Майстров П.Д. и др. Использование методов биотехнологии растений для сохранения и изучения биоразнообразия мировой флоры // Цитология и генетика. 2005. № 1. С. 41–51.
4. Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Павлов П.Д., Одабашиян М.Ю. Особенности выращивания мяты перечной. Сб. науч. трудов IX Между-нар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2021. 39–40.
5. Ветчинкина Е. М. Биологические особенности культивирования in vitro семян и зародышей редких видов растений: автореф. Дис. ... канд. биол. наук. М., 2010. 20 с.
6. Mazanko M., Prazdnova E., Rudoy D. et al. Extracts of medical plants suppress the SOS response and reduce mutagenesis in *E. coli* E3S // Web of Conferences, 175, статья № 01010 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017501010>

7. Barakhov A., Minkina T., Dudnikova T. et al. The influence of diatomite on the growth and development of *Hordeum sativum* on ordinary chernozem polluted with benzo[a]pyrene. E3S Web of Conferences 203, 02015 (2020) EBWFF–2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020302015>

8. Хащин С.М., Рудой Д.В., Балинская М.В., Бабаджанян А.С. Исследования и разработки как процесс возникновения, формирования, использования и реализации научно-технических нововведений // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017): Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: ООО "ДГТУ-ПРИНТ", 2017. С. 317–322. EDN YPHSIO.

METHODS FOR STUDYING THE CLONAL MICROPROPAGATION OF RARE AND VALUABLE PLANT SPECIES BY THE *IN VITRO* METHOD

Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Sarkisyan D.S., Sahakyan S.R., Zolotov S.A.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Cloning of rare and economically valuable species, creation of genetic banks based on transplant crops and cryobanks and obtaining biomass as a source of valuable biologically active substances are different areas of biotechnology for the conservation of the gene pool of plant resources. This paper discusses the advantages of using the *in vitro* system compared to traditional methods of maintaining plant collections.

Keywords: *plants, selection, genetics, micropropagation, in vitro*

УДК 633.16+581.1+539.1.047+577.21

ИЗУЧЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКСПРЕССИИ ГОМОЛОГОВ ГЕНОВ *CML39*, *PM19L* И *AOS2* НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ОНТОГЕНЕЗА ЯЧМЕНЯ ОБЫКНОВЕННОГО ПОСЛЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН

Смирнова А.С., Горбатова И.В., Казакова Е.А., Волкова П.Ю.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: sas.smirnova@mail.ru*

Для анализа молекулярных детерминант эффекта гормезиса был проведен вегетационный эксперимент на сортах ячменя обыкновенного Ратник и Леон, контрастных по ответу на γ -облучение семян. Оценена динамика прохождения онтогенетических фаз для облученных и контрольных растений. Исследована экспрессия генов-кандидатов радиационного гормезиса – гомологов *PM19L*, *CML39* и *AOS2*. Облучение семян стимулирует развитие ячменя на стадии проростков, однако на более отдаленных стадиях стимуляция может нивелироваться или сменяться ингибированием. Стимуляция роста проростков сопряжена с увеличением экспрессии гомолога гена *PM19L*, участвующего в сигналинге абсцизовой кислоты. Отмечены возможные изменения биосинтеза жасмоновой кислоты на более поздних стадиях онтогенеза.

Ключевые слова: *ячмень, γ -облучение, экспрессия генов, CML39, AOS2, PM19L*

В настоящее время условия жизнедеятельности растений усложняются как естественными, так и антропогенными изменениями состояния окружающей среды. Определение механизмов формирования эффекта радиационного гормезиса и кандидатных генов для биотехнологических целей может быть использовано для получения стрессоустойчивых культур. Ранее была изучена реакция проростков

нескольких сортов ячменя на облучение семян и из 17-ти генов-кандидатов были выбраны 3 наиболее перспективные гена, гомологи *CML39*, *AOS2* и *PM19L*, связанные с кальциевым, жасмонатным и сигналингом абсцизовой кислоты, соответственно, для дальнейшего изучения механизмов эффекта радиационного гормезиса [1]. В данной работе проведен анализ экспрессии данных генов на разных стадиях

онтогенеза растений в условиях вегетационного эксперимента.

Материалы и методы

В рамках данной работы были проведены вегетационный эксперимент в теплице и оценка динамики прохождения онтогенетических фаз для облученных и контрольных растений. Проведен пробоотбор образцов облученных и контрольных растений и исследована экспрессия генов-кандидатов радиационного гормезиса – гомологов *PM19L*, *CML39* и *AOS2*.

В качестве объекта исследования использовали оригинальные семена двух сортов ячменя обыкновенного: Ратник и Леон.

Облучение семян ячменя проводили в дозе 20 Гр (мощность дозы 60 Гр/ч) на установке ГУР-120 (^{60}Co) (ФГБНУ ВНИИРАЭ, Обнинск). В качестве контроля использовали необлученные семена.

Посадку семян осуществляли в пластмассовые вегетационные сосуды с почвой. Предварительно на дно каждого сосуда засыпали керамзит, чтобы он полностью покрывал дно, и сверху накрывали двумя слоями марли. В эксперименте использовали 12 вегетационных сосудов, по 6 для каждого сорта (3 с контрольными растениями и 3 с облученными).

Далее ежедневно смену фенологических фаз отслеживали для проросших растений на протяжении всего развития [3]. Подсчитывали количество растений на каждой стадии развития для каждого сосуда. В дни оценки фаз в теплице измеряли показатели температуры и влажности. Средняя температура в период проведения эксперимента составляла 25,8 °С, влажность 26,6 %. В течение эксперимента полив растений осуществляли дистиллированной водой, по 150–200 мл ежедневно в каждый сосуд.

На разных стадиях онтогенеза в теплице был выполнен отбор образцов побегов сортов ячменя. На каждой стадии развития, на которой производили отбор проб, из каждого сосуда аккуратно с помощью пинцета извлекали 3 растения, после чего отрезали побеги у трех растений, и помещали их в криобирки и замораживали в жидком азоте, хранили при -80 °С.

Выделение тотальной РНК производили при помощи набора ExtractRNA (Евроген, Россия). 1 мкл РНК подвергали обработке ДНКазой I при помощи набора Dnase I, Rnase-free (1 U/ μL) (Thermo Scientific, США). Затем синтезировали комплементарную ДНК (кДНК) с помощью набора MMLV RT kit (Евроген, Россия). Далее для определения экспрессии генов *CML39*, *PM19L* и *AOS2* была проведена ПЦР в реальном времени на приборе ДТ-96 (ДНК-Технология, Россия). В качестве референсного гена использовали актин. Все анализы были выполнены в трех биологических и двух технических повторностях с отрицательным контролем. Расчеты кратности изменения (fold change, FC) были сделаны с использованием метода $\Delta\Delta\text{Cp}$ в ПО Microsoft Office Excel, 2019 [2].

Результаты и обсуждение

Для γ -стимулированного сорта Ратник при развитии растений в условиях теплицы показано, что на стадии проростков облученные образцы имеют большую скорость роста. У растений, выросших из облученных семян, фаза «трубкование» начиналась позже на 3 дня (на 68-й и 71-й день для контроля и для облученных образцов соответственно). Стадия «колошение» начиналась на 76-й день. У γ -ингибированного сорта Леон в вегетационном эксперименте на стадии проростков облученные образцы развивались быстрее. Стадии трубкования и колошения начинались на одни и те же сутки прорастания. Стадия «трубкование» начиналась на 68-й день, стадия «колошение» начиналась на 76-й день. Облучение семян стимулирует развитие ячменя на стадии проростков, однако на более отдаленных стадиях онтогенеза стимуляция может нивелироваться или сменяться ингибированием.

Ген *CML39* связан с кальциевым сигналингом и кодирует белок, непосредственно участвующий в передаче сигнала кальция. Для сорта Ратник на стадии трубкования наблюдается снижение экспрессии гомолога гена *CML39*, а затем увеличение экспрессии на стадии колошения (рис. 1). Для сорта Леон на стадиях трубкования и колошения наблюдается снижение экспрессии гомолога гена *CML39* по сравнению с контролем (рис. 2). Для двух исследованных сортов не выявлены закономерности, связанные с кальциевым сигналингом в ответ на облучение.

PM19L кодирует мембранный белок PM19L, который участвует в передаче сигналов абсцизовой кислоты и связан с прорастанием. Для сорта Ратник на стадии проростков наблюдается резкое увеличение, а затем снижение экспрессии гомолога гена *PM19L* по сравнению с контролем (рис. 3). При этом с течением времени экспрессия данного гена приближается к экспрессии контрольных образцов. Для сорта Леон на стадиях проростков и трубкования наблюдается увеличение экспрессии гомолога *PM19L* (рис. 4). Однако на стадии колошения экспрессия резко снижается. Стимуляция роста проростков сопряжена с увеличением экспрессии *PM19L*, что может отражать клеточный ответ на накопление АБК, наблюдающееся при действии многих стрессоров, включая ионизирующее облучение.

Продукт гена *AOS2* участвует в жасмонатном сигналинге. Для сорта Ратник на стадии проростков наблюдается увеличение, а затем снижение экспрессии гомолога гена *AOS2* по сравнению с контролем на стадии трубкования (рис. 5).

На стадии колошения экспрессия данного гена снова увеличивалась до значений, наблюдаемых в проростках. Для сорта Леон на стадии проростков изменения экспрессии гомолога гена *AOS2* не наблюдаются (рис. 6).

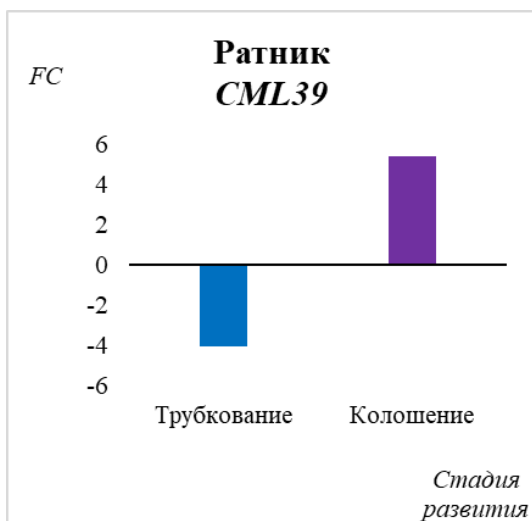


Рисунок 1. Значения FC гомолога гена *CML39* для растений сорта Ратник

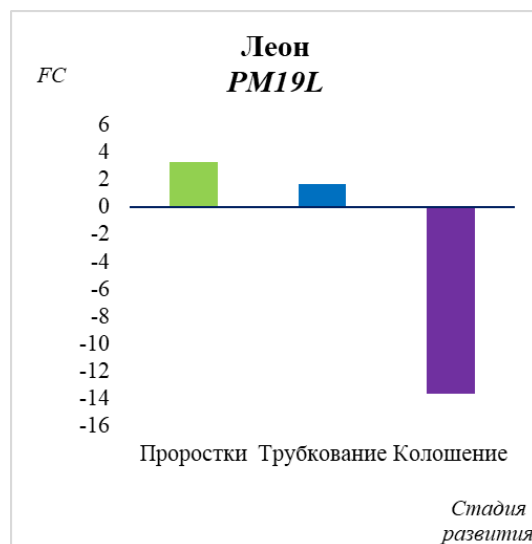


Рисунок 4. Значения FC гомолога гена *PM19L* для растений сорта Леон

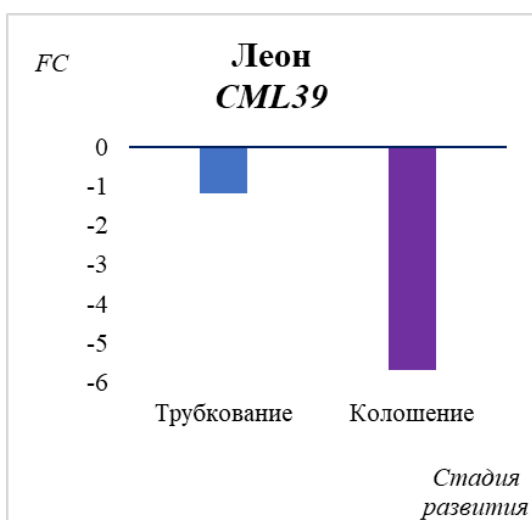


Рисунок 2. Значения FC гомолога гена *CML39* для растений сорта Леон

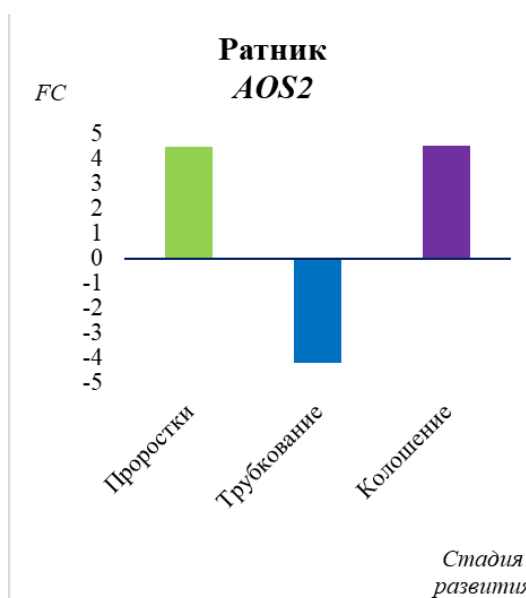


Рисунок 5. Значения FC гомолога гена *AOS2* для растений сорта Ратник

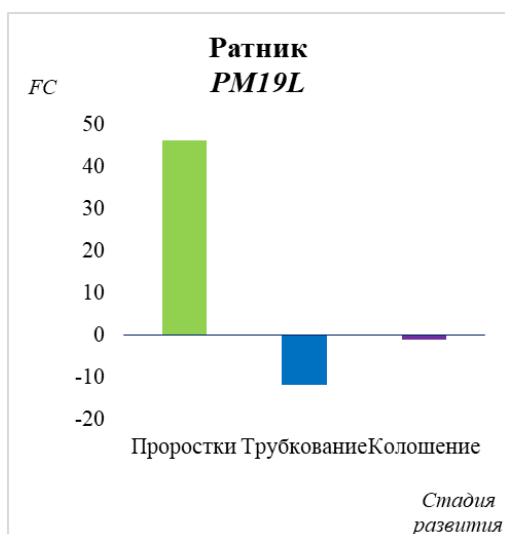


Рисунок 3. Значения FC гомолога гена *PM19L* для растений сорта Ратник

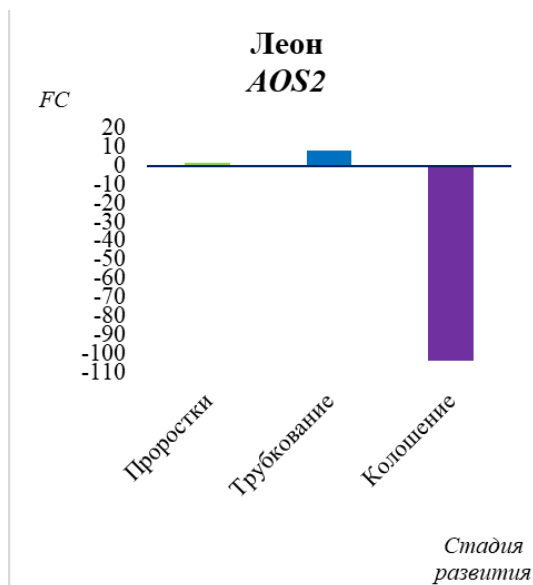


Рисунок 6. Значения FC гомолога гена AOS2 для растений сорта Леон

На стадии трубкования экспрессия данного гена повышается по сравнению с контролем, однако на стадии колошения экспрессия резко снижается. Возможные изменения биосинтеза жасмоновой кислоты на более поздних стадиях онтогенеза могут быть связаны с повреждениями клеточной стенки и последующим ответом растений на эти повреждения.

Заключение

В ходе данной работы было показано, что облучение семян стимулирует развитие ячменя на стадии проростков, однако на более отдаленных стадиях онтогенеза стимуляция может нивелироваться или сменяться ингибированием. По мере развития растения все более важную роль в транскрипционном ответе на облучение семян начинает играть сортоспецифичность.

При этом подтверждается возможность целевых биотехнологических изменений в экспрессии генов на ранних стадиях развития растений с целью модификации динамики онтогенеза.

Список литературы

1. Gorbatova I.V. et al. Studying gene expression in irradiated barley cultivars: PM19L-like and CML31-like expression as possible determinants of radiation hormesis effect // *Agronomy*, 2020, 10, 1837
2. Majeed A. et al. Gamma irradiation i: effect on germination and general growth characteristics of plants // *Pakistan Journal of Botany*, 50 (2018) 2449–2453.
3. Tottman D.R. The decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations // *Ann. Appl. Biol.* 1987. V. 110. P. 441-454

STUDY OF DIFFERENTIAL EXPRESSION OF CML39, PM19L AND AOS2 HOMOLOGUES GENES AT DIFFERENT STAGES OF BARLEY ONTOGENESIS AFTER γ -IRRADIATION OF SEEDS

Smirnova A.S., Gorbatova I.V., Kazakova E.A., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

To analyze the molecular determinants of the hormesis effect, a greenhouse experiment was conducted on barley cultivars Ratnik and Leon, contrasting in response to γ -irradiation of seeds. The dynamics of the passage of ontogenetic phases for irradiated and control plants was estimated. The expression of candidate genes of radiation hormesis – homologues PM19L, CML39 and AOS2 – was studied. Irradiation of seeds stimulates the development of barley at the seedling stage; however, at more distant stages, stimulation may be lifted or replaced by inhibition. Stimulation of the seedling growth is associated with an increase in the expression of the PM19L homologue involved in abscisic acid signaling. Possible changes in the biosynthesis of jasmonic acid at the later stages of ontogenesis were noted.

Keywords: barley, γ -irradiation, gene expression, CML39, AOS2, PM19L

Секция

**ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ И МАРКЕР-
АССОЦИИРОВАННАЯ СЕЛЕКЦИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

**GENETIC EDITING AND MARKER-ASSISTED SELECTION IN
AGRICULTURE**



МЕТОДЫ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ФЕНОТИПИРОВАНИЯ В СЕЛЕКЦИИ

Воденеев В.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Российская Федерация

e-mail: v.vodeneev@mail.ru

В докладе рассмотрены методы высокопроизводительного фенотипирования, которые сегодня вводятся в сельскохозяйственную практику для ускорения селекции.

Ключевые слова: *фенотипирование, селекция, сельское хозяйство, генетические технологии, имиджинг*

Растущие потребности населения Земли требуют увеличения объема производства продуктов питания. Важнейшая роль в этом принадлежит селекции новых сортов сельскохозяйственных культур. Современные требования к новым сортам важнейших сельскохозяйственных культур включают наряду с высокой урожайностью устойчивость к абиотическим и биотическим стрессорам. Продолжающееся развитие молекулярно-генетических технологий обеспечивает современную селекцию растений потенциалом к получению новых сортов с высокими хозяйственно ценными признаками, включая использование в селекционном процессе определенных ДНК-маркеров, а также их комбинаций, ассоциированных с определенными признаками, для отбора растений с заданными свойствами. Однако, использование в полном объеме возможностей молекулярно-генетических технологий, в частности количественный анализ потенциальной урожайности и устойчивости растений к стрессу, сегодня еще во многом ограничено возможностями фенотипирования.

В докладе рассмотрены методы высокопроизводительного фенотипирования, которые сегодня вводятся в сельскохозяйственную практику для ускорения селекции. Основное внимание уделено тем

методам фенотипирования, которые предоставляют информацию не только о структурных особенностях исследуемого объекта, но также и об активности основных физиологических процессов. В число таких методов входят, прежде всего, имиджинг на основе флуоресценции хлорофилла, тепловизионный имиджинг, а также гипер- и мультиспектральный имиджинг. Перечисленные подходы применяются в процессе селекции для оценки морфофункциональных характеристик растений на различных стадиях роста и при различных условиях окружающей среды, предоставляя информацию как о продуктивности растений, так и об ответных реакциях растений на действие абиотических и биотических стрессовых факторов. Другим важным направлением является использование фенотипических признаков в качестве предикторов урожайности и устойчивости. Можно констатировать, что внедрение в процесс селекции технологий высокопроизводительного фенотипирования позволит значительно ускорить получение новых сортов и сократить необходимые для этого ресурсы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект № 075-15-2021-1068).

HIGH-PERFORMANCE PHENOTYPING METHODS IN SELECTION

Vodeneev V.A.

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The paper discusses the methods of high-performance phenotyping, which are now being introduced into agricultural practice to speed up the selection process.

Keywords: phenotyping, selection, agriculture, genetic technologies, imaging

The growing needs of the world's population require an increase in food production. The most important role here belongs to the selection of new varieties of crops. Modern requirements for new varieties

of the most important crops include not only high yields but resistance to abiotic and biotic stressors as well. The ongoing development of molecular and genetic technologies provides modern plant breeding

with the potential to obtain new varieties with highly economically valuable traits. These technologies include using certain DNA markers in the selection process and their combinations associated with certain features to select plants with desired properties. However, the full use of the possibilities of molecular and genetic technologies, in particular, the quantitative analysis of the potential yield and plants' resistance to stress, is nowadays still largely limited by the possibilities of phenotyping.

The paper discusses the methods of high-performance phenotyping, which are now being introduced into agricultural practice to speed up the selection process. The main attention is paid to those phenotyping methods that provide information not only about the structural features of the object under study but also about the activity of the main physiological processes. These methods include, first of all, imaging based on

chlorophyll fluorescence, thermal imaging, and hyper- and multispectral imaging. The listed approaches are used in the selection process to assess the morpho-functional characteristics of plants at different growth stages and under various environmental conditions, providing information on plants' productivity and their responses to abiotic and biotic stress factors. Another important area is the use of phenotypic features as predictors of yield and resistance. It can be stated that the introduction of high-performance phenotyping technologies into the selection process will significantly speed up the production of new varieties and reduce the resources required for it.

The research was supported financially by the Ministry of Education and Science (Project No. 075-15-2021-1068).

УДК 636.082.251

ВЛИЯНИЕ ОДНОНУКЛЕОТИДНОЙ ЗАМЕНЫ В ГЕНЕ РЕЦЕПТОРА Фолликулостимулирующего Гормона (FSHR) НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ИСХОДНЫХ ЛИНИЙ КУР ЯИЧНОГО КРОССА

Куликов Е.И., Комарчев А.С., Мартынова В.Н.

*ФНЦ «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства» РАН
141311, Московская область, г. Сергиев Посад, ул. Птицезградская, д. 10, Российская Федерация
e-mail: kulikovegor33@yandex.ru, kas1380@bk.ru*

Фолликулостимулирующий гормон (ФСГ) играет важную физиологическую роль в репродуктивной системе человека и животных, связываясь с его рецептором (FSHR). Поскольку ФСГ действует исключительно через FSHR, механизмы, контролирующие экспрессию рецепторов, определяют популяцию клеток, реагирующих на ФСГ, и влияют на их чувствительность к гормонам. Таким образом, экспрессия FSHR определяет не только мишени, но и степень действия ФСГ, в конечном итоге направляя гормональный ответ на клетки гранулы в яичнике и клетки Сертоли в яичке. Однонуклеотидная замена rs315726646 была проанализирована на чистых линиях кросса СП789. Проявление аллеля улучшателя яичной продуктивности А составляет 21 % в отличие от линий материнской формы (СП 8 и СП 9), которые составляют 58,5 % и 71 % соответственно. Материнская линия материнской формы СП 9 имеет наибольшую частоту генотипа АА 50 %. Яйценоскость кур с генотипом АА была достоверно выше, чем у кур с генотипом АG и GГ на 7 % и 9,2 % соответственно. Также, достоверно более высокие показатели по живой массе в 16 недель были у кур с генотипом АА, чем у кур с генотипом GГ на 2,2 %.

Ключевые слова: *яичные куры, геномная селекция, SNP, рецептор, фолликулостимулирующий гормон, однонуклеотидные замены*

Фолликулостимулирующий гормон (ФСГ) играет важную физиологическую роль в репродуктивной системе человека и животных, связываясь с его рецептором (FSHR). ФСГ стимулирует рост фолликулов у женщин, а также стимулирует деление и функцию клеток гранулы, которые окружают и питают развивающийся ооцит (яйцеклетку) в фолликуле. В мужском организме ФСГ участвует в сперматогенезе, индуцируя деление клеток Сертоли в раннем возрасте. Так, ФСГ является гликопротеиновым гормоном

гипофиза и неотъемлемым компонентом эндокринной оси, регулирующей функцию гонад и фертильность [3,5,7].

FSHR – специфический трансмембранный рецептор, с которым связывается ФСГ, после высвобождения в циркуляцию. Входит в состав гликопротеинового семейства рецепторов, связанных с G-белком, и находится на клетках мишенях. В 1996 году последовательность кДНК FSHR была впервые успешно клонирована из ткани куриных яичников. Анализ

последовательности и интегрированные результаты гена FSHR курицы были продемонстрированы в 2005 году. Проведённые исследования показали, что FSHR избирательно экспрессируется в клетках Сертоли и гранулезах яичников, и его уровень экспрессии тесно связан с дифференцировкой и созреванием половых клеток. На разных фолликулярных стадиях уровень экспрессии мРНК FSHR отрицательно коррелирует с размером фолликулов, скорее всего, потому что зависимость фолликулов от ФСГ различается на протяжении всего развития: мелкие фолликулы нуждаются в большей стимуляции ФСГ, поэтому содержание мРНК FSHR наиболее высокое в клетках гранулезы (ГК). Количество белков FSHR, экспрессируемых на каждом ГК, сильно изменяется на протяжении всего фолликулярного развития [2]. У кур-несушек маленький желтый фолликул (6–8 мм в диаметре) с наибольшей экспрессией FSHR будет рекрутирован в преовуляторную иерархию во время развития фолликула яичника [4].

У кур ген FSHR располагается в 3 хромосоме и состоит из 15 экзонов, существует 5 изоформ данного рецептора. FSHR имеют расширенные NH₂-концевые внеклеточные домены с многочисленными богатыми лейцинами повторами, которые помогают специфичности лиганда. Связывание ФСГ вызывает несколько различных сигнальных событий, но наиболее характерным из них является инициация аденилатциклазой, затем происходит индукция цАМФ, активация протеинкиназы А и фосфорилирование белка. Увеличение внутриклеточного кальция, активация митоген-активируемой протеинкиназы и стимуляция инозитолтрифосфата также связаны со связыванием ФСГ.

Поскольку ФСГ действует исключительно через FSHR, механизмы, контролирующие экспрессию рецепторов, определяют популяцию клеток, реагирующих на ФСГ, и влияют на их чувствительность к гормонам. Таким образом, экспрессия FSHR определяет не только мишени, но и степень действия ФСГ, в конечном итоге направляя гормональный ответ на клетки гранулезы в яичнике и клетки Сертоли в яичке. В гранулезных клетках яичников временные изменения в передаче сигналов ФСГ регулируют ряд транскрипционных, метаболических и гормональных активностей, которые важны для событий пролиферации и дифференцировки, необходимых для роста фолликулов и созревания ооцитов. В тестикулярных клетках Сертоли действие ФСГ меняется по мере развития яичка [3,9].

В результате проведенных исследований, с использованием секвенирования, выяснили, что в промоторе гена FSHR курицы существует 11 однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) [1]. Ряд авторов провели исследования, в ходе которых результаты процесса выравнивания секвенирования показали, что при длине основания 64 п.н. показана мутация от гуанина к аденину, а при длине основания 66 п.н. показана мутация от цитозина к аденину, что указывает на переходную мутацию [8].

Материалы и методы

Эксперимент проводился на базе ЭПХ «Загорское» весна-лето 2022 года. Методом случайной выборки было отобрано по 12 голов чистых линий «СП7», «СП8», «СП9» кросса «СП789» в возрасте 50 недель. Птица содержалась индивидуально в клеточной батарее «ФАКО».

Забор крови осуществлялся из подкрыльцовой вены в пробирки типа Эппендорф 1,5 мл с добавлением цитрата натрия, в качестве антикоагулянта.

Из 36 образцов крови была выделена ДНК при помощи коммерческих наборов для выделения нуклеиновых кислот ExtractDNA Blood & Cells (Евроген, Россия). Контроль содержания ДНК и чистоты образцов проводили при помощи спектрофотометра NanoDrop (Thermo Fisher Scientific).

Подбор праймеров и зондов производился при помощи базы данных Ensembl, а также программ GeneRunner и Oligo Analyzer.

Для идентификации однонуклеотидного полиморфизма (rs315726646) в геноме кур использовался следующий набор (табл. 1).

Таблица 1

Праймеры и зонды

Прямой праймер	GTCATTGAAATCACAGGC
Обратный праймер	GCATAAATACTACCTCTCCTTC
Зонд для аллеля G	GCA C ATTTTGTTTGAT
Зонд для аллеля A	GCA T ATTTTGTTTGAT

Для проведения ПЦР использовали Амплификатор QuantStudio 5 Real-Time ПЦР (Thermo Fisher Scientific). Режим амплификации: Стадия удержания 05 мин. 00 сек., 95 °C (1 цикл); Стадия ПЦР 00 мин. 30 сек., 95 °C; 00 мин. 30 сек., 54 °C; 00 мин. 30 сек., 72 °C (40 циклов).

По продуктивности птицы учитывались следующие показатели: Живая масса в 16 нед., кг; Яйценоскость за 40 нед. жизни, шт.; Масса яйца в 45 нед. жизни, г; Половая зрелость, дн.

Результаты

В таблице 2 приведено распределение кур по генотипам и частота встречаемости аллелей.

СП 7 является отцовской формой кросса СП789 с главным селекционным признаком масса яйца. Проявление предположительного аллеля улучшателя яичной продуктивности А составляет 21 % в отличие от линий материнской формы (СП 8 и СП 9), которые составляют 58,5 % и 71 % соответственно. Материнская линия материнской формы СП 9 имеет наибольшую частоту генотипа АА 50 %. Основным селекционируемым признаком данной линии является яйценоскость.

Яйценоскость кур с генотипом AA была достоверно выше, чем у кур с генотипом AG и GG на 7 % и 9,2 % соответственно (табл. 3).

Таблица 2

Частота генотипов и аллелей

SNP	Линии	Частота генотипов			Частота аллелей	
		GG	GA	AA	G	A
rs315726646	СП 7 (12 головы)	0,75	0,08	0,17	0,79	0,21
	СП 8 (12 головы)	0,25	0,33	0,42	0,415	0,585
	СП 9 (12 головы)	0,08	0,42	0,50	0,29	0,71
	СП 7,8,9 (36 голов)	0,36	0,28	0,36	0,50	0,50

Таблица 3

Продуктивность кур

SNP	Показатель	Генотип			P-value
rs315726646		GG (13 голов)	GA (10 голов)	AA (13 голов)	
	Живая масса в 16 нед., г	1302,5±8,27A	1306±10,13AB	1330,9±10,57B	0,047
	Яйценоскость за 40 нед. жизни, шт.	122,75±2,43A	125,2±3,13A	134±1,60B	0,001
	Масса яйца в 45 нед. жизни, г	65,0±1,17A	63,1±1,16A	63,7±0,81A	0.251
	Половая зрелость, дн.	154,4±0,67A	151,7±2,21A	153,6±0,72A	0.265

Также, достоверно более высокие показатели по живой массе в 16 недель были у кур с генотипом AA, чем у кур с генотипом GG на 2,2 %. Достоверных различий по массе яйца и возрасту наступления половой зрелости не наблюдается, благодаря чему можно предположить, что исследуемый SNP не влияет на уровень развития данных признаков.

Заключение

Были получены достоверные различия у генотипа AA: по живой массе с генотипом GG, по яйценоскости за 40 недель жизни с генотипами GG и GA. По результатам исследования наблюдается улучшение показателей продуктивности кур с генотипом AA, благодаря чему возможно проведение селекционной работы по данному SNP. Необходимо провести дополнительные исследования на большей выборке, проанализировать генотип петухов и проверить наследование признака у F1.

Список литературы

1. Li X, Lu Y, Liu X, Xie X, Wang K, Yu D. Identification of chicken FSHR gene promoter and the correlations between polymorphisms and egg production in Chinese native hens // *Reprod Domest Anim.* 2019 Apr.

54(4) P. 702–711. doi: 10.1111/rda.13412. Epub 2019 Mar 23.

2. Cui H., Zhao G., Liu R. et al. FSH stimulates lipid biosynthesis in chicken adipose tissue by upregulating the expression of its receptor FSHR. // *J Lipid Res.* 2012. V. 53(5) P. 909-917. doi:10.1194/jlr.M025403

3. George J.W., Dille E.A., Heckert L.L. Current concepts of follicle-stimulating hormone receptor gene regulation // *Biol Reprod.* 2011. V. 84(1). P.7–17. doi:10.1095/biolreprod.110.085043

4. Wang Y. et al. Transcriptome analysis on single small yellow follicles reveals that Wnt4 is involved in chicken follicle selection // *Frontiers in endocrinology.* 2017. T. 8. C. 317.

5. Kurnia R. R. et al. The association of follicle stimulating hormone receptor (FSHR) gene polymorphism of on egg productivity in hybrid chicken (*Gallus gallus gallus*, Linnaeus 1758) // *Biodiversitas Journal of Biological Diversity.* 2021. T. 22. №. 3.

6. Heckert L.L., Daggett M.A., Chen J. Multiple promoter elements contribute to activity of the follicle-stimulating hormone receptor (FSHR) gene in testicular Sertoli cells // *Mol Endocrinol.* 1998. V. 12(10). P. 1499–1512. doi:10.1210/mend.12.10.0183

7. Borgbo T., Klučková H., Macek M. et al. The Common Follicle-Stimulating Hormone Receptor (FSHR) Promoter Polymorphism FSHR -29G > A Affects Androgen Production in Normal Human Small Antral Follicles // *Frontiers in endocrinology*. 2017. 8, 122.

8. Ismoyowati I., Saleh D. M., Suswoyo I. Egg Production Characteristic and the Study of Follicle-stimulating Hormone Receptor Gene on Various of Sentul Chicken // *International Conference on Improving Tropical*

Animal Production for Food Security (ITAPS 2021). Atlantis Press, 2022. С. 4–9.

9. George J.W., Dille E.A., Heckert L.L. Current concepts of follicle-stimulating hormone receptor gene regulation. // *Biol Reprod*. 2011. V. 84(1). P. 7–17. doi:10.1095/biolreprod.110.085043

10. Лянгасова О.В. и др. Полиморфные варианты гена FSHR и гормональный профиль при проведении программ вспомогательных репродуктивных технологий // *Живые и биокостные системы*. 2017. №19.

EFFECT OF A SINGLE NUCLEOTIDE POLYMORPHISM IN THE FOLLICLE-STIMULATING HORMONE RECEPTOR (FSHR) GENE ON THE PRODUCTIVITY OF THE EGG CROSS CHICKEN LINES

Kulikov E.I., Komarchev A.S., Martynova V.N.

FSC ARRTPI RAS, Sergiev Posad., Russian Federation

Follicle stimulating hormone (FSH) plays an important physiological role in the human and animal reproductive system by binding to its receptor (FSHR). Since FSH acts exclusively through FSHR, the mechanisms controlling receptor expression determine the population of FSH-responsive cells and influence their sensitivity to the hormone. So, FSHR expression determines not only the targets but also the extent of FSH action, ultimately directing the hormonal response to granulosa cells in the ovary and Sertoli cells in the testis. The single nucleotide substitution rs315726646 was analyzed in pure cross SP789 lines. The manifestation of the egg performance enhancer A allele is 21 % in contrast to the maternal form lines (SP 8 and SP 9), which are 58.5 % and 71 % respectively. The maternal line of the SP 9 maternal form has the highest frequency of AA genotype 50 %. Egg production of hens with the AA genotype was significantly higher than that of hens with the AG and GG genotype by 7 % and 9.2 % respectively. Also, chickens with the AA genotype had significantly higher live weight at 16 weeks than chickens with the GG genotype by 2.2 %.

Keywords: egg hens, genomic selection, SNP, receptor, follicle-stimulating hormone, single nucleotide polymorphism

The following kit was used to identify the single nucleotide polymorphism (rs315726646) in the chicken genome: forward (GTCATTGAAATCACAGGC), reverse (GCATAAATACTACCTCTCCTTC), A allele (GCACATTTTGTGGAT), G allele (GCATATTTTGTGGAT). The single nucleotide polymorphism rs315726646 was analyzed in pure cross SP789 lines.

SP 7 is the paternal form of the SP789 cross with egg weight as the main breeding trait. The expression of the putative egg production enhancer allele A is 21 % in contrast to the maternal lines (SP 8 and SP 9) which are 58.5 % and 71 % respectively.

The maternal line of the SP 9 maternal form has the highest frequency of the AA genotype at 50 %. The main breeding trait of this line is egg laying performance. The manifestation of the egg performance enhancer A allele is 21 % in contrast to the maternal form lines (SP 8 and SP 9), which are 58.5% and 71% respectively. The maternal line of the SP 9 maternal form has the highest frequency of AA genotype 50 %. Egg production of hens with the AA genotype was significantly higher than that of hens with the AG and GG genotype by 7 % and 9.2 % respectively. Also, chickens with the AA genotype had significantly higher live weight at 16 weeks than chickens with the GG genotype by 2.2 %.

ПОЛИМОРФИЗМ СВИНЕЙ ПОРОДЫ ЛАНДРАС ПО ГЕНУ ESR ЭСТРОГЕНОВОГО РЕПЕПТОРА

Миколайчик И.Н., Морозова Л.А., Тимохина М.А., Масасина Е.В.

ФГОУ ВО Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева,
641300, Курганская обл., Кетовский р-н, с. Лесниково, Российская Федерация
e-mail: marinaalekseevnat@mail.ru

В качестве показателей, характеризующих генетическую структуру свиней породы ландрас и оказывающих влияние на формирование хозяйственно-продуктивных признаков, изучен анализ полиморфизма гена эстрогенового рецептора у свиней различных линий данной породы. В результате проведенных исследований учитывали частоту аллелей данного гена и его генотипов. Результаты анализа трех линий данной породы показали, что наибольшая частота встречаемости характерна для гетерозиготного генотипа.

Ключевые слова: полиморфизм, аллель, ген, эстрогеновый рецептор, порода ландрас

Современное свиноводство — это высокоразвитая отрасль с огромными производственными возможностями. В настоящее время одной из главных проблем селекционного процесса в отрасли является совершенствование генетического потенциала пород, типов и линий, изучение механизмов формирования высокой продуктивности с использованием современных технологий [4].

Поэтому важной задачей практической генетики является поиск комплексных генотипов с наиболее желательными хозяйственно-полезными признаками, максимально адаптированных к конкретным экологическим условиям [1,2].

Генетический прогресс в свиноводстве может быть достигнут только в результате комплексного применения традиционных методов селекции и современных ДНК-технологий.

Достижения современной молекулярной генетики позволяют определять гены, контролирующие хозяйственно-полезные признаки. Одним из таких генов является ген эстрогенового рецептора [2, 3].

Ген ESR – эстрогеновый рецептор, отвечает за эффективность связывания эстрогенов и тем самым влияет на многоплодие свиноматок. Он является гормональным рецептором для стероидов, рецептор прогестерона, играет важную роль в половом созревании и вынашивании беременности. Помимо этого, оказывает влияние на функционирование яичников, рост костной ткани, гомеостаз организма.

В связи с этим возникает необходимость более глубокого изучения данного гена - маркера и выявление его влияния на другие признаки животных.

Экспериментальные исследования проводили на базе научно-исследовательской лаборатории молекулярной биологии Курганской ГСХА им. Т.С.Мальцева.

Анализ ДНК и постановку ПЦР проводили согласно общепринятым методикам применения метода ПЦР в животноводстве. Статическую обработку

экспериментальных данных проводили по стандартным методикам.

Аналізу подвергались предварительно отобранные образцы ушной раковины свиней площадью 1 см² (ушные выщипы). Анализ проводили с использованием молекулярно-генетических методов исследований. Ядерную ДНК животных выделяли из 50 мкг предварительно подготовленной пробы (тонкий срез эпителия из ушной раковины) с использованием набора реагентов «Сорб-ГМО-Б» согласно прописи, предоставленной изготовителем.

По результатам анализа определяли наличие и частоту аллелей и генотипов по гену ESR.

Для определения влияния генов-маркеров на продуктивные качества свиней использовали метод ПЦР-анализа.

Выполняли ПЦР по следующему протоколу:

- 1) первичная денатурация (95 °С, 8 минут);
- 2) денатурация (95 °С, 30 секунд);
- 3) отжиг праймеров (60 °С, 45 секунд);
- 4) элонгация (72 °С, 5 секунд) X 40 циклов.

В результате проведенных исследований (таблица 1), видно, что у животных исследуемых линий преобладает гетерозиготный генотип АВ, однако его наибольшее значение отмечено у животных 2 линии (86,7%). Наибольшая частота гомозиготного генотипа АА и наименьшая частота генотипа ВВ наблюдается у представителей 3 линии. У животных 2 линии не обнаружен генотип ВВ.

Частота встречаемости аллеля А гена ESR варьирует от 0,500 ±0,091 у животных линии 1, до 0,630 ±0,091 у представителей линии 3. Наибольшая частота встречаемости аллеля В гена ESR наблюдается у представителей линии 1 0,500 ±0,091, наименьшая - у животных линии 3, что составило 0,370 ±0,088.

Исходя из данных рисунка 2, видно, что у животных 2 линии отсутствует генотип ВВ. Гетерозиготный генотип преобладает во всех исследуемых линиях.

Частота аллелей и генотипов гена ESR у свиней породы ландрас

Линия	Выборка, n (гол.)	Частота генотипов, %						Частота аллель	
		n	A	n	AB	n	B	A	B
								M±m	M±m
1	15	2	3,3	1	3,3	2	3,3	0,500±0,091	0,500±0,091
2	15	2	3,2	3	6,7	-	-	0,570±0,084	0,430±0,089
3	15	4	6,7	0	6,7	1	6,7	0,630±0,089	0,370±0,088

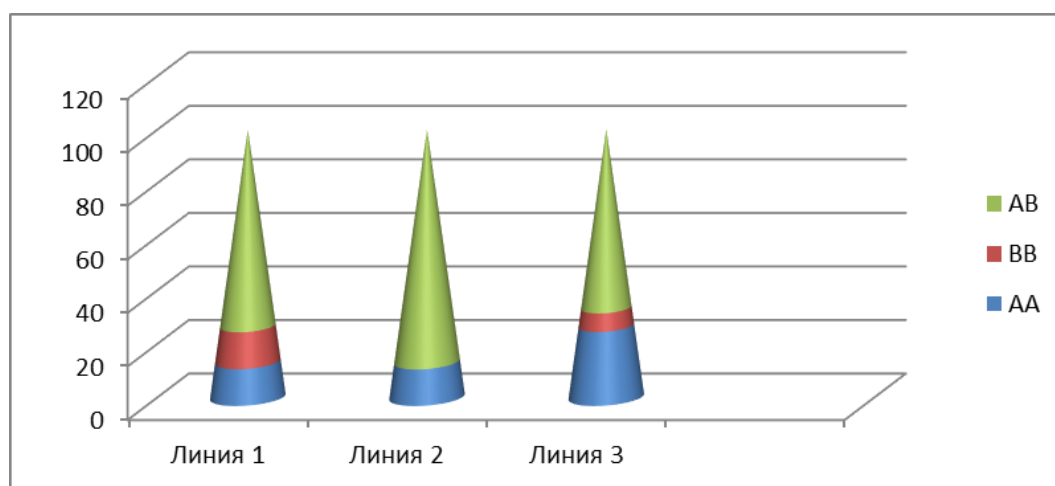


Рисунок 2. Частота генотипов гена ESR у свиней исследуемых линий породы ландрас

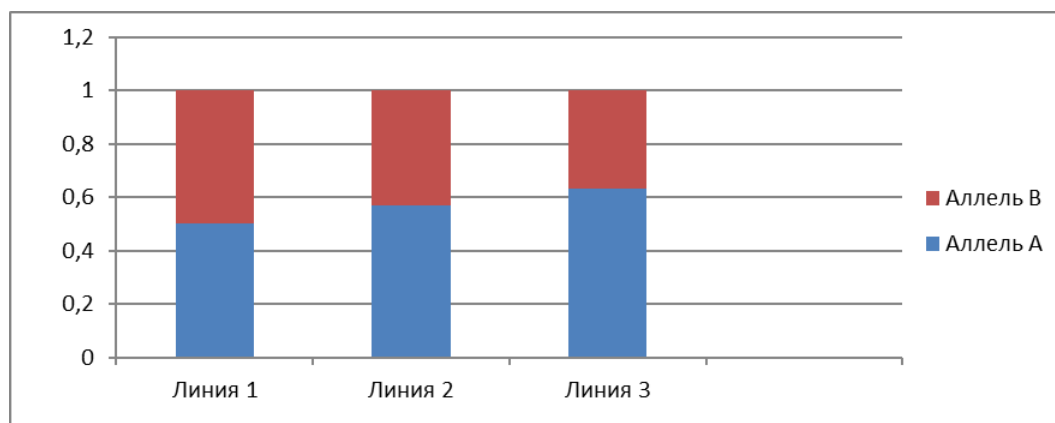


Рисунок 3. Частота аллелей гена ESR у свиней исследуемых линий породы ландрас

Частота аллелей гена ESR у свиней исследуемых линий породы ландрас представлена на рисунке 3. Исходя из данных рисунка 3 видно, что частота аллелей A и B одинакова у представителей 1 линии.

В результате проведенных исследований у животных выявлены оба аллеля гена эстрогенового рецептора. Проведенный анализ трех линий исследованной породы свиней показал, что наибольшая частота встречаемости характерна для генотипа AB, наименьшая для генотипа BB, у представителей 2 линии данный генотип не обнаружен.

Список литературы

1. Гетманцева Л.В., Карпенко Е.А., Чикотин Д.В. Использование ДНК-маркеров в селекции свиней // Перспективное свиноводство. 2012. № 1.С.20–21.
2. Маркин Н. В., Усатов А.В. Методы амплификации нуклеиновых кислот: учеб. пособие по молекулярной генетике. Ростов на Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. С. 25–30.
3. Щербатов, В.И., Тузов И.Н., Дикарев А.Г., Музыкантова Л.В. Методы комплексной оценки и ранней

диагностики продуктивности сельскохозяйственных животных: учебник. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2014. 292 с.

4. Комлацкий В.И., Величко Л.Ф. Селекция свиней: учеб. пособие. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2019. 192 с.

POLYMORPHISM OF PIGS OF THE LANDRACE BREED BY THE ESR GENE OF THE ESTROGEN REPEPTOR

Mikolajchik I.N., Morozova L.A., Timokhina M.A., Masasina E.V.

Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, Kurgan Region, Ketovsky district Russian Federation

As an indicator characterizing the genetic structure of the breed and influencing the formation of economically productive traits, the analysis of the polymorphism of the estrogen receptor gene in pigs of various lines of the Landrace breed was carried out. As a result of the conducted studies, the frequency of alleles of this gene and its genotypes were taken into account. The results of the analysis of three lines of this breed showed that the highest frequency of occurrence is characteristic of the heterozygous genotype.

Keywords: *polymorphism, allele, gene, estrogen receptor, landrace pigs*

Currently, one of the main problems of the breeding process in the industry is the improvement of the genetic potential of breeds, types and lines, the study of mechanisms for the formation of high productivity using modern technologies.

Therefore, an important task of practical genetics is the search for complex genotypes with the most desirable economically useful traits, maximally adapted to specific environmental conditions.

The achievements of modern molecular genetics make it possible to identify genes that control economically useful traits. One of these genes is the estrogen receptor gene.

Experimental studies were carried out on the basis of the research laboratory of Molecular Biology of the

Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev.

DNA analysis and PCR were performed according to generally accepted methods of using the PCR method in animal husbandry. Static processing of experimental data was carried out according to standard methods.

Based on the results of the analysis, the presence and frequency of alleles and genotypes were determined by the ESR gene. As a result of the conducted studies, both alleles of the estrogen receptor gene were identified in animals.

The analysis of three lines of the studied breed of pigs showed that the highest frequency of occurrence is characteristic of the AB genotype, the lowest for the BB genotype, this genotype was not found in representatives of the 2nd line.

УДК 57.043

ПОИСК ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ-ПРЕДИКТОРОВ УСТОЙЧИВОСТИ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ К ЗАСУХЕ И ЗАСОЛЕНИЮ

Немцова Ю.А., Кузнецова Д.В., Воденеев В.А., Гринберг М.А.

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Российская Федерация
e-mail: julnemtsova@yandex.ru*

Важным этапом получения новых сортов сельскохозяйственных растений с улучшенными характеристиками является их фенотипирование – определение морфометрических и физиологических показателей новых линий. Для оценивания продуктивности растений и их устойчивости к стрессорам, включая засуху и засоление, могут быть использованы различные показатели активности фотосинтеза. Исследования проводились на растениях ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов «Леон», «Ратник» и «Фокс». Засуха моделировалась прекращением полива; солевой стресс моделировался поливом растений раствором NaCl. Обнаружена высокая степень соответствия между ответами морфометрических и фотосинтетических показателей у растений разных сортов, соответственно, фотосинтетические показатели могут быть использованы для быстрого фенотипирования новых линий растений ячменя,

потенциально устойчивых к стрессорам. Для засухи наиболее перспективным прогностическим показателем представляется уровень $Y(II)$, отражающий активность работы фотосистемы II, в то время как для солевого стресса наилучшее соответствие продемонстрировал уровень Fv/Fm , связанный со структурной целостностью этой фотосистемы.

Ключевые слова: фенотипирование, фотосинтез, засуха, засоление, *Hordeum vulgare*

При выведении новых сортов сельскохозяйственных растений с улучшенными характеристиками одной из важных задач является разработка систем быстрого и надёжного определения качества линий, полученных методами геномной инженерии. Т.е. требуются системы высокопроизводительного фенотипирования, способные по каким-либо параметрам проростков дать информацию о потенциальной продуктивности растений. В качестве таких параметров зачастую используются различные показатели фотосинтеза, т.к. фотосинтетические процессы тесно связаны с набором биомассы и, соответственно, продуктивностью растений. Наравне с повышением продуктивности значимым направлением биотехнологических работ является усиление устойчивости растений к стрессорам, таким как неблагоприятная температура, водный режим, вызываемые патогенами болезни и т.д. Поскольку фотосинтез чутко реагирует на внешние факторы, отдельные фотосинтетические показатели потенциально могут быть использованы в качестве предикторов устойчивости к различным стрессорам. Целью настоящей работы являлся поиск фотосинтетических показателей, которые могут быть использованы в качестве предикторов устойчивости растений ячменя к засухе и засолению.

Исследования проводились на растениях ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сортов «Леон», «Ратник» и «Фокс». Семена замачивались в дистиллированной воде и проращивались на фильтровальной бумаге на протяжении 3 дней. Растения выращивались в ёмкостях с грунтом универсальным при освещении люминесцентными лампами в условиях 16-ти часового светового периода. Полив осуществлялся фиксированным объёмом водопроводной воды. Комнатная температура во время выращивания растений составляла 24°C.

Морфометрические показатели оценивались по длине листьев, сухому и сырому весу. Для регистрации уровня ассимиляции использовался инфракрасный газоанализатор GFS-3000 с измерительной головкой Dual-PAM gas-exchange Cuvette 3010-Dual (Heinz Walz GmbH, Германия). Параметры ассимиляции регистрировались на 2-м листе на расстоянии 7 см от кончика. Параметры световой стадии фотосинтеза регистрировались при помощи ПАМ-флуориметра PlantExplorer^{Pro+} (PhenoVation, Нидерланды). Расчёт фотосинтетических параметров (Fv/Fm – максимальная эффективность фотосинтеза, $Y(II)$ – квантовый выход фотосистемы II, NPQ – нефотохимическое тушение флуоресценции) производился встроенным программным обеспечением прибора. Уровень фотосинтетических показателей регистрировался на уровне целого растения. Измерениям

предшествовала темновая адаптация. Степень устойчивости к стрессовым факторам оценивалась по времени возникновения достоверных различий между стрессированной и контрольной группой, а также по величине остаточного фотосинтеза.

Условия засухи задавались прекращением полива растений. Полив прекращался на 14-й день, продолжительность засухи составляла 10 дней. Полив контрольных растений продолжался раз в 2 дня. Регистрация параметров фотосинтеза начиналась при достижении проростками возраста 12 дней, мониторинг производился раз в 2 дня на протяжении всего периода эксперимента. Морфометрические параметры измерялись однократно в последний день эксперимента.

Солевой стресс задавался поливом растений раствором NaCl с концентрацией 600 мМ. Полив солевым раствором начинался на 14-й день и производился раз в 2 дня, продолжительность наблюдений составляла 10 дней. Контрольные растения поливались водопроводной водой с той же частотой. Регистрация параметров фотосинтеза начиналась на проростках 12-дневного возраста, мониторинг производился ежедневно. Морфометрические параметры измерялись однократно в последний день эксперимента.

На первом этапе было выполнено сопоставление морфометрических показателей различных сортов ячменя в состоянии покоя, т.е. без влияния стрессоров. Показано, что сухой и сырой вес растений сортов «Ратник» и «Фокс» достоверно выше аналогичных показателей растений сорта «Леон». Обнаружено хорошее соответствие данных морфометрических показателей с интегральным показателем фотосинтеза – ассимиляцией CO_2 , а также с показателями, отражающими структурную целостность и активность работы фотосистем (Fv/Fm и $Y(II)$ соответственно).

Засуха вызывает снижение всех исследованных морфометрических показателей у всех сортов ячменя. Наибольший спад показан для растений сорта «Ратник», растения сорта «Леон» продемонстрировали наибольшую устойчивость. Из проанализированных фотосинтетических показателей наибольшей скоростью ответа на засуху обладают $Y(II)$ и NPQ. Обнаружено, что у растений сорта «Леон» спад всех фотосинтетических показателей происходит позже, чем у растений сортов «Ратник» и «Фокс». Величина остаточного фотосинтеза, оцениваемая по уровню Fv/Fm и $Y(II)$, в последний день эксперимента, была максимальной у сорта «Леон» и минимальной у сорта «Ратник». Обнаружена высокая степень соответствия между ответами морфометрических и фотосинтетических показателей у растений разных сортов,

подвергнутых засухе. В качестве показателя фотосинтеза, который с наибольшей скоростью и точноcтью отражает негативное влияние засухи на растения ячменя, был идентифицирован Y(II).

Засоление, подобно засухе, также ведёт к снижению морфометрических показателей растений. Наибольшую устойчивость к данному стрессору продемонстрировали растения сорта «Ратник», снижение величины морфометрических показателей у растений сортов «Леон» и «Фокс» было более выраженным. Проанализирована чувствительность фотосинтетических показателей к солевому стрессу. Наиболее ранние изменения имеют место для Y(II) и NPQ, однако под действием солевого стресса у всех изученных сортов растений ответы этих показателей начинались одновременно. Различий по величине остаточного уровня Y(II) между сортами также не обнаружено. По-видимому, для солевого стресса наибольшее прогностическое значение имеет уровень Fv/Fm. Этот показатель сильнее подавляется у

более уязвимых сортов «Леон» и «Фокс», а у более устойчивого к засолению сорта «Ратник» практически не отличается от контроля.

Таким образом, фенотипирование на основе флуоресценции хлорофилла может быть использовано для скрининга устойчивости новых линий ячменя к засухе и засолению. Для засухи наиболее перспективным показателем представляется уровень Y(II), отражающий активность работы фотосистемы II, в то время как для солевого стресса наилучшее соответствие продемонстрировал уровень Fv/Fm, связанный со структурной целостностью фотосистемы II. Наблюдаемые различия могут быть обусловлены природой рассмотренных стрессоров, а именно соотношением вклада осмотических и токсических повреждений, которые они вызывают в растениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект № 075-15-2021-1068).

DETECTION OF PHOTOSYNTHETIC INDICATORS-PREDICTORS OF RESISTANCE OF BARLEY PLANTS TO DROUGHT AND SALT STRESS

Nemtsova Y.A., Kuznetsova D.V., Vodeneev V.A., Grinberg M.A.

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

An important step in obtaining new varieties of agricultural plants with improved characteristics is their phenotyping - the determination of morphometric and physiological parameters of new lines. Various indicators of photosynthesis activity can be used to evaluate plant productivity and their resistance to stressors, including drought and salinity. The studies were carried out on barley plants (*Hordeum vulgare* L.) of the Leon, Ratnik and Fox varieties. Drought was modeled by stopping irrigation; salt stress was modeled by watering plants with NaCl solution. A high degree of agreement between the responses of morphometric and photosynthetic parameters in plants of different varieties was found; accordingly, photosynthetic parameters can be used for rapid phenotyping of new lines of barley plants that are potentially resistant to stressors. For drought, the Y(II) level, which reflects the activity of photosystem II, seems to be the most promising prognostic indicator, while for salt stress, the Fv/Fm level associated with the structural integrity of this photosystem demonstrated the best fit.

Keywords: phenotyping, photosynthesis, drought, salt stress, *Hordeum vulgare*

When breeding new varieties of agricultural plants with improved characteristics, one of the important tasks is the development of systems for the rapid and reliable determination of the quality of lines obtained by genetic engineering. Those systems of high-throughput phenotyping are required, capable of providing information on the potential productivity of plants and their resistance to stressors by any parameters of seedlings. Various indicators of photosynthesis are often used as such parameters. The aim of this work was to search for photosynthetic indicators that can be used as predictors of barley plant resistance to drought and salinity.

The studies were carried out on barley plants (*Hordeum vulgare* L.) of the Leon, Ratnik and Fox varieties. Morphometric parameters were evaluated by leaf

length, dry and wet weight. The parameters of the light stage of photosynthesis were recorded using a PlantExplorer^{Pro+} PAM fluorometer (PhenoVation, the Netherlands). The calculation of photosynthetic parameters (Fv/Fm is the maximum efficiency of photosynthesis, Y(II) is the quantum yield of photosystem II, NPQ is non-photochemical fluorescence quenching) was performed using the built-in software of the instrument. The drought was set by the termination of watering of plants. Salt stress was created by watering plants with a NaCl solution at a concentration of 600 mM.

Drought causes a decrease in all studied morphometric parameters in all barley varieties. The greatest decline is shown for plants of the Ratnik variety, plants of the Leon variety showed the greatest resistance. Of the analyzed photosynthetic parameters, Y(II) and NPQ

have the highest rate of response to drought. A high degree of agreement was found between the responses of morphometric and photosynthetic parameters in plants of different varieties subjected to drought. Y(II) was identified as an indicator of photosynthesis, which reflects the degree of resistance of barley plants to drought with the highest speed and accuracy.

Salinity, like drought, also leads to a decrease in the morphometric parameters of plants. Plants of the Ratnik variety showed the highest resistance to this stressor; the decrease in the value of morphometric parameters in plants of the Leon and Fox varieties was

more pronounced. The highest rate of occurrence of differences from the control level was shown for Y(II) and NPQ, however, under the influence of salt stress, in all studied plant varieties, the responses of these indicators began simultaneously. Differences in the value of the residual level of Y(II) between varieties were also not found. Apparently, for salt stress, the Fv/Fm level has the greatest prognostic value, which is consistent with morphometric changes.

Thus, photosynthetic parameters can be used for the rapid phenotyping of new barley plant lines that are potentially resistant to drought and salinity.

УДК 631.11.327:631.527

НОВЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАРКЕРЫ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЛИАДИНОДИРУЮЩИХ ЛОКУСОВ С ХЛЕБОПЕКАРНЫМИ КАЧЕСТВАМИ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ

Пырников А.С., Полховская Е.С., Милюкова Н.А.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии»
127550 г. Москва, ул. Тимирязевская 42, Российская Федерация
e-mail: andrey.pyrsikov@yandex.ru

Хлебопекарные качества зерна определяются комплексом признаков, одним из которых является содержание и состав запасных белков клейковины. Для селекции на улучшение показателей качества зерна тритикале важно установить изменчивость компонентного состава проламинов в различных сортах и линиях культуры. Применение молекулярных маркеров помогает ускорить селекционный процесс и идентифицировать локусы, кодирующие глиадины, которые в значительной степени связаны с технологическими и питательными качествами зерна.

Ключевые слова: белки клейковины, глиадины, тритикале, пшеница

Ведущей, стратегически важной группой сельскохозяйственных культур всех стран мира являются зерновые. «Основными хлебами человечества» считают пшеницу, рис и кукурузу, а в последнее время добавляют в этот список и тритикале. По мнению многих специалистов, в недалеком будущем тритикале станет одной из ведущих зерновых культур [5].

Тритикале является амфидиплоидным гибридом пшеницы и ржи, при этом культура получила от родительских форм ряд полезных характеристик: высокую урожайность, устойчивость к ряду абиотических и биотических факторов, а также невысокую требовательность к агрохимическим показателям почвы [5].

Многие исследования запасных белков пшеницы и тритикале показали их связь с качеством муки, на качество влияют запасные белки зерна, такие как глютенины и глиадины. Это основные белковые компоненты эндосперма, формирующие качество выпечки за счет создания белкового каркаса, поддерживающего его форму [6].

Однако следует учесть гибридное происхождение культуры. Важно понимать, не только

генетическую природу глиадинов/глютеинов пшеницы, но и белков зерна ржи – секалинов, а также их связь с хлебопекарными свойствами зерна.

В настоящее время для исследований биоразнообразия, филогении и эволюции используются различные молекулярно-генетические маркеры. Запасные белки зерновых культур, такие как глиадины и глютеины, являются маркерами устойчивых ассоциаций генов, обуславливающих хлебопекарные качества, что позволяет их использовать для решения практических задач.

Глиадины имеют некоторые важные достоинства в качестве информативных молекулярно-генетических маркеров, направленных на идентификацию аллелей генов белков клейковины. Во-первых, глиадины чрезвычайно полиморфны, и их генетика достаточно хорошо изучена. Во-вторых, электрофоретическая картина глиадинов является характеристикой генотипа и не изменяется при разных условиях возделывания и роста растений. В-третьих, каждый аллель *Gli* кодирует блок, состоящий как минимум из двух электрофоретических полос. Легче распознавать и различать аллели, кодирующие группы полипептидов

(блоки электрофоретических полос), чем аллели, продуцирующие отдельные слегка отличающиеся полипептиды. В-четвертых, была изучена последовательность генома ДНК из нескольких сотен генов глиадинов и некоторых крупных областей *Gli*-локусов. Структура генов, кодирующих α -, γ - и ω -глиадины, и полипептиды глиадинов, соответственно, хорошо известны. В этих генах нет интронов, и они имеют сравнительно простую систему регуляции. В-пятых, есть возможность идентифицировать более одного генотипа в одном и том же сорте (выявляя генетическую неоднородность), а также идентифицировать мутанты и примеси. По этим причинам аллели *Gli* могут успешно использоваться в качестве надежных и информативных маркеров генотипов пшеницы и могут конкурировать с ДНК-маркерами, по крайней мере, за идентификацию и дифференциацию генотипа и, таким образом, за оценку генетической изменчивости как пшеницы, так и тритикале [1,2,3,4].

Наиболее значимыми факторами качества глиадинов является размер полиглутаминовых участков, названных *PQI* и *PQII* [2]. Были разработаны праймеры для косвенной оценки качества α - и γ -глиадинов, а именно определение размера полиглутаминовых участков *PQI* и *PQII*. Праймеры *Full* разработаны на амплификацию всех возможных вариантов генов глиадинов, учитывая псевдогены. Для исключения псевдогенов выделяли РНК из семян тритикале, обрабатывали ДНКазой с последующей обратной транскрипцией и ПЦР с праймерами *Full*. После проделанных действий амплифицировали глутамин-богатые участки генов и оценивали их размеры. Так же были смоделированы новые праймеры на полиглутаминовые участки *PQI* и *PQII* (омега-глиадины), покрывающие все известные гены (исключая псевдогены) омега-глиадинов. Смоделированные праймеры будут использоваться в специфической *revRT*-qPCR (количественная ПЦР с обратной транскрипцией в реальном времени). В настоящее время проводится анализ

различных по происхождению генотипов тритикале с использованием разработанных праймеров.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ №МК-3235.2021.5.

Список литературы

1. Du X. Cloning and characterization of novel fast ω -gliadin genes in *Triticum monococcum* // *Journal of Genetics*. 2015. Vol.94(2). P. 323–327.

2. Dubois B. Molecular diversity of α -gliadin expressed genes in genetically contrasted spelt (*Triticum aestivum ssp. spelta*) accessions and comparison with bread wheat (*T. aestivum ssp. aestivum*) and related diploid *Triticum* and *Aegilops* species // *Molecular Breeding*. 2016. Vol. 36. No 11.

3. Katagiri M. Expression and development of wheat proteins during maturation of wheat kernel and the rheological properties of dough prepared from the flour of mature and immature wheat // *Food Sci. Technol. Res*. 2011. Vol. 17(2). P. 111–120.

4. Wang A. Characterization of two 1D-encoded ω -gliadin subunits closely related to dough strength and pan bread-making quality in common wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Journal of Cereal Science*. 2007. Vol. 47(3). P. 528–535.

5. Ворончихин В.В. Комплексная оценка исходного материала для селекции озимой гексаплоидной тритикале в ЦРНЗ // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук: 06.01.05. М., 2019. 10 с.

6. Энзекрей Е.С., Милюкова Н.А., Пырсигов А.С., Сыксин С.В. Связь генов проламинов с хлебопекарными качествами зерна тритикале // Сборник материалов Международной научно-практической конференции (27 ноября 2020г., г.Краснодар) / Кубанский филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН. Краснодар, 2020. 363 с.

NEW MOLECULAR MARKERS FOR ESTIMATION THE RELATIONSHIP OF GLIADIN CODING LOCUS WITH SPRING TRITICALE BAKING QUALITY

Pyrnikov A.S., Polkhovskaya E.S., Milyukova N.A.

All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

Triticale baking qualities are determined by a set of features, one of which is the content and composition of gluten. It is important to estimate the variability of the prolamins component composition in various varieties and lines for the grain quality to improve baking qualities. Molecular markers afford the opportunity to accelerate the breeding process and identify gliadin-coding loci, which are largely associated with the technological and nutritional qualities of grain.

Keywords: *gluten-forming proteins, gliadines, triticale, wheat*

At the present time various molecular genetic markers are used for studies on biodiversity, phylogeny, and evolution. Storage proteins of cereals such as

gliadins are considered to be convenient markers of stable genes associations determinant baking qualities. That allows them to be used for solving practical

problems. Effective molecular genetic markers have been developed for the identification of gliadin-encoding genes, that make it possible to establish the relationship of certain loci with the technological and nutritional qualities of triticale grain and significantly speed up the breeding process. The product amplification efficiency was confirmed by the presence of fragments of certain lengths and the absence of a PCR product in the negative control. According to literature data the size of the polyglutamine site play an important role in dough properties of triticale. The larger the polyglutamine site, the higher the quality of grain

gluten, because large number of glutamine side chains is shown to increase visco-elasticity properties of dough. Based on the obtained results, it is impossible to make a definite conclusion of the amount of gliadins in a particular cultivar or line, since it is necessary to exclude pseudogenes by means of the cDNA synthesis. In the present study the bread-making quality analysis of diverse triticale genotypes was carried out.

The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-3235.2021.5.

УДК 633.1+631.527

ОСОБЕННОСТИ СЕЛЕКЦИИ НОВЫХ СОРТОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Золотов С.А., Саркисян Д.С., Саакян С.Р., Рева Е.Н.

*Донской государственный технический университет
344000 г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, Российская Федерация
e-mail: zolotovsergey1999@mail.ru*

В статье рассмотрены многолетние зерновые культуры, а также подходы к выведению новых культур. Определены задачи селекции, основной из которых является создание новых сортов, превосходящих по хозяйственно-полезным признакам сорта, уже распространенные в производстве. Многие многолетние виды можно скрещивать с родственными однолетними культурами, что позволяет нам включать гены одомашнивания гораздо быстрее, чем это делали наши предки, которые первыми отобрали эти гены. Некоторые зерновые культуры, в том числе рожь, рис и сорго, можно скрещивать с близкими многолетними родственниками для создания новых генофондов.

Ключевые слова: селекция, многолетние зерновые культуры, гибридизация, современное сельское хозяйство, генетика

Введение

В получении высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур большая роль принадлежит использованию лучших сортов, наиболее приспособленных к возделыванию в местных условиях. Одним из важнейших средств повышения эффективности сельскохозяйственного производства является дальнейшее улучшение селекции и семеноводства. Одна из главных задач селекции – выведение неполегающих и устойчивых к болезням сортов, и гибридов зерновых культур для возделывания их на орошаемых и осушенных землях, а также в условиях применения высоких доз минеральных удобрений. Теоретическим фундаментом селекции является генетика. В основе селекционной работы лежат закономерности наследственности и изменчивости организмов, установленные и разрабатываемые генетикой. Достижения генетики имеют важное значение для развития эффективных методов селекции.

Селекция многолетних зерновых культур

В настоящее время используются два основных подхода к выведению новых культур. Первый – это

прямое одомашнивание, а второй – широкая гибридизация. Практически все однолетние злаки, потребляемые в настоящее время людьми, были выведены путем одомашнивания. Люди эпохи неолита определили желательные виды диких растений и подвергли их циклам селекции, которые благоприятствовали признакам «одомашнивания», таким как неразрушимость (сохранение семян в головках семени до сбора урожая), или однородное созревание семян как на отдельных растениях, так и среди популяций растений. Как только признаки одомашнивания были хорошо установлены или «закреплены» в популяциях, фермеры смогли практиковать фенотипический отбор для повышения урожайности семян и других желательных признаков сельскохозяйственных культур. С появлением современной генетики растений селекционеры по-прежнему полагались на фенотипический отбор, но их работа основывалась на новом сложном понимании генетических и экологических взаимодействий [1]. Сегодня некоторые селекционные программы начинают использовать некоторую степень геномной селекции, что устраняет необходимость фенотипической оценки в каждом цикле селекции. Второй подход к выведению многолетников

заключается в скрещивании существующих высокоурожайных однолетних злаков с родственными, обычно дикими, многолетними видами либо принадлежащими к тому же роду с целью внедрения генов, придающих многолетнему виду многолетие. Широкая гибридизация привлекательна тем, что в случае успеха новый гибридный вид может в значительной степени унаследовать высокоразвитые признаки, такие как урожайность и качество конечного использования, от уже одомашненного однолетнего родителя. Однако возникают проблемы, когда наборы хромосом (геномы) или число наборов хромосом (уровень пloidности) у однолетних и многолетних родителей не совпадают и/или не рекомбинируют во время мейоза [2].

Использование гибридизации в селекции полевых культур

Отдаленная гибридизация довольно широко применяется в селекции растений. На ее основе советскими селекционерами созданы многие замечательные гибридные сорта зерновых культур, полученные путем скрещивания озимой пшеницы с рожью, мягкой пшеницы с твердой, пшеницы с пыреем. Наибольший интерес в гибридизации с пшеницей представляет пырей сизый Адгоругиш *glaucum* [3]. Он обладает комплексом хозяйственно-полезных признаков: высокой зимостойкостью (хорошо зимует при температуре минус 40–45°C и полном бесснежье), большой устойчивостью к грибным болезням, высоким содержанием белка в зерне (20–22 %), большой продуктивной кустистостью, многоцветковостью (до 13 цветков в колоске), высокой продуктивностью (до 5000 зерен на одно растение), многолетним жизненным циклом и другими ценными признаками. Этот вид пырея – ближайший дикий родич пшеницы. Он широко распространен на всех континентах, что указывает на исключительную приспособляемость и выносливость этого растения.

Заключение

Разнообразие и постоянство являются ключом к созданию стабильных и устойчивых агроэкосистем. Среди диких сородичей злаковых культур многие виды уже являются многолетними и приспособлены

к разнообразным местообитаниям, для которых их большое генетическое разнообразие способствовало бы созданию широкого круга многолетних зерновых культур и сортов. Кроме того, знание того, как многолетники распределяют ресурсы в отношении вегетативного роста и урожайности семян, будет необходимо в процессе селекции, чтобы надежно обеспечить высокие урожаи зерна из года в год.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации от 01.06.2022 г. № 075-15-2022-1045, и в рамках исполнения гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1700.2021.5, соглашение № 075-15-2021-179).

Список литературы

1. Rudoy D., Pakhomov V., Olshevskaya A. et al. Review and analysis of perennial cereal crops at different maturity stages // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022111. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022111
2. Айдиев А.Я., Новикова В.Т., Емельянова А.А. и др. Новые сорта зерновых культур как результат научной кооперации // Земледелие. 2020. № 8. С. 36–39. doi:10.24411/0044-3913-2020-10807.
3. Рудой Д.В., Пахомов В.И., Мальцева Т.А. и др. Обзор и анализ многолетних зерновых культур // Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2021») 2021. С. 48–52. DOI 10.23947/itno.2021.48-52. EDN BVJLDP.
4. Tyler G. et al. Perennials as Future Grain Crops: Opportunities and Challenges // Frontiers in Plant Science. 2022. 13. 898769.
5. Рудой Д.В., Ольшевская А.В., Одабашян М.Ю., Павлов П.Д. Эфиромасличные растения и их применение в производстве. Сборник научных трудов IX Международный науч.-практич. конф. «Инновационные технологии в науке и образовании». Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2021. 157–160.

FEATURES OF BREEDING NEW VARIETIES OF GRAIN CROPS

Rudoy D.V., Olshevskaya A.V., Zolotov S.A., Sarkisyan D.S., Sahakyan S.R., Reva E.N.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The paper discusses perennial crops and approaches to the development of new crop varieties. The tasks of breeding have been determined. The main one is the creation of new varieties that are superior in terms of economic traits to varieties already common in production. Many perennial species can be hybridised with related annual crops, allowing

us to turn on domestication genes much faster than our ancestors, who first selected those genes. Some crops, including rye, rice, and sorghum, can be hybridised with close, perennial relatives to create new gene pools.

Keywords: *selection, perennial crops, hybridisation, modern agriculture, genetics*

УДК 633.111:575.162

РАЗРАБОТКА МАРКЕРА ДЛЯ ГЕНА ФАКТОРА, РЕГУЛИРУЮЩЕГО РОСТ *ScGRF3-2R*

Черноок А.Г., Баженов М.С., Дивашук М.Г.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии»
127550 г. Москва, ул. Тимирязевская 42, Российская Федерация
e-mail: iab@iab.ac.ru

Гены *Grf* (*Growth-regulating factors*) являются специфическими для растений факторами транскрипции, которые регулируют рост растений. Мы частично секвенировали ген-гомолг пшеничного гена *Grf3* на хромосоме 2R у образцов ржи и тритикале, обнаружили у него два гаплотипа и создали кодоминантный ПЦР-маркер для их определения. С помощью нового маркера мы изучили влияние аллелей *ScGrf3-2R* среди образцов коллекции гибридов яровой тритикале, полученных от скрещивания Валентин90хДублет и выращенных в условиях 2-летних полевых испытаний. Аллель, обозначенный нами как *ScGrf3-2Ra*, был связан с большей массой 1000 зёрен и большей продуктивностью колоса.

Ключевые слова: *growth-regulating factor (Grf), хозяйственно-ценные признаки, молекулярный маркер, тритикале*

Факторы, регулирующие рост *Grf* (*Growth-Regulating Factor*), представляют собой транскрипционные белки, специфичные для растений, которые играют важную роль в регуляции роста и развития. В первых исследованиях функция *Grf* была определена только в развитии листьев и стеблей [1,2]. Недавние исследования показали функции *Grf* в других аспектах биологии растений, таких как цветение, развитие семян и корней, контроль роста в условиях стресса и регуляция продолжительности жизни растений [3,4]. С момента открытия первого гена *Grf* о них сообщалось у различных видов. В частности, выявлено девять членов семейства *Grf* у *Arabidopsis thaliana* [2], 14 у кукурузы [5], 12 у риса [6] и 30 у мягкой пшеницы [7]. У *Arabidopsis thaliana* нокаут-мутанты генов *Grf* развивают более мелкие листья по сравнению растениями дикого типа [2]. У риса усиление экспрессии генов *Grf* приводит к значительному увеличению длины метелки и параметров зерновки [8]. Сверхэкспрессия *Grf1* в кукурузе увеличивает количество делящихся клеток, что приводит к более крупным листьям [9].

Тритикале (*x Triticosecale* Wittmack) – представляет собой межродовой амфидиплоид пшеницы (*Triticum* ssp.) и ржи (*Secale* ssp.). Тритикале сочетает высокий потенциал урожайности пшеницы с зимостойкостью, полученной от ржи [10]. Зерно тритикале используется в качестве фуража, продукты переработки используются в производстве биотоплива, органических и промышленных химикатов, в производстве напитков, а также хлебобулочных изделий [11].

Для частичного секвенирования гена *ScGrf3-2R* мы использовали сорта озимой ржи Новая Эра (Всероссийский институт растениеводства имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург) и Саратовская 7 (Федеральный Аграрный Научный Центр Юго-Востока, Саратов), а также сорта гексаплоидной яровой тритикале Дублет (Danko Hodowla Roślin, Польша) и озимой тритикале Хонгор (Национальный центр зерна имени П. П. Лукьяненко, Краснодар). Секвенированный нами фрагмент гена охватывает большую часть 3-го интрона и последний 4-й экзон гена, включая небольшую часть 3'UTR. Мы разработали кодоминантный STS (Sequence-Tagged Site)-маркер для определения аллельного состояния гена *ScGrf3-2R* у линий тритикале, основанный на присутствии инсерций/делений в 3-ем интроне гена. Секвенирование ПЦР-ампликонов показало, что как у ржи, так и у тритикале присутствуют два различных аллеля этого гена. Аллель, найденный нами в референсном геноме ржи Lo7, а также присутствующий у образца ржи Саратовская 7 и тритикале Дублет мы обозначим как *ScGrf3-2Ra*, а аллель, обнаруженный у тритикале Хонгор, мы обозначим как *ScGrf3-2Rb*. Рожь Новая Эра оказалась гетерозиготной, у неё были обнаружены оба аллеля: *ScGrf3-2Ra* и *ScGrf3-2Rb*. Размеры ампликонов для гаплотипа *ScGrf3-2Ra* составляют 220 п. н. (рожь Саратовская 7, тритикале Дублет), а для гаплотипа *ScGrf3-2Rb* – 180 п. н. (рожь Новая Эра, тритикале Хонгор).

В качестве материала для исследования влияния гена *ScGrf3-2R* на хозяйственно-ценные признаки, мы

использовали линии – потомства растений F3 в гибридной комбинации озимой тритикале Валентин 90 (*ScGrf3-2Rb ScGrf3-2Rb*) x яровой тритикале Дублет (*ScGrf3-2Ra ScGrf3-2Ra*). Растения были генотипированы с использованием разработанных праймеров: SCGRF3-2R-HF: CCTGCTTTAAAATGTGCAGCAAC, SCGRF3-2R-HR:AGACTTGCAGCATAGT GACCAA.

Полевой опыт производился в 2018 и 2019 годах на полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева (Москва). У растений оценивались хозяйственно ценные признаки: высота, длина главного колоса, число колосков, общая кустистость, число и длина междоузлий, масса и число зерна с главного колоса, плотность колоса, масса 1000 зёрен, масса зерна с подгонов. Анализ статистических данных проводили при помощи дисперсионного анализа и критерия Тьюки.

В оба года испытаний аллель *ScGrf3-2Ra* оказал положительное влияние на продуктивность главного колоса. Масса зерна в главном колосе у линий, несущих *ScGrf3-2Ra*, была больше на 0,17 г (9 %) в 2018 и на 0,3 г (12 %) в 2019 году, чем у линий с аллелем *ScGrf3-2Rb*. Увеличение продуктивности происходило как за счет увеличения количества зёрен в колосе на 3 шт (7 %) в 2018 и на 5 шт (9 %) в 2019 году, так и за счет увеличения массы 1000 зёрен на 1 г (2 %) в оба года. По результатам однофакторного анализа, аллельное состояние гена *ScGrf3-2R* показало значимую связь с высотой растений. Рекомбинантные линии яровой тритикале, имеющие аллель *ScGrf3-2Ra*, были ниже в среднем на 8 см (10 %) в 2018 году и на 3,7 см (5 %) в 2019 году, чем линии, имеющие аллель *ScGrf3-2Rb*.

В нашей работе мы разработали и апробировали молекулярный маркер позволяющий различать аллельно состояние гена *ScGrf3-2R*. В проведенных нами полевых опытах было показано положительное статистически значимое влияние гена *ScGrf3-2R* на важные хозяйственно-ценные признаки растений. Мы предполагаем, что ген *ScGrf3-2R* может быть использован в селекции ржи и тритикале для создания новых сортов с улучшенными признаками, а созданный нами маркер поможет быстро включить аллели этого гена в селекционный процесс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 574, № государственного задания 0431-2022-0001.

Список литературы

1. van der Knaap E., Kim J. H., Kende H. A novel gibberellin-induced gene from rice and its potential regulatory role in stem growth //Plant physiology. 2000. Т. 122. №. 3. С. 695–704.
2. Kim J.H., Choi D., Kende H. The *AtGRF* family of putative transcription factors is involved in leaf and cotyledon growth in *Arabidopsis* //The Plant Journal. 2003. Т. 36. №. 1. С. 94–104.
3. Bao M. et al. miR396a-mediated basic helix-loop-helix transcription factor bHLH74 repression acts as a regulator for root growth in *Arabidopsis* seedlings //Plant and Cell Physiology. 2014. Т. 55. №. 7. С. 1343–1353.
4. Debernardi J. M. et al. Post-transcriptional control of *GRF* transcription factors by micro RNA miR396 and G1F co-activator affects leaf size and longevity //The Plant Journal. 2014. Т. 79. №. 3. С. 413–426.
5. Zhang D. F. et al. Isolation and characterization of genes encoding *GRF* transcription factors and G1F transcriptional coactivators in Maize (*Zea mays* L.) //Plant Science. 2008. Т. 175. №. 6. С. 809–817.
6. Choi D., Kim J. H., Kende H. Whole genome analysis of the *OsGRF* gene family encoding plant-specific putative transcription activators in rice (*Oryza sativa* L.) //Plant and Cell Physiology. 2004. Т. 45. №. 7. С. 897–904.
7. Huang W. et al. Genome-wide analysis of growth-regulating factors (*GRFs*) in *Triticum aestivum* //PeerJ. 2021. Т. 9. С. e10701.
8. Che R. et al. Control of grain size and rice yield by GL2-mediated brassinosteroid responses //Nature plants. 2015. Т. 2. №. 1. С. 1–8.
9. Nelissen, H., et al. (2015). Dynamic changes in ANGUSTIFOLIA3 complex composition reveal a growth regulatory mechanism in the maize leaf. *Plant Cell* 27: 1605–1619.
10. FAO (2004) *Triticale Improvement and Production*. In: Mergoum M, Gomez-Macpherson H (eds) Rome: plant production and protection paper. FAO, Rome.
11. Leonova S. et al. *Triticale flour in bakery and rusk products* //Food Science and Technology International. 2021. С. 10820132211023273

MARKER DEVELOPMENT FOR GROWTH REGULATING FACTOR GENE *ScGRF3-2R*

Ghernook A.G., Bashenov M.S., Divashuk M.G.

All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

Grf genes (growth regulating factors) are plant-specific transcription factors that regulate plant growth. We partially sequenced the gene-homolog of the wheat *Grf3* gene on chromosome 2R in rye and triticale samples, found two haplotypes in it, and determined the codominant PCR marker for their determination. Using the new marker, we studied the *ScGrf3-2R* alleles among the samples of the collection of spring triticale hybrids that affect the crossing of Valentin90xDoulet and grown in a 2-year field experiments. The allele assigned by us as *ScGrf3-2Ra* was associated with a higher mass of 1000 grains and higher productivity of the spike.

Keywords: growth-regulating factor (*Grf*), economically valuable traits, molecular marker, triticale

Growth-regulating factors *Grf* (*Growth-Regulating Factor*) are plant-specific transcription proteins that play an important role in the regulation of growth and development. In the first studies, the function of *Grf* was determined only in the development of leaves and stems [1,2]. Recent studies have shown the functions of *GRF* in other aspects of plant biology [3,4]. Since the discovery of the first *Grf* gene, they have been reported in various species (*Arabidopsis thaliana*, *Zea mays*, *Oryza sativa*, *Triticum aestivum*) [5-7]. In *Arabidopsis thaliana*, *Grf* gene knockout mutants develop smaller leaves compared to wild type plants [2]. In rice, increased expression of the *Grf* genes leads to a significant increase in panicle length and grain parameters [8]. Overexpression of *Grf1* in maize increases the number of dividing cells, resulting in larger leaves [9].

Triticale (x *Triticosecale* Wittmack) is an intergeneric amphidiploid of wheat (*Triticum* ssp.) and rye (*Secale* ssp.). Triticale combines the high yield potential of wheat with the winter hardiness obtained from rye [10]. Triticale grain is used as fodder, processed products are used in the production of biofuels, organic and industrial chemicals, in the production of beverages, as well as bakery products [11].

For partial sequencing of the *ScGrf3-2R* gene, we used winter rye varieties, as well as varieties of hexaploid spring triticale. The gene fragment sequenced by us covers most of the 3rd intron and the last 4th exon of the gene, including a small part of the 3'UTR. We have developed a codominant STS (Sequence-Tagged Site) marker to determine the allelic state of the *ScGrf3-2R* gene in triticale lines, based on the presence of insertions/deletions in the 3rd intron of the gene.

As a material for studying the effect of the *ScGrf3-2R* gene on economically valuable traits, we used lines

- progeny of F3 plants in a hybrid combination of winter triticale Valentin 90 (*ScGrf3-2Rb ScGrf3-2Rb*) x spring triticale Dublet (*ScGrf3-2Ra ScGrf3-2Ra*). Plants were genotyped using the developed primers.

The field experiment was carried out in 2018 and 2019 at the field experimental station of the RGAU-MSHA named after K. A. Timiryazev (Moscow). In plants were evaluated economically valuable traits. Statistical data were analyzed using ANOVA and Tukey's test.

The grain mass in the main spike in the lines carrying the *ScGrf3-2Ra* was 0.17 g (9 %) more in 2018 and 0.3 g (12 %) in 2019 than in the lines with the *ScGrf3-2Rb* allele. The number of grains per spike was increase by 3 pcs (7 %) in 2018 and by 5 pcs (9 %) in 2019, and the mass of 1000 grains was increase by 1 g (2 %) in both years. Recombinant spring triticale lines carrying the *ScGrf3-2Ra* allele were lower on average by 8 cm (10 %) in 2018 and 3.7 cm (5 %) in 2019 than the lines carrying the *ScGrf3-2Rb* allele.

In our work, we have developed and tested a molecular marker that makes it possible to distinguish the allelic state of the *ScGrf3-2R* gene. In our field experiments, a positive statistically significant effect of the *ScGrf3-2R* gene on important economically valuable traits of plants was shown. We assume that the *ScGrf3-2R* gene can be used in rye and triticale breeding to create new varieties with improved traits, and the marker we created will help to quickly include alleles of this gene in the breeding process.

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 574, state order no. 0431-2022-0001.

Секция

**РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ**

RADIATION BIOLOGY RESEARCH IN AGRICULTURE



АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОРАСТАНИЯ *ARABIDOPSIS THALIANA* ЛИНИИ *CML39* ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБИОТИЧЕСКИХ СТРЕССОРОВ

Бабина Д.Д., Подобед М.Ю., Блинова Я.А., Шестерикова Е.М., Празян А.А., Подлущкий М.С., Волкова П.Ю., Бондаренко Е.В.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: babinadd@gmail.com

В работе изучалось влияние абиотических стрессовых факторов, таких как облучение, засоление, повышенная температура, оксидативный и осмотический стресс на прорастание семян *Arabidopsis thaliana* мутантной линии *cml39* в сравнении с диким типом Col-0 и на площадь поверхности листьев ювенильных растений. Полученные результаты подтверждают важную роль кальциевого сенсора CML39 в передаче сигналов и индукции физиологических процессов в ответ на воздействие различных абиотических факторов, включая γ -излучение.

Ключевые слова: *A. thaliana*, *cml39*, γ -излучение, гипертермия, засоление, оксидативный стресс, осмотический стресс

Растения, ведущие прикрепленный образ жизни, полагаются на сложные сигнальные пути, чтобы справиться с неблагоприятными условиями окружающей среды. В условиях изменяющегося климата и нарастающего воздействия техногенных загрязнений актуальной задачей представляется изучение путей сигнальной трансдукции, отвечающих за стрессовый ответ растения [1]. Кальций (Ca^{2+}) является ключевым вторичным мессенджером в растительных клетках, который участвует в росте, развитии и стрессовых реакциях растений. Ca^{2+} распознается кальциевыми сенсорами, одним из которых является кальмодулин-подобный белок CML. Было обнаружено, что гены CML участвуют в росте, развитии, клеточном метаболизме и стрессоустойчивости растений. Для изучения роли кальциевого сигналинга в ответ на некоторые абиотические стрессоры была выбрана линия *A. thaliana cml39* с мутацией в гене кальциевого сенсора CML39. Линия *cml39* отличается более короткими стручками, меньшим количеством семян в стручке, более быстрым прорастанием, в сравнении с диким типом. Семена *cml39* не чувствительны к холодовой стратификации, а проростки менее чувствительны, чем дикий тип, к ингибированию абсцизовой кислотой или обработкам, нарушающим биосинтез гибберелловой кислоты [2].

Семена были подвергнуты воздействию γ -излучения в диапазоне доз 25–300 Гр, гипертермическому воздействию при 50 °С в течении 2–6 часов, осмотическому стрессу полиэтиленгликолем (ПЭГ) 1–5 %, оксидативному стрессу метилвиологеном (МВ) 0,001 – 1 мкМ и засолению NaCl 5 – 50 мМ. В качестве контрольного генотипа использовали дикий тип (экотип Col-0). Все эксперименты проводились на двух генотипах одновременно.

В экспериментах использовали по 60–100 семян каждой линии, предварительно стратифицированных

в течение семи суток при +4 °С и распределенных по трем чашкам Петри. Для выращивания *A. thaliana* использовали питательную среду Мурасиге-Скуга половинной концентрации. Семена дикого типа и мутантной линии облучали на уникальной научной установке ГУР-120 в ФГБНУ ВНИИРАЭ (источник γ -квантов – ^{60}Co) в бумажных пакетах. Дозы острого облучения составили 25, 50, 100, 150, 200 и 300 Гр при мощности дозы 520 Гр/ч. Засоление моделировали добавлением в среду NaCl (M = 58.4 г/моль, Serva). Соль NaCl добавляли в среду перед автоклавированием в концентрациях 5, 10, 25 и 50 мМ. Окислительный стресс моделировали с помощью добавления в среду метилвиолгена (МВ, N,N'-диметил-4,4'-дипиридил дихлорид, M = 257.16 г/моль, Sigma-Aldrich) в концентрациях 0.001, 0.01, 0.1 и 1 мкМ перед автоклавированием. В качестве агента для создания дефицита воды на среде использовали полиэтиленгликоль (ПЭГ) (молярный вес 5000–7000 г/моль, PanReac Appllichem). Использовались концентрации 1, 2.5, 5 % ПЭГ. При моделировании гипертермического воздействия семена нагревали в термостате (BINDER BD 115) в бумажных конвертах при температуре 50 °С. Время нагрева составляло 0, 2, 4 и 6 часов.

Проростки выращивали в фитотроне в режиме длинного дня (16 ч / 8 ч) при температуре +21 °С днем и +20 °С ночью. Влажность поддерживалась на уровне 55 %. Плотность фотосинтетического фотонного потока составляла 80 мкмоль·с⁻¹·м⁻². Всхожесть семян оценивали в течение первых пяти-шести суток после переноса в фитотрон по разрыву эндосперма и появлению корешка.

Для анализа динамики прорастания семян было рассчитано 44 параметра, описывающие время прорастания, скорость и энергию прорастания, гомогенность и синхронность прорастания [3]. Из всех

показателей прорастания были выбраны 7 наиболее информативных параметров:

1. Weighted germination percentage (WeighGermPercent) – взвешенный процент прорастания (%), рассчитанный путем придания максимального веса семенам, которые прорастают первыми, и уменьшения веса позже проросших семян.

2. MeanGermTime – среднее время прорастания (дни) – средняя продолжительность времени, необходимая для максимальной всхожести партии семян.

3. VarGermTime – коэффициент вариации времени прорастания, который можно использовать в качестве критерия дружности прорастания.

4. GermSpeedCorrected – скорректированный индекс энергии прорастания (дни⁻¹). Индекс энергии прорастания (т.е. скорость прорастания, применительно к общему количеству семян, проросших за определённый промежуток времени), делённый на процент всхожести.

5. CVG – скоростной коэффициент прорастания Котовского (произведение средней скорости прорастания, умноженной на 100 %).

6. Timson's index – Индекс Тимсона или индекс энергии прорастания, который представляет собой нарастающий итог кумулятивного процента прорастания, фиксирующийся через определенные интервалы в течение установленного периода времени, также используется для измерения скорости прорастания.

7. GermUncertainty – Индекс U – показатель синхронности. Низкие значения индекса U указывают на более синхронизированное прорастание.

Измерение площади поверхности листьев проводили на 11-е сутки после прорастания с помощью программного обеспечения Easy Leaf Area.

Расчёт показателей прорастания был выполнен с помощью пакета Germinationmetrics для R [4] с использованием данных частичного подсчета всхожести. Для статистического анализа использовали программы MS Office Excel 2019, Python 3.8 и среды программирования R версии 3.6.3. Для определения статистической значимости различий между двумя выборками использовали тест Манна-Уитни (U-тест). Для сравнения трёх и более групп проведен непараметрический дисперсионный анализ данных по критерию Краскела-Уоллиса. В случае статистической значимости полученного результата выполнялся апостериорный тест Данна с поправкой на множественность по методу Холма-Бонферрони.

Диаграммы размахов исследуемых параметров прорастания семян линии *cm139* представлены на Рисунке 1, который наглядно демонстрирует, что дозы γ -излучения 100 Гр и выше статистически значимо уменьшали всхожесть семян, скорость их прорастания и увеличивали вариацию времени прорастания (семена прорастали менее дружно).

Статистически значимо увеличивался взвешенный процент прорастания у дикого типа Col-0 при

нагревании семян в течение 2 часов. Для мутантной линии *cm139*, семена которой нагревали в течение 2 и 4 часов, взвешенный процент прорастания значимо уменьшался с увеличением продолжительности нагрева. Значимое снижение среднего времени прорастания, коэффициента вариации времени прорастания и индекса синхронизации было при двухчасовом нагреве семян *cm139*. При этой продолжительности нагрева скорректированный индекс энергии прорастания, наоборот, значимо увеличивался, а индекс Тимсона снижался при увеличении времени нагрева.

Площадь поверхности листьев ювенильных растений, выросших из семян подвергшихся нагреву в течение 2, 4 и 6 часов, значимо увеличивалась, относительно контрольных растений, у дикого типа (Col-0) при самом длительном нагреве, в то время как у мутантной линии *cm139* аналогичная картина наблюдалась при продолжительности нагрева в течение 2 часов.

При действии оксидативного стресса было значимое снижение индекса Тимсона для дикого типа. С увеличением концентрации МВ средняя площадь поверхности листьев всех изучаемых генотипов значимо снижалась, но мутантная линия *cm139* была более устойчива по сравнению с диким типом.

При модуляции засухи среднее время прорастания у дикого типа Col-0 было выше, чем у *cm139*, в то время как взвешенный процент прорастания, скорректированный индекс энергии прорастания и индекс Тимсона у мутантной линии были выше.

Значимое увеличение коэффициента вариации времени прорастания было отмечено для семян дикого типа Col-0, прораставших на среде с концентрацией 25 и 50 мМ NaCl, относительно контрольных семян. Значимое увеличение данного параметра было также отмечено и у мутантной линии *cm139* при концентрации 50 мМ. Синхронизация прорастания значимо увеличивалась у Col-0 (при концентрациях 25 мМ и 50 мМ) и *cm139* (при концентрации 50 мМ).

Выявленные нарушения параметров прорастания семян и развития ювенильных растений, менее выраженные у линии *cm139*, свидетельствуют о важной роли кальциевого сенсора *CML39* в передаче сигналов и индукции Ca^{2+} -зависимых физиологических процессов в ответ на воздействие различных абиотических факторов, включая γ -излучение. Для выявления молекулярных механизмов передачи сигналов представляет интерес дальнейшее изучение сочетанного воздействия данных стрессовых факторов на рост и развитие *cm139*.

Исследования выполнены по Государственному заданию № FGNE-2022-0004 «Исследование молекулярных и биохимических механизмов ответных реакций модельных и сельскохозяйственных растений на действие ионизирующих излучений и абиотических стрессовых факторов».

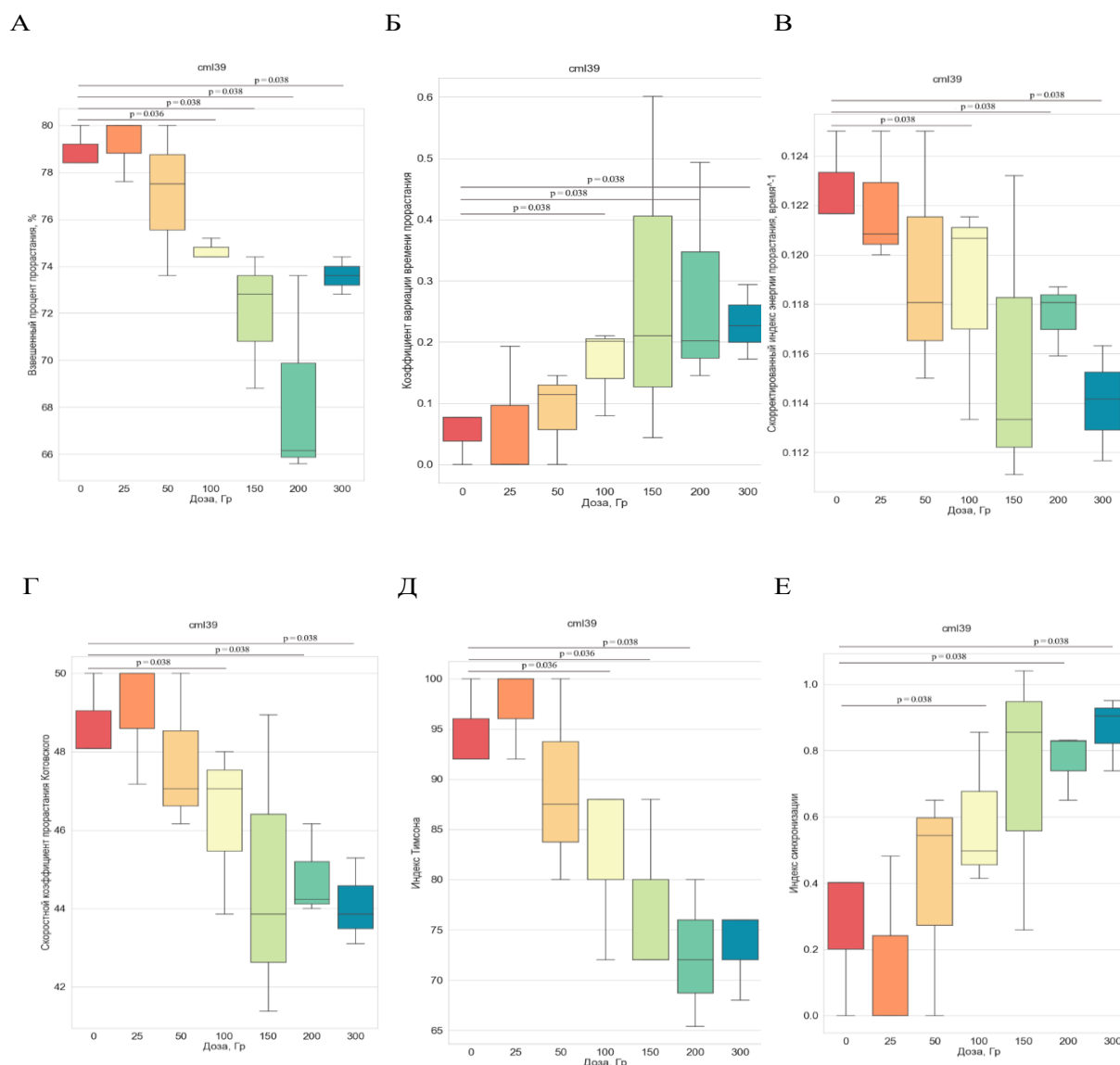


Рисунок 1. Диаграммы размахов параметров прорастания в зависимости от дозы облучения для семян генотипа *cml39* (срок хранения 40 дней, режим стратификации: 7 дней до облучения). Показатели:

- А.** Взвешенный процент прорастания; **Б.** Коэффициент вариации времени прорастания; **В.** Скорректированный индекс энергии прорастания; **Г.** скоростной коэффициент прорастания Котовского; **Д.** Индекс Тимсона или индекс энергии прорастания; **Е.** Индекс синхронизации прорастания

Список литературы

1. *Pereira A.* Plant abiotic stress challenges from the changing environment // *Frontiers in Plant Science.* 2016. Vol. 7. 1123.

2. *Midhat U. et al.* The calmodulin-like protein, CML39, is involved in regulating seed development, germination, and fruit development in *Arabidopsis* // *Plant Molecular Biology.* 2018. Vol. 96. P. 375–392.

3. *Ranal M.A., Santana D.G.* How and Why to Measure the Germination Process // *Brazilian Journal of Botany.* 2006. Vol. 29(1). P. 1–11. doi:10.1590/S0100-84042006000100002

4. *Aravind J., Vimala Devi S., Radhamani J. et al.* Germination metrics: Seed Germination Indices and Curve Fitting // R package version 0.1.3. 2019.

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF *ARABIDOPSIS THALIANA* GERMINATION AFTER THE ACTION OF ABIOTIC STRESSORS

Babina D.D., Podobed M. Yu., Blinova Ya.A., Shesterikova E.M., Prazyan A.A., Podlutskii M. S., Volkova P.Yu., Bondarenko E.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The influence of abiotic stress factors such as irradiation, salinity, heat, oxidative and osmotic stress on the germination of *A. thaliana* seeds of mutant line *cml39* in comparison with the wild type Col-0 and on the leaf surface area of juvenile plants were studied. The results obtained confirm the important role of the CML39 calcium sensor in signal transduction and induction of physiological processes in response to various abiotic factors, including γ -radiation.

Keywords: *A. thaliana*, *cml39*, gamma radiation, hyperthermia, salt stress, oxidative stress, osmotic stress

УДК 633.1+57.042

ЧАСТОТА И СПЕКТР ХРОМОСОМНЫХ АБЕРРАЦИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА *Hordeum vulgare* L.

Бабина К.В., Амосова Н.В.

*Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040 Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д.1, Российская Федерация
e-mail: babinakv@oiate.ru*

Представленные в работе вариации сочетания ионов алюминия с другими физическими факторами, такими как ионы цинка и гамма-облучение, свидетельствуют о существовании путей снижения его токсичности для растительных организмов с помощью эффектов гормезиса и антагонизма. Процент частоты хромосомных aberrаций, вызванный подвижными формами алюминия, полностью перекрывается лишь в случае с гамма-облучением, однако, существенное снижение показателя фиксируется и с ионами Zn^{2+} в концентрации 5,0 мг/л. Спектр хромосомных aberrаций, включающий центрические и ацентрические кольца, парные, непарные фрагменты и мосты, колеблется как в пределах одного сорта, что связано с условиями эксперимента, так и в ряду сортов.

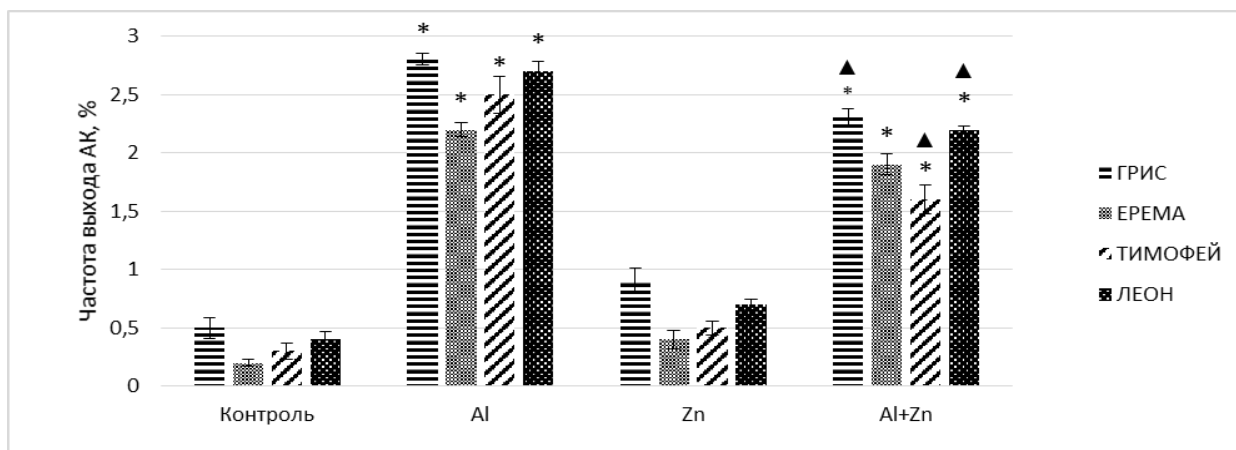
Ключевые слова: ячмень, γ -облучение, ионы алюминия и цинка, радиационный гормезис

В настоящее время все компоненты биологических систем подвержены антропогенному влиянию, темпы которого растут в геометрической прогрессии. В современных реалиях вызывает опасение наличие подвижных форм тяжелых металлов, в частности – алюминия, в основе почвообразующих пород, что сказывается на плодородности почв. В результате этих изменений снижаются показатели качества растительного сырья и возникают другие неблагоприятные последствия [4]. Выявление способов устойчивости растений к данному металлу является одной из ключевых задач в этой проблеме [5].

В последнее время все большее внимание уделяется не отдельным стрессовым факторам, но их поликомпонентному воздействию на биоту [1]. Агенты физической или химической природы, губительно

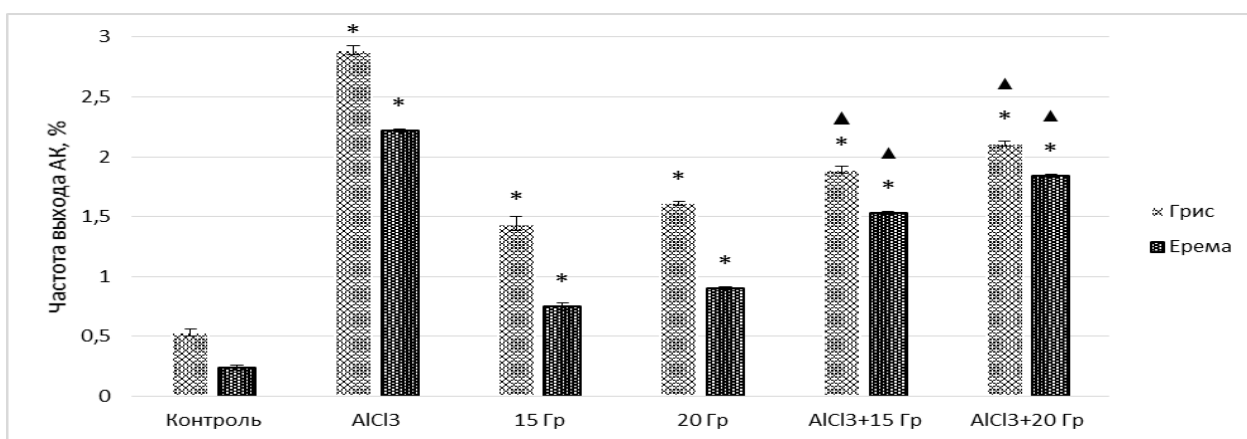
действующие при единоличном присутствии, применяемые в совокупности способны дать диаметрально противоположный стимулирующий эффект. Причем данная ситуация наблюдается как для представитель одной группы веществ, например, ионов тяжелых металлов – алюминия и цинка, так и для различных по природе стрессоров – алюминий и гамма-облучение [2].

Экспериментально полученные данные, представленные на рисунке 1 и 2, свидетельствуют об увеличении частоты aberrантных клеток в присутствии как ионов Al^{3+} , так и ионов Zn^{2+} , и γ -облучения. Тем не менее, необходимо заметить значительное сокращение негативного эффекта вплоть до его полного нивелирования при комбинировании данных факторов.



* - различия с контролем значимы при $p < 0,05$; ▲ - различия с вариантом Al^{3+} значимы при $p < 0,05$

Рисунок 1. Частота aberrантных клеток (%) ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L) при раздельном и комбинированном действии ионов Al^{3+} и Zn^{2+} в концентрациях, равных 0,5 мг/л и 5,0 мг/л соответственно



* - различия с контролем значимы при $p < 0,05$; ▲ - различия с вариантом Al^{3+} значимы при $p < 0,05$

Рисунок 2. Частота aberrантных клеток (%) ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L) при раздельном и комбинированном действии ионов Al^{3+} (0,5 мг/л) и γ -облучения в дозах 15 и 20 Гр (при мощности – 58 Гр/ч)

Итогом содержания ионов алюминия в растворе для проращивания семян ячменя было повышение числа aberrантных клеток в 7,4 раза в среднем по сортам по сравнению с контролем.

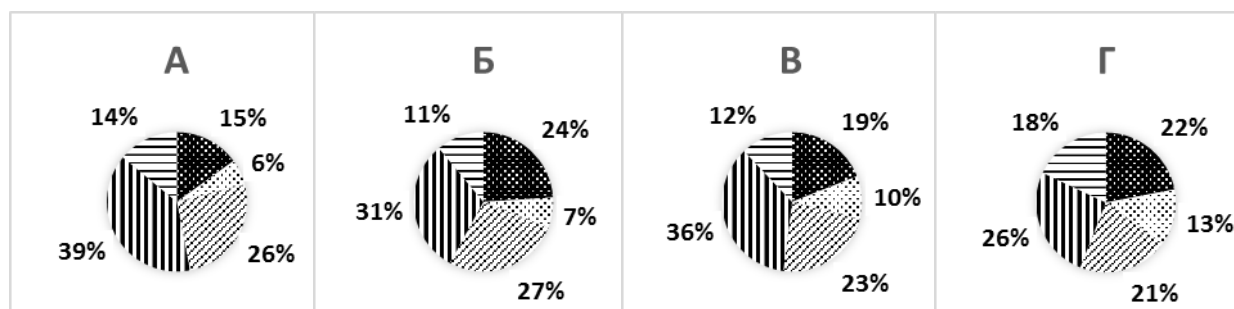
Совместное присутствие ионов двух металлов снижает выход aberrантных клеток в 1,3 раза по сравнению с индивидуальным пребыванием в растворе алюминия, тогда как предпосевное облучение понижает этот показатель в 4 и в 7 раз для сортов Грис и Ерема соответственно. В дополнение можно заметить, что наличие только предпосевого γ -облучения влекло за собой увеличение изучаемого показателя только в 3 раза в среднем по сортам для обеих доз.

В ходе исследования были выявлены хромосомные aberrации 5 видов: одиночные и парные фрагменты, центрические, ацентрические кольца и мосты. Их соотношение варьирует в зависимости от

комбинации стрессоров. Также, на это в значительной степени влияет сорт ячменя, что наглядно представлено на рисунке 3.

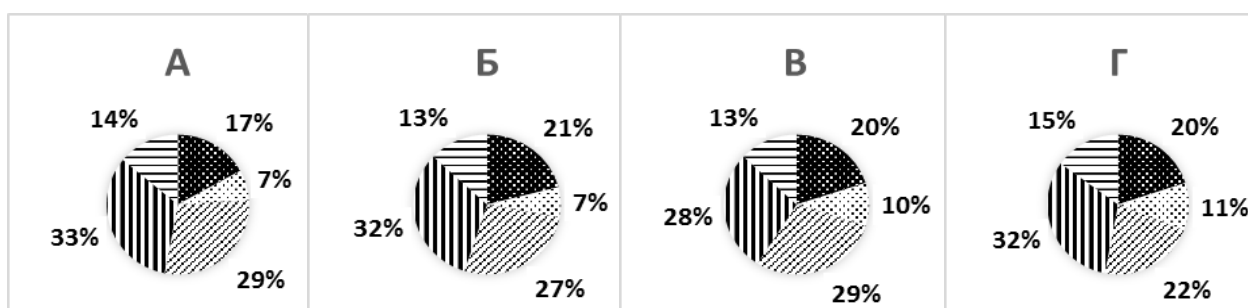
Совокупность ионов тяжелых металлов, в значительной степени, снижая частоту aberrантных клеток, практически не вносит изменений в их спектр: оба случая характеризуются преобладанием парных и одиночных фрагментов, тогда как процент ацентрических колец колеблется около 10% (рис.4).

В опыте с γ -излучением важен не только факт сокращения числа aberrантных клеток, но и сопутствующие изменения в процентном распределении их видов: преобладание одиночных фрагментов, что отражено на рисунке 5. В данной ситуации доля мостов и центрических колец выходит на один уровень и колеблется около 17–18%; количество же ацентрических колец по-прежнему мало, но в отличие от предшествующего опыта превышает 10%.



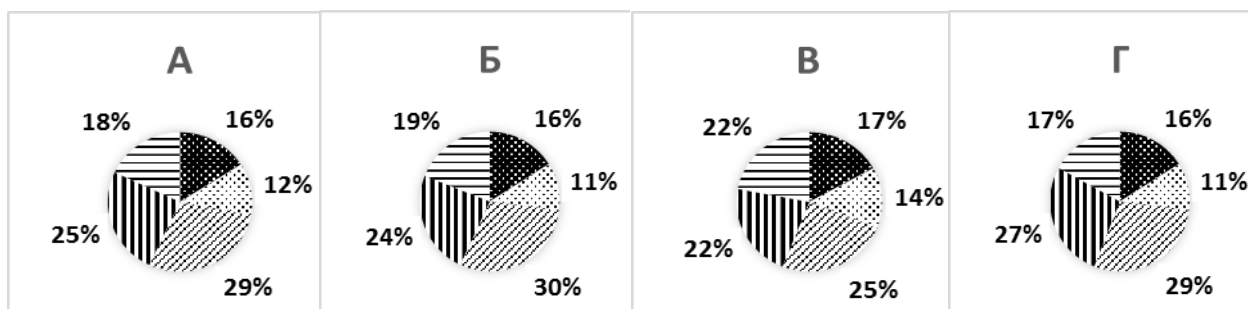
■ Центрические кольца ❖ Ацентрические кольца // Одиночные фрагменты || Парные фрагменты = Мосты

Рисунок 3. Доля aberrantных клеток каждого вида при действии ионов Al^{3+} в концентрации равной 0,5 мг/л для ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L) различных сортов: А – Грис; Б – Ерема; В – Тимофей; Г – Леон



■ Центрические кольца ❖ Ацентрические кольца // Одиночные фрагменты || Парные фрагменты = Мосты

Рисунок 4. Доля aberrantных клеток каждого вида при комбинированном действии ионов Al^{3+} (0,5 мг/л) и Zn^{2+} (5,0 мг/л) для ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L) различных сортов: А – Грис; Б – Ерема; В – Тимофей; Г – Леон



■ Центрические кольца ❖ Ацентрические кольца // Одиночные фрагменты || Парные фрагменты = Мосты

Рисунок 5. Доля aberrantных клеток каждого вида при комбинированном действии ионов Al^{3+} (0,5 мг/л) и гамма-облучения для сортов Грис и Ерема: А – Al^{3+} + 15 Гр (Грис); Б – Al^{3+} + 15 Гр (Ерема); В – Al^{3+} + 20 Гр (Грис); Г – Al^{3+} + 20 Гр (Ерема)

Несмотря на то, что спектры aberrаций представлены одними и теми же типами (это может свидетельствовать о схожих моделях поступления и действия стрессовых агентов, а также схожей ответной реакции растения), вызывают интерес различия в соотношениях видов aberrаций, так как механизмы

формирования антагонистических эффектов могут существенно различаться в своей основе. В случае радиационного гормезиса нивелирование неблагоприятного воздействия осуществляется не запуском защитных механизмов растения, а стимулированием ростовых характеристик, тогда как ионы цинка,

вероятно, активируют защитные системы, в ответе которых ведущая роль принадлежит активным формам кислорода, киназным каскадам и транскрипционным факторам [3].

Список литературы

1. Гладков Е.А. Влияние комплексного взаимодействия тяжелых металлов на растения мегаполисов // Экология. 2007. № 1. С. 71–74.

2. Евсеева Т.И., Белых Е.С., Таскаев А.И. и др. Закономерности реакции растений на совместное действие радионуклидов и металлов // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 3(43). С. 13–25. EDN JUURSP.

3. Конюхов Г.В. и др. Стимулирующее действие малых доз радиации на организм. Казань : Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, 2018. 409 с. ISBN 978-5-89845-058-8. EDN NXCLBD.

3. Chen P., Sjogren C.A., Larsen P.B., Schnittger A. A multi-level response to DNA damage induced by Aluminium // Plant. 2019. J. 98, 479–491. doi: 10.1111/tpj.14231

4. Li Y.Y. et al. Protecting cell walls from binding aluminum by organic acids contributes to aluminum resistance // Journal of Integrative Plant Biology. 2009. V. 51. P. 574–580.

FREQUENCY AND SPECTRUM OF CHROMOSOMAL ABERRATIONS UNDER THE ACTION OF HEAVY METAL IONS AND γ -IRRADIATION ON *Hordeum vulgare* L.

Babina K.V., Amosova N.V.

Obninsk Institute of Atomic Energy (IAE) of the National Research Nuclear University (NRNU) "MEPhI", Russian Federation

The variations in the combination of aluminum ions with other physical factors, such as zinc ions and gamma irradiation, presented in this work, indicate the existence of ways to reduce its toxicity to plant organisms using the effects of hormesis and antagonism. The percentage of the frequency of chromosomal aberrations caused by mobile forms of aluminum completely overlaps only in the case of gamma irradiation, however, a significant decrease in the index is also recorded with Zn²⁺ ions at a concentration of 5.0 mg/l. The spectrum of chromosome aberrations, including centric and acentric rings, paired, unpaired fragments and bridges, varies both within one variety, which is associated with the experimental conditions, and in a number of varieties.

Keywords: *barley, γ -irradiation, aluminum and zinc ions, radiation hormesis*

The experimental data presented in Figures 1 and 2 indicate an increase in the frequency of aberrant cells in the presence of both Al³⁺ and Zn²⁺ ions and γ -irradiation. Nevertheless, it is necessary to notice a significant reduction in the negative effect up to its complete leveling when these factors are combined.

The combined presence of ions of two metals reduces the yield of aberrant cells by 1.3 times compared with individual exposure to aluminum solution, while presowing irradiation reduces this figure by 4 and 7 times for Gris and Erema varieties, respectively. In addition, it can be noted that the presence of only presowing γ -irradiation entailed an increase in the studied indicator only 3 times on average for varieties for both doses.

Despite the fact that the spectra of aberrations are represented by the same types (this may indicate similar models of the input and action of stress agents, as well as a similar plant response), differences in the ratios of aberration types are of interest, since the mechanisms of formation of antagonistic effects can significantly fundamentally different. In the case of radiation hormesis, the leveling of the adverse effect is carried out not by triggering the defense mechanisms of the plant, but by stimulating growth characteristics, while zinc ions probably activate defense systems, in response to which the leading role belongs to reactive oxygen species, kinase cascades, and transcription factors [3].

УЧАСТИЕ КАРОТИНОИДОВ, АНТОЦИАНОВ И ФЛАВОНОИДОВ В ЗАЩИТЕ *ALHAGI PSEUDALHAGI* ОТ ХРОНИЧЕСКОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ

Годжаева Г.А., Аллахвердиева Л.В., Мамедова Г.А., Эминова Н.М.

Институт Радиационных Проблем Национальной Академии Наук Азербайджана,
AZ1143 Баку, ул. Б.Вагабзаде-9, Азербайджанская Республика
e-mail: gunelgojayeva2020@gmail.com

Работа посвящена изучению радиорезистентности *Alhagi Pseudalhagi*, произрастающий в условиях хронического воздействия высокого радиационного фона. Радиорезистентность оценена на основе количественных изменений низкомолекулярных антиоксидантов системы антиоксидантной защиты растения, таких как каротиноиды, флавоноиды и антоцианы. Показано, что *A. Pseudalhagi* проявляет уникальную устойчивость к действию ионизирующего излучения, в результате чего у растения формируется ряд адаптивных признаков. Адаптивно – приспособительные признаки сопровождаются структурными изменениями, которые приводят к образованию биологически активных веществ, таких как каротиноиды, флавоноиды и антоцианы. Установлено, что высокая устойчивость растения к действию малых доз радиоактивного излучения коррелирует с общим количеством фенольных соединений. Полученные нами результаты дают основание рассматривать эти пигменты как пигменты, обеспечивающие толерантность растений к различным загрязнителям окружающей среды, в том числе ионизирующему излучению.

Ключевые слова: *Alhagi pseudalhagi*, каротиноиды, антоцианы, флавоноиды, хроническое γ -облучение

Не секрет, что велика роль техногенных процессов в формировании радиозоологической обстановки на определенной территории и в создании локальных зон загрязнения с относительно высокой радиоактивностью. В нашей республике возникновение подобных локальных зон загрязнения, характеризующихся относительно высокой радиоактивностью, связано, в первую очередь, с добычей и переработкой нефти и газа [1].

Радиоспектрометрический анализ показал, что добываемая из глубинных слоев Земли нефть и сопровождающая ее буровая вода вокруг некоторых нефтяных скважин создают зоны радиоактивного загрязнения, превышающей естественный радиационный фон в 10–100 раз. Радиоспектрометрический анализ проб почвы вокруг скважин и проб воды, взятых из скважинных водоемов, показал наличие естественных радионуклидов с большим периодом полураспада, таких как U-238, Th-232, Ra-226 и K-40, а также продуктов их распада [2].

Результаты проведенных работ показывают, что биологическое действие малых доз ионизирующих излучений, вызываемых локальными территориями, в той или иной степени загрязненными радионуклидами, носит достаточно сложный характер. По мнению группы исследователей, воздействие радиации создает у растений определенные адаптационные признаки, и растения своеобразным способом пытаются уменьшить такое воздействие, проявляя высокую радиационную устойчивость [3].

Некоторые связывает признаки адаптации к действию радиации с активацией индуцибельных систем репарации ДНК, способных восстанавливать клеточные повреждения [4]. Считается, что в это время

неделяющиеся клетки вступают в нормальный митотический цикл, в результате чего поврежденные клетки за короткое время заменяются неповрежденными [3].

Есть и те, кто считает допустимым, что может активироваться реакция синтеза *de novo* ферментов системы антиоксидантной защиты (АОЗ) растений или реакции, приводящие к изменению активностей указанных ферментов [5]. Однако данные об участии низкомолекулярных компонентов указанной системы в этом процессе практически отсутствуют. По этой причине данная проблема и по сей день остается актуальной как для фундаментальных, так и для прикладных исследований.

В качестве объекта исследования был выбран *Alhagi Pseudalhagi* (Верблюжья колючка), произрастающий в диком виде в условиях хронического воздействия повышенного радиационного фона.

Цель исследования заключалась в изучении радиорезистентности *Alhagi Pseudalhagi*, произрастающий в условиях хронического воздействия высокого радиационного фона, на основе количественных изменений низкомолекулярных антиоксидантов АОЗ растения, таких как каротиноиды, флавоноиды и антоцианы.

Для реализации поставленной цели были решены следующие вопросы:

1. Изучение динамики накопления низкомолекулярных антиоксидантов как в различных органах растения, так и на разных стадиях развития растения;
2. Изучение динамики сезонного накопления низкомолекулярных антиоксидантов в листьях и цветках растения;

3. Изучение доза-зависимого накопления низкомолекулярных антиоксидантов в листьях и цветках растения.

Как известно несмотря на то, что процессы мутагенеза находятся под контролем регуляторных систем организма, воздействие различных стрессовых факторов вызывает изменение окислительно-восстановительного гомеостаза у растений.

Собранный в последние десятилетия фактический материал по реакции растений на воздействие различных видов стрессоров показывает ускорение образования оксидантов (активных форм кислорода), что является начальной, неспецифической реакцией растений на воздействие стрессоров [6].

В работе впервые на основе изменения содержания маломолекулярных компонентов изучена активность САОЗ в процессе нейтрализации активных форм кислорода.

Результаты по накоплению и изменению под действием радиации содержания низкомолекулярных антиоксидантов системы защиты в листьях и цветках *A. Pseudalhagi* в разные фазы ее развития показали, что существуют очевидные различия в количестве этих пигментов на всех стадиях активной вегетации.

Установлено, что *A. Pseudalhagi* проявляет уникальную устойчивость к действию ионизирующего излучения, в результате чего у растения формируется ряд адаптивных признаков. Адаптивно – приспособительные признаки сопровождаются структурными изменениями, которые приводят к образованию биологически активных веществ, таких как каротиноиды, флавоноиды и антоцианы.

Полученные результаты подтверждают представление о том, что образование и накопление флавоноидов, антоцианов и каротиноидов в различных органах растения является динамическим процессом, изменяющийся как в процессе онтогенеза растения, так и под влиянием радиационного фактора.

Установлено, что высокая устойчивость растения к действию малых доз радиоактивного излучения коррелирует с общим количеством фенольных соединений. Антоцианы и каротиноиды вносят больше вклад, чем флавоноиды в защиту этого растения при хроническом радиационном воздействии. Тот факт, что флавоноиды не претерпевают существенных изменений в таких условиях, свидетельствует о том, что они не играют существенной роли в защите растения как антиоксидант.

На основании полученных результатов, хотя не удается прийти к конкретному представлению о механизме действия радиоактивного излучения на синтез этих пигментов, можно с уверенностью сказать, что излучение может оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие и этот эффект может проявляться на разных стадиях развития растений и при разных дозах облучения. В это время вполне допустимо, что растение может адаптироваться к хроническому действию радиации.

Среди полученных нами результатов больше всего обращает на себя внимание то, что эти

пигменты неравномерно распределены по разным органам и тканям растения. При этом в каком-то органе в определенных условиях они могут накапливаться больше.

Стало ясно, что маломолекулярные антиоксиданты являются биологически активными веществами, способными изменяться как в процессе онтогенеза, так и в условиях хронического радиационного воздействия. Мы полагаем, что эти изменения, скорее всего, связаны с усилением их защитной роли.

Установлено, что количество антиоксидантов различны на разных стадиях развития растения и в отдельных его органах. При этом максимально в определенный период и в определенном органе растения.

Что касается роли радиоактивного излучения в этом процессе, то выяснилось, что ионизирующее излучение на синтез антиоксидантов может оказывать ингибирующее действие на одном этапе активной вегетации, и, ускоряя этот процесс на другом этапе, может стимулировать его. Как ингибирующий, так и стимулирующий эффекты зависят от поглощенной дозы радиоактивного излучения.

На основании полученных результатов удалось определить период максимального накопления биологически активных веществ в растении, его морфологический орган, более богатый этими веществами, и иметь представление о влиянии радиационного фактора на накопление этих веществ.

Полученные нами результаты дают основание рассматривать эти пигменты как пигменты, обеспечивающие толерантность растений к различным загрязнителям окружающей среды, в том числе ионизирующему излучению.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что на основании этих результатов можно будет определить период максимального накопления биологически активных веществ, морфологический орган растения, более богатый этими веществами, и исследовать особенности влияния факторов внешней среды на накопление этих веществ в данном органе.

Проведенные в этом направлении исследования позволят выявить радиационно-устойчивые виды растений на основе количественных показателей низкомолекулярных компонентов САОЗ, а также откроют перспективы для регулирования процесса накопления биологически активных веществ при влиянии факторов внешней среды.

Список литературы

1. Dzhafarov E.S., Aliyev L.A., Orujaliyev M.N., Samedov A.N. The study of radioecological situation several regions of Azerbaijan / International workshop "Effect of ionizing radiation on ecological situation of countries from Caucasian region and Caspian Sea Basin", Baku, 2002, pp. 174-175.

2. Dzhafarov E.S. The radioecological problems created in the Apsheron peninsula by the oil extraction

and production / Advanced research workshop "Radiation safety problems in the Caspian region, Baku, 2003, 50 p.

3. *Серебряный А.М., Зоз Н.Н.* Радиационный адаптивный ответ у пшеницы. Феноменология и вероятный механизм // Радиационная биология. Радиоэкология, 2001, т. 41, № 5, с. 589–598.

4. *Куликов Н.В., Альщиц Л.К., Позолотин А.А.* Исследование радиорезистентности некоторых растений // Радиобиология, 1991, т.31, вып. 4, с. 441–446.

5. *Taylor J.R.* An Introduction to Error Analysis. California: Univ. Sci. Books Mill Valley, 1982, 211 p.

6. *Cheeseman J.* Hydrogen peroxide and plant stress: a challenging relationship // Plant Stress, 2007, v.1, pp. 4–15.

PARTICIPATION OF CAROTENOIDS, ANTHOCYANS AND FLAVONOIDS IN THE PROTECTION OF ALHAGI PSEUDALHAGI FROM EXPOSURE TO CHRONIC GAMMA RADIATION

Godjaeva G.A., Allahverdieva L.V., Mamedova G.A., Eminova N.M.

Institute of Radiation Problems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

The work is devoted to the study of radioresistance of Alhagi Pseudalhagi, which grows under conditions of chronic exposure to high background radiation. Radioresistance was assessed on the basis of quantitative changes in low molecular weight antioxidants of the plant's antioxidant defense system, such as carotenoids, flavonoids, and anthocyanins. It has been shown that A. Pseudalhagi exhibits a unique resistance to ionizing radiation, as a result of which a number of adaptive traits are formed in the plant. Adaptive - adaptive features are accompanied by structural changes that lead to the formation of biologically active substances, such as carotenoids, flavonoids and anthocyanins. It has been established that the high resistance of the plant to the action of low doses of radioactive radiation correlates with the total amount of phenolic compounds. Our results give grounds to consider these pigments as pigments providing plant tolerance to various environmental pollutants, including ionizing radiation.

Keywords: *Alhagi pseudalhagi, carotenoids, anthocyanins, flavonoids, chronic γ -irradiation*

УДК 57.043

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫЗВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ ОТВЕТОВ pH И ФОТОСИНТЕЗА

Гринберг М.А., Немцова Ю.А., Агеева М.Н., Брилкина А.А., Воденеев В.А.

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Российская Федерация
e-mail: mag1355@yandex.ru*

Растения, растущие в природе в условиях повышенного радиационного фона, могут подвергаться действию различных стрессовых факторов, к которым нужно адаптироваться. Это происходит при помощи сигналов. Ранее было показано, что облучение влияет на электрические сигналы растений и вызываемые ими функциональные ответы. Это может влиять на формирование устойчивости к стрессору вплоть до инвертирования эффекта сигнала. Эксперименты были выполнены на растениях табака (*Nicotiana tabacum* L.), экспрессирующих флуоресцентный pH-чувствительный белок Pt-GFP. Показано, что хроническое β -излучение (31 μ Гр/час) слабо увеличивает вызванные нагревом электрические сигналы, но значительно усиливает вызванные сигналом ответы фотосинтеза: возрастает их амплитуда и площадь листа, охваченная реакцией. Потенциальным механизмом, который может лежать в основе обнаруженных эффектов облучения, является повышение активности протонной АТФазы и усиление вызываемых ею сдвигов pH.

Ключевые слова: *ионизирующее излучение, малые дозы, электрические сигналы, фотосинтез, pH*

Растения могут подвергаться действию ионизирующего излучения (ИИ) от естественных и антропогенных источников. ИИ оказывает влияние на различные морфометрические показатели и активность физиологических процессов растений, включая такие как фотосинтез, дыхание, биосинтезы и др. Важную роль в реализации таких эффектов играют вызываемые ИИ перестройки сигнальных путей, регулирующих активность физиологических процессов и роста организма в целом. В природных условиях сигнальные системы не только определяют рост и развитие растений в состоянии покоя, но и отвечают за формирование устойчивости к стрессорам. У растений выделяют несколько типов дистанционных стрессовых сигналов. К ним относятся химические, гидравлические и электрические сигналы. Электрические сигналы (ЭС) генерируются в зоне повреждения или в зоне, наиболее восприимчивой к стрессору, и играют значимую роль при действии быстронарастающих стрессоров, таких как изменение температуры, механические повреждения, атака листогрызущих насекомых. ЭС представляют собой распространяющуюся волну изменения электрического потенциала. Генерация сигнала в клетке сопровождается существенными ионными сдвигами. В клетку входят ионы Ca^{2+} , из клетки выходят анионы и ионы K^+ , происходит закисление цитоплазмы и защелачивание апопласта. Такие сдвиги напрямую или с участием промежуточных сигнальных систем, таких как гормоны, влияют на скорость протекания физиологических процессов: изменяется активность фотосинтеза и транспирации, растёт интенсивность дыхания, снижается скорость синтеза большинства белков, запускается синтез защитных соединений. В целом, такие изменения направлены на повышение устойчивости растений к неблагоприятным условиям. Ранее было показано, что облучение влияет на электрические сигналы растений и вызываемые ими функциональные ответы. Это может влиять на формирование устойчивости к стрессору вплоть до инвертирования эффекта сигнала. Механизмы такого влияния неизвестны и требуют изучения.

Исследования проводились на 6-недельных растениях табака *Nicotiana tabacum* L. сорта Samsun, трансформированных бинарной векторной системой pART27-ptGFP (NanoLight® Technologies, США). В растениях экспрессируется флуоресцентный ратиометрический pH-чувствительный белок Pt-GFP. Растения выращивались в ёмкостях с грунтом в условиях 16-часового светового периода при освещении люминесцентными лампами, температура воздуха в период выращивания составляла 24 °C.

Для облучения использовался закрытый точечный источник β -излучения на основе радонуклидов ^{90}Sr - ^{90}Y . Источник ИИ располагался над растениями, расстояние от радиоактивного источника до листьев – 22 см. Активность источника составляла 0,1 МБк, мощность дозы – примерно 31 мкГр/час. Облучение начиналось со дня посадки и продолжалось на протяжении всего периода выращивания растений,

общее время облучения 6 недель. Суммарная накопленная доза составляла около 32 мГр. Контрольные растения выращивались в аналогичных условиях в отсутствие источника ИИ.

Внеклеточная регистрация электрической активности осуществлялась посредством Ag^+/AgCl макроэлектродов. Контакт электродов с листом осуществлялся через нить, пропитанную стандартным раствором (1 мМ KCl, 0,5 мМ CaCl_2 , 0,1 мМ NaCl). Расстояние от места раздражения до электродов составляло 1,8 и 3,5 см. Электрод сравнения располагался в районе корней во влажном субстрате. Данные поступали на многоканальную систему для измерения биопотенциалов и ионных токов Мультитест ИПЛ-113 (Semico, Россия) и обрабатывались на ПК в программе *paqam2*. Здесь и далее все измерения производились в молодом полностью развитом листе. ЭС индуцировался постепенным нагревом участка листа при помощи резистора. Резистор располагался на кончике измеряемого листа.

Для регистрации пространственно-временных характеристик ответа $\text{Y}(\text{II})$ и NPQ на ЭС использовался PAM-флуориметр Imaging-PAM MINI (Heinz Walz GmbH, Германия). Расчёт параметров квантового выхода фотохимических реакций фотосистемы II ($\text{Y}(\text{II})$) и нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ) производился встроенным программным обеспечением прибора. Размер анализируемой области составлял 3×4 см. Параллельно с регистрацией показателей фотосинтеза производилось измерение электрических сигналов и флуоресценции Pt-GFP в пределах анализируемой области. Для возбуждения флуоресценции Pt-GFP использовались диоды с длиной волны 460 нм и фильтр с длиной волны 538/38 нм. Значения фотосинтетических показателей регистрировались в двух областях интереса (РОИ), располагающихся на расстоянии 1,8 и 3,5 см от зоны нагрева. Положения РОИ соответствовали точкам контакта с электродами, расположенными под листовой пластиной. Площадь листа, в которой имеет место ответ $\text{Y}(\text{II})$ на ЭС рассчитывалась по всей анализируемой области. Анализ изображений выполнялся в программе *ImageJ* по следующему алгоритму: 1) для каждой записи рассчитывался «начальный уровень» – усреднение 3 кадров до прохождения ЭС, 2) вычислялась «разность» – различие между начальным уровнем $\text{Y}(\text{II})$ и каждым из кадров динамики, 3) на каждом кадре разности определялась площадь листа, на которой величина отклонения от начального уровня превышала пороговый уровень. Пороговый уровень был единым для всего эксперимента.

Измерения сдвигов pH при ЭС на уровне целого растения проводились на установке флуоресцентного имиджинга DVS-03. Для возбуждения флуоресценции использовались светодиоды с длиной волны излучения 395 и 490 нм. Регистрация флуоресценции осуществлялась при помощи CMOS-камеры (PRIME 95B, Photometrics, США) с использованием фильтра 535/43 нм. Параллельно с регистрацией флуоресценции производилось измерение электрических

сигналов. Освещение во время световой адаптации и на протяжении записи осуществлялось диодами с длиной волны 395 и 490 нм. Значения рН регистрировались в областях интереса, располагающихся на расстоянии 1,8 и 3,5 см от зоны нагрева. Положения РОИ соответствовали точкам контакта с электродами, расположенными под листовой пластиной.

Флуоресцентные изображения были получены при помощи флуоресцентного конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM710 (Carl Zeiss, Germany). Возбуждение флуоресценции производилось на длинах волн 405 и 488 нм. Детектирование флуоресценции производилось в диапазоне 505–525 нм. Уровень рН измерялся по величине отношения флуоресценции Pt-GFP при возбуждении на 488 и 405 нм. Для измерения сдвигов рН, обусловленных активностью H^+ -АТФазы, применялся ингибитор АТФаз Р-типа ортованадат натрия (Na_3VO_4). Эксперименты проводились на фрагментах листа. Регистрация флуоресценции Pt-GFP осуществлялась непосредственно перед и через 30 мин после добавления ингибитора.

Как у контрольных, так и у облучённых растений локальное раздражение вызывает распространение стрессового электрического сигнала, который представляет собой быструю волну деполяризации. У растений табака ЭС, генерируясь в зоне стимуляции, распространяется по листу на значительные расстояния. В эксперименте показано снижение амплитуды ЭС. ИИ не оказывало значительного эффекта на амплитуду ЭС, однако у облучённых растений имело место уменьшение декремента затухания сигнала с расстоянием.

В ответ на прохождение ЭС в листе изменяется активность фотосинтетических процессов. У растений табака реакция представляет собой длительное (1,5 часа и более) глубокое подавление фотосинтеза (Y(II) снижается, NPQ возрастает). Амплитуды вызванных ЭС ответов фотосинтеза уменьшаются по мере удаления от места раздражения. ИИ не оказывает влияния на характер ответа в целом, однако имеет место выраженный эффект ИИ на пространственную динамику ответа. Параметры ответа не различаются на малых расстояниях от зоны раздражения, при этом в ROI, находящейся на большем расстоянии, имеет место усиление фотосинтетических ответов. Таким образом, различия в амплитуде ответов у контрольных и облучённых растений возрастают по мере удаления от зоны раздражения.

Для изучения влияния ИИ на особенности пространственной динамики фотосинтетического ответа, вызванного ЭС, измерялась площадь, в которой имеет место отклонение Y(II) от начального (до генерации ЭС) уровня. Выраженное снижение показателя начинается примерно через 15 минут после ЭС. Анализ изображений наглядно демонстрирует, что формирование ответа начинается исходно в районе жилки. Затем происходит увеличение площади, охваченной ответом, за счёт соседних с жилками областей. Чем ближе жилка к месту раздражения, тем сильнее ответ. Облучение оказывает значительный эффект на пространственную динамику ответа – ИИ способствует существенно более быстрому формированию ответа на большей области листа.

В качестве ключевого механизма, отвечающего за преобразование ЭС в ответ фотосинтеза, в нашей работе рассматривались сдвиги рН. При одновременной регистрации электрической активности, уровня рН и активности фотосинтеза было показано, что продолжительность сдвига рН значительно превышает продолжительность быстрой деполяризации ЭС и хорошо соответствует изменению показателей фотосинтеза (угнетение Y(II) и увеличение NPQ). Сдвиги рН регистрировались по изменению ratio интенсивности флуоресценции цитоплазматического генетически кодируемого сенсора Pt-GFP. Флуоресцентный имиджинг на уровне целого растения демонстрирует быстрое и длительное снижение ratio после прохождения электрического сигнала, что указывает на закисление цитоплазмы. Реакция охватывает всю площадь листа, амплитуда снижается по мере удаления от места раздражения. ИИ способствовало возрастанию амплитуды сдвигов рН и снижению их затухания с расстоянием. Влияние ИИ на активность H^+ -АТФазы – фермента, участвующего в поддержании уровня рН цитоплазмы, измерялась при помощи специфического ингибитора ортованадата натрия (Na_3VO_4). Величина формируемого H^+ -АТФазой рН, которая подавлялась ингибитором фермента, достоверно возросла вследствие облучения.

Обнаруженные закономерности способствуют лучшему пониманию механизмов действия ИИ на живые организмы и поведения растений на загрязнённых радионуклидами природных территориях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проекты №№ 0729-2020-0061 и 075-15-2021-1068).

EFFECT OF LOW-DOSE IRRADIATION ON SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL-SIGNAL-INDUCED RESPONSES OF pH AND PHOTOSYNTHESIS

Grinberg M.A., Nemtsova Y.A., Ageyeva M.N., Brilkina A.A., Vodenev V.A.

Plants growing in nature with an increased radiation background may be exposed to various stress factors that need to be adapted. It does this with signals. Irradiation has previously been shown to affect plant electrical signals and the functional responses they elicit. This can influence the formation of resistance to the stressor up to the inversion of the signal effect. The experiments were performed on tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.) expressing the fluorescent pH-sensitive protein Pt-GFP. It has been shown that chronic β -radiation (31 $\mu\text{Gy/h}$) weakly increases heat-induced electrical signals, but significantly enhances signal-induced photosynthesis responses: their amplitude and leaf area covered by the reaction increase. A potential mechanism that may underlie the detected effects of irradiation is an increase in the activity of proton ATPase and an increase in the pH shifts it causes.

Keywords: *ionizing radiation, low doses, electrical signals, photosynthesis, pH*

Plants can be exposed to elevated levels of ionizing radiation (IR). Restructuring of signaling pathways plays an important role in the implementation of IR effects. Signaling systems not only determine the growth of plants at rest, but are also responsible for the formation of resistance to stressors. Previously, it was shown that irradiation affects the electrical signals (ES) of plants and the functional responses they evoke. This may influence the formation of resistance to the stressor. The mechanisms of this influence are unknown and require further study.

In tobacco plants, in response to local heating, ES are generated that propagate along the leaf over considerable distances. IR did not have a significant effect on the ES amplitudes; however, the irradiated plants showed a decrease in the signal decay decrement with

distance. In response to the spread of ES in the leaf, the activity of photosynthesis decreases. IR increases the amplitude and rate of development of photosynthetic responses; in addition, under irradiation, the leaf area covered by the reaction increases. pH shifts were considered as the key mechanism responsible for the conversion of ES in response to photosynthesis. It has been shown that the duration of the pH shift significantly exceeds the duration of rapid ES depolarization, but it is in good agreement with the change in photosynthesis parameters. IR contributed to an increase in the amplitude of pH shifts and a decrease in their attenuation with distance. Proton ATPase is primarily responsible for maintaining the pH level. Activation of ATPase under irradiation is shown.

УДК 53.06, 57.03, 57.04, 633.16, 664.7

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛЫХ ДОЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЯЧМЕНЯ

Ильюхин Р.В.

Уральский государственный экономический университет

620144 г. Екатеринбург, ул. 8 марта/Народной воли, 62/45, Российская Федерация

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

193232 г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22 к. 1, Российская Федерация

iruslan@sputniksattv.ru

Обработка ярового ячменя Памяти Чепелева, районированного в Волго-Вятском районе страны, малыми дозами гамма-излучения обеспечивает достижение способности к прорастанию до 75–76 % при обработке дозами 5 Гр и 10 Гр по сравнению с необработанными образцами (65 % соответственно). Увеличение дозы излучения до 15 Гр приводит к снижению способности к прорастанию. Необходимо дальнейшее проведение исследований по радиостимуляции разными дозами в многофакторном аспекте и изучению питательной ценности зерна.

Ключевые слова: *антигрибковые свойства, сфагновые мхи, фитопатогены грибковой природы, тестирование, рассада*

На современном этапе развития сельскохозяйственной радиологии одним из перспективных направлений фундаментальных и прикладных исследований является применение ионизирующих излучений в технологии предпосевной обработки семян

для борьбы с возбудителями болезней и повышения урожайности [1] с учетом их районированности, а также по данным [2] – для уничтожения вредителей и уменьшения обсемененности микроорганизмами.

Ячмень обыкновенный рода Ячменя семейства злаковых является второй сельскохозяйственной культурой в валовом сборе зерна РФ и достигает 20,9 миллионов тонн в год по данным 2021 года [3]. Он используется в разных отраслях АПК страны в продовольственных (при производстве перловой и ячневой круп), технических (в пивоваренной промышленности) и кормовых целях (за счет содержания полноценного белка и большого количества крахмала).

В соответствии с заданием Россельхозакадемии по созданию «на основе комплексного изучения генофонда использования современных селекционных технологий выведен методом индивидуального отбора из гибридной популяции (Омский 95 х (Сонет х Нур х Сонет) новый сорт ярового ячменя, обладающий высокой урожайностью, качеством, устойчивостью к влиянию биотических и абиотических стрессов» – яровой ячмень Памяти Чепелева в условиях Волго-Вятского региона Российской Федерации [4], который созревает в среднем за 71–81 дней, на 5 дней позже среднеспелого сорта Ача и на 2 дня позже среднеспелого сорта Сонет.

В качестве традиционных методов повышения урожайности и стимуляции роста ячменя можно отнести предпосевную обработку семян препаратом Бенефис [5], продуктами биогазовой установки, полученными при анаэробной переработке птичьего помета [6], смесью Agree's Форсаж + Оплот (семена) в сочетании с опрыскиванием посевов Agree's Фосфор [7] и др., которые более трудоемки по сравнению с радиационной обработкой, выступающей альтернативой почвенным добавкам и удобрениям. При этом замена химического улучшения физическим может снизить токсины в сырье и, таким образом, повышая безопасность пищевых продуктов [8]. По данным ВНИИРАЭ и других авторов для стимуляции прорастания ячменя применяются физические методы воздействием гамма-излучением дозами в пределах от 10 до 30 Гр [9, 10].

При прорастании зерна происходит усиление энергии прорастания, что и определило **целью исследований** изучение влияния малых доз излучения на всхожесть зерен районированного в Уральском регионе ярового ячменя Памяти Чепелева и способность к прорастанию.

Объект и методы исследований

Зерно ярового ячменя Памяти Чепелева эллиптической формы, пленчатое, желтого цвета, с хорошо различимой бороздкой, крупное, масса 1000 семян - 49,3±1,1 г. Переход цветковой чешуи в ость постепенный. Щетинка у основания зерна длинная волосистая. Отобранные зерна ячменя соответствуют требованиям ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна», ГОСТ 28672-2019. «Ячмень. Технические условия».

Для радиостимуляции обработка зерен ячменя Памяти Чепелева осуществлялась в ООО «РЦОТ

«Эра» (ООО «Региональный центр облучательных технологий «Эра») на установке РТУ-3000. Источники гамма-облучения – Co^{60} , тип ГИК-А6 и М60К60. Текущая суммарная активность источников 270 кКи. Зерно размещалось в боксах и в результате движения конвейера типа ПТК-80/150 поступало из зоны загрузки технологического зала в камеру облучения с прохождением продукции вдоль сторон плоскостей облучателей. Обработка осуществлялась малыми дозами 5, 10 и 15 Гр. Процесс контроля проводился при помощи автоматизированной системы управления (АСУ).

Для проращивания зерен были сформированы группы образцов зерен по 100 шт. в каждой группе, проращивание осуществлялось в одинаковых экспериментальных условиях: температура воздуха в помещении +20–22°C, освещение смешанное, влажность воздуха 70–75 %. Для оценки влияния в качестве основного фактора – гамма-излучения, проращивание осуществлялось без земли и подкормки, с периодическим орошением водопроводной водой с температурой +(20–21) °C и рН среды 6,0–6,1. Для проращивания зерно брали в течение первых суток после обработки излучением. Фенологические наблюдения осуществлялись 2 раза в сутки. Расчет энергии прорастания за 3 суток и способности прорастания зерна через 5 суток проводился согласно требованиям ГОСТ 10968-88 «Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности к прорастанию». Скорость прорастания (сут.) и дружность прорастания (шт.) определяли расчетным путем по [11]. Исследования проводили в пятикратной повторности.

Результаты исследований

Зерна начали проклевываться через 20–24 ч. Семенная оболочка сначала прорывалась корешками, практически одновременно проклевывался колептиль. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

По данным проведенных исследований установлено, что скорость прорастания зерен ячменя, необработанных и обработанных разными дозами гамма-излучения, отличаются несущественно от 3,07 до 3,30 сут. и составляет в среднем 3 дня. Дружность прорастания низкая в образцах, обработанных дозой 15 Гр. В образцах, обработанных дозами 5 Гр и 10 Гр – 15,0 и 15,2 соответственно, что больше на 2 зерна, чем в необработанных излучением образцах. Энергия прорастания через 3-е суток выше в образцах, обработанных дозой 10 Гр, как и способность к прорастанию – 76 %. В тоже время в образцах зерен ячменя, обработанных дозой 5 Гр, при энергии прорастания 65 %, сопоставимой с необработанными образцами, за счет более высокой скорости прорастания, способность к прорастанию увеличилась до 75 %.

Результаты способности к прорастанию зерен ярового ячменя Памяти Чепелева

Показатели	Дозы излучения, Гр			
	0	5	10	15
Скорость прорастания, сутки	3,07	3,30	3,15	3,14
Дружность прорастания, штук семян	13,0	15,0	15,2	8,0
Энергия прорастания, %	65	65	75	40
Способность к прорастанию, %	65	75	76	40

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяет сделать вывод о целесообразности радиостимуляции зерен ярового ячменя Памяти Чепелева дозами от 5 до 10 Гр для улучшения всхожести семян. Комплексные исследования в этом направлении будут продолжены, в том числе для обеспечения безопасности, сохранения и укрепления здоровья населения страны согласно проводимой государственной политики РФ в области здорового питания.

Список литературы

1. Санжарова Н.И., Шубина О.А. Сельскохозяйственная радиология: этапы становления и современные задачи // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: материалы международной научно-практической конференции, Обнинск, 16–18 сентября 2020 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. С. 17–21.
2. Тимакова Р.Т. Научно-практические аспекты идентификации и обеспечения сохранности пищевой продукции, обработанной ионизирующим излучением: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.18.15. Екатеринбург, 2020. 36 с.
3. Сельское хозяйство в России. 2021: Стат.сб./Росстат – С 29 М., 2021. 100 с.
4. Максимов Р.А. Ячмень яровой памяти Чепелева // Аграрный вестник Урала. 2015. № 7 (137). С. 16–19.
5. Козионова Е.Г., Маленкова Л.В., Демидова О.В. Влияние химических и биологических препаратов на

посевные качества семян и урожайность // Экономика сельского хозяйства России. 2020. № 1. С. 27–33. DOI: 10.32651/201-27.

6. Зайцева Н.Н., Фадеева Н.А. Последствие твердых продуктов биогазовой установки на урожайность и качество яровой пшеницы // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 3 (10). С. 27–33. DOI: 10.17022/9xcb-0s70.

7. Антипова Т.А., Бабайцева Т.А. Формирование урожайности ячменя ярового в зависимости от предпосевной обработки семян и некорневой подкормки // Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи: материалы XII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 125-летию Т.С. Мальцева. Ижевск. 2020. С. 84–88.

8. Aladjadjian A. The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria // Journal of Central European Agriculture. 2007. Vol. 8, № 3. P. 369–380

9. Гудков И.Н. Основы общей и сельскохозяйственной радиобиологии. Киев: Изд-во УСХА, 1991. 328 с.

10. Корнеев Н.А. и др. Некоторые итоги и задачи использования радиоизотопов и ионизирующих излучений в сельском хозяйстве // Изотопы в СССР. 1980. С. 149–155.

11. Проскура А.В. и др. Исследование влажностного режима при проращивании семян чиа (*Salvia hispanica* L.) // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2018. № 2. С. 27–33.

ON THE ISSUE OF THE EFFECTIVENESS OF SMALL DOSES OF RADIATION FOR PROCESSING BARLEY

Iliukhin R.V.

Ural State University of Economic, Yekaterinburg, Russian Federation

Sankt-St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M.A.Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russian Federation

Processing of spring barley of Chepelev's Memory, zoned in the Volga-Vyatka region of the country, with small doses of gamma radiation ensures the ability to germinate up to 75-76% when treated with doses of 5 Gy and 10 Gy compared with untreated samples (65 %, respectively). An increase in the radiation dose to 15 Gy leads to a decrease in the ability to germinate. It is necessary to further conduct research on radio stimulation with different doses in a multifactorial aspect and study the nutritional value of grain.

Keywords: *Chepelev Memory spring barley, small doses, Gy, germination, germination ability, gamma radiation*

УДК 581.14:633.1:577.21:613.648.4

ВАЛИДАЦИЯ В ВЕГЕТАЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ОНТОГЕНЕЗА КАНДИДАТНЫХ ГЕНОВ РАДИАЦИОННОГО ГОРМЕЗИСА (ГОМОЛОГОВ *CML39*, *AOS2*, *PM19L*)

Казакова Е.А.¹, Горбатова И.В.¹, Шестерикова Е.М.¹, Пишенин И.А.¹, Празян А.А.¹, Битаршвили С.В.¹, Смирнова А.С.¹, Блинова Я.А.¹, Волкова П.Ю.²

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация

²Независимый исследователь, г. Гел, Бельгия
e-mail: elisabethafeb19@gmail.com

В вегетационном эксперименте на разных стадиях онтогенеза осуществлена валидация кандидатных генов радиационного гормезиса ячменя обыкновенного, гомологов генов *CML39*, *AOS2*, *PM19L* у *Arabidopsis thaliana*, и оценена возможность разработки конструкций для дальнейшего генетического редактирования. Показано, что экспрессия изучаемых генов играет важную роль в ответе ячменя на γ -облучение семян не только на стадии проростков, но и на других стадиях развития растений. Зафиксированные сдвиги в динамике фаз роста растений могут зависеть от модуляции экспрессии исследуемых генов. Для последующего генетического редактирования с целью получения более стрессоустойчивых и высокоурожайных линий ячменя в качестве генов-кандидатов могут быть использованы все три исследованных гена.

Ключевые слова: *γ -излучение, радиационная стимуляция, абиотический стресс, *Hordeum vulgare L.**

Зная молекулярные механизмы эффекта радиационной стимуляции, ионизирующее излучение можно использовать в качестве инструмента для выявления детерминант устойчивости растений к различным стрессорам и повышения продуктивности. Ранее нами были проведены обширные исследования по расшифровке молекулярных механизмов радиационного гормезиса при действии низких доз ионизирующего излучения на семена ячменя [1–4].

Установлено, что облучение семян в дозе 20 Гр вызывает стимуляцию роста проростков ячменя [1], а также выявлены гены и метаболиты, связанные с формированием эффекта радиационной стимуляции [2, 4]. По результатам анализа транскриптома зародышей облучённых семян ячменя обыкновенного на ранних стадиях прорастания были выбраны 17 генов-кандидатов, изменения экспрессии которых могут быть связаны с формированием эффекта радиационной стимуляции, и проведена оценка их транскрипционной активности для ряда наиболее контрастных по морфологическому ответу на облучение сортов [3]. Изменения в экспрессии гомологов генов *PM19L*, *CML39* и *AOS2* у ячменя обыкновенного были предложены в качестве возможных детерминант

радиационного гормезиса [4]. Гомолог *CML39* участвует в передаче кальциевого сигнала, *AOS2* – в жасмонатном сигналинге и *PM19L* – в сигналинге абсцизовой кислоты.

Целью данного исследования была валидация ранее полученных результатов на разных стадиях онтогенеза методом ОТ-ПЦР в реальном времени и выбор кандидатных генов для дальнейшего генетического редактирования. Был заложен вегетационный эксперимент в теплице на восьми сортах ячменя, предоставленных ФГБНУ «АНЦ «Донской» и различающихся по выраженности морфофизиологического эффекта на γ -облучение [5]. Семена перед посадкой облучали стимулирующей дозой 20 Гр. Для облучённых и контрольных растений оценена скорость прохождения онтогенетических фаз по [6], проведён пробоотбор образцов на фазах онтогенеза «проросток», «кущение», «трубкование» и «колошение» и оценена экспрессия генов-кандидатов радиационного гормезиса гомологов *PM19L*, *CML39* и *AOS2*. Построены схемы, показывающие динамику смен онтогенетических фаз, проведён анализ связи фаз онтогенеза и дифференциальной экспрессии кандидатных генов.

В целом для исследуемых сортов отмечено, что зафиксированные сдвиги в динамике фаз роста растений могут зависеть от модуляции экспрессии изучаемых генов. Экспрессия изучаемых генов играет важную роль в ответе ячменя на γ -облучение семян не только на стадии проростков, но и на других стадиях развития растений.

Для γ -стимулированного сорта Фокс 1, который в рамках лабораторного эксперимента продемонстрировал максимальный стимулирующий эффект после облучения семян, оценка скорости прохождения онтогенетических фаз показала, что доза 20 Гр привела к ускорению динамики прохождения фенологических фаз. Данный результат соотносился с изменениями экспрессии генов-кандидатов радиационного гормезиса гомологов *PM19L* и *AOS2*.

Модуляция экспрессии гомолога *CML31* у γ -стимулированных сортов может указывать на важную роль в передаче сигналов кальция и АБК во время установления эффекта радиационного гормезиса. Однако, по-видимому, сдвиги в динамике фаз роста в меньшей степени зависят от экспрессии гомолога *CML39*, и в большей степени связаны с гомологов *PM19L* и *AOS2*.

Для последующего генетического редактирования с целью получения более урожайных линий ячменя в качестве генов-кандидатов могут быть использованы все три исследованных гена. На настоящий момент разработаны CRISPR-Cas9 конструкции для редактирования гомологов генов *CML39*, *AOS2*, *PM19L* ячменя обыкновенного.

При финансовой поддержке Гранта ФНТП развития генетических технологий на 2019–2027 годы Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-1068).

Список литературы

1. Geras'kin S.A., Churyukin R.S., Volkova P.Yu. Radiation exposure of barley seeds can modify the early stages of plants' development // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. V. 171, P. 71-83, doi:10.1016/j.jenvrad.2017.06.008.

2. Volkova P.Y., Duarte G.T., Soubigou-Taconnat L. et al. Early response of barley embryos to low- and high-dose gamma irradiation of seeds triggers changes in the transcriptional profile and an increase in hydrogen peroxide content in seedlings // J. Agro. Crop. Sci. 2020. Vol. 206(2). P. 277–295, doi:10.1111/jac.12381.

3. Gorbatova I.V., Kazakova E.A., Podlutskiy M.S. et al. Studying Gene Expression in Irradiated Barley Cultivars: *PM19L*-like and *CML31*-like Expression as Possible Determinants of Radiation Hormesis Effect. Agronomy. 2020, 10, 1837, <https://doi.org/10.3390/agronomy10111837>.

4. Volkova P., Clement G., Makarenko E. et al. Metabolic profiling of gamma-irradiated barley plants identifies reallocation of nitrogen metabolism and metabolic stress response // Dose-Response. 2020. 18(1):1559325820914186.

5. Казакова Е.А., Макаренко Е.С., Подлуцкий М.С. и др. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян // Зерновое хозяйство России. 2020. № 2(68). С. 23–28.

6. Tottman D.R. The decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations // Annals of Applied Biology. 1987. Vol. 110. № 2. P. 441–454.

VALIDATION IN THE GREENHOUSE EXPERIMENT AT DIFFERENT STAGES OF ONTOGENY OF CANDIDATE RADIATION HORMESIS GENES (*CML39*, *AOS2*, *PM19L* HOMOLOGUES)

Kazakova E.A.¹, Gorbatova I.V.¹, Shesterikova E.M.¹, Pishenin I.A.¹, Prazyan A.A.¹, Bitarishvili S.V.¹, Smirnova A.S.¹, Blinova Ya.A.¹, Volkova P.Yu.²

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

²Independent researcher, Geel, Belgium

We validated in the greenhouse experiment at different stages of ontogeny, the candidate radiation hormesis genes for of barley, homologous to *Arabidopsis thaliana* genes *CML39*, *AOS2*, *PM19L*, also assessing the possibility of developing constructs for further gene editing. We showed that the differential expression of studied genes plays an important role in the response of barley to γ -irradiation of seeds not only at the stage of seedlings, but also at other stages of plant development. We found that the shifts in the dynamics of plant growth phases may depend on the modulation of the expression of the studied genes. For subsequent genetic editing in order to obtain more stress-resistant and high-yielding barley lines, all three studied genes can be used as candidate genes.

Keywords: γ -radiation, radiation stimulation, abiotic stress, *Hordeum vulgare* L.

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ КАТАЛАЗЫ, ГВАЯКОЛОВОЙ И АСКОРБАТПЕРОКСИДАЗЫ У ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ ИЗ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ЧАЭС

Макаренко Е.С., Празян А.А., Волкова П.Ю.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

Изучена активности каталазы, гваяколовой и аскорбатпероксидазы у чистотела большого, клевера ползучего и горошка мышиного, произрастающих в ближней зоне Чернобыльской АЭС. Мощность амбиентной дозы на одном из импактных участков достигала 6.8 мкЗв/ч. По результатам работы у данных видов в условиях хронического радиационного воздействия не выявлено устойчивых изменений активности антиоксидантных ферментов.

Ключевые слова: активность ферментов, клевер ползучий, чистотел большой, ближняя зона ЧАЭС

Как известно, гамма-излучение, в частности, через радиолит воды, приводит к образованию активных форм кислорода (АФК), сильным окислителям, которые потенциально могут повреждать внутриклеточные компоненты [2]. Важными ферментами антиоксидантной системы защиты, приводящими к детоксикации АФК, являются супероксиддисмутаза, каталаза (CAT) и различные пероксидазы.

Целью данной работы являлась оценка активности антиоксидантных ферментов чистотела большого, клевера ползучего и горошка мышиного, произрастающих в районе аварии Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы

Образцы чистотела большого (*Chelidonium majus*, L.), клевера ползучего (*Trifolium repens* L.), горошка мышиного (*Vicia cracca* L.) отбирали с участков, расположенных на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) Республики Беларусь. Импактные популяции выбрали около бывших населённых пунктов Радин, Кулажин и Масаны, характеризующиеся разными уровнями радиоактивного загрязнения (табл.), а контрольные участки около Бабчин и Ломыш. Отобранные растения хранили в жидком азоте, для каждого вида с участка проанализировали по 5 образцов листьев.

Анализ ферментативной активности CAT и гваяколовой пероксидазы (POX) проводили в соответствии с методиками, описанными в Bisswanger [1] с небольшими модификациями. Оценку активности аскорбатпероксидазы (APX) проводили как описано [3] с незначительными модификациями.

Таблица 1.

Мощность амбиентной дозы на экспериментальных участках

Участок	Мощность амбиентной дозы (γ), мкЗв/ч		
	Чистотел	Клевер	Горошек
Ломыш контроль	0.29	0.29	0.29
Бабчин контроль	0.29	0.29	0.29
Радин	2.68	2.68	2.68
Масаны	2.95	2.95	2.95
Кулажин	5.65	2.20	6.84

Навеску ткани (0.25 г) каждого образца гомогенизировали в жидком азоте. Для анализа активности POX, CAT и APX гомогенат переносили в пробирки и растворяли в 1 мл 0.1 М холодного калий-фосфатного буфера (pH 7.0). Затем гомогенаты центрифугировали в течение 20 минут при скорости 14500 об/мин на мини-центрифуге «Eppendorf MiniSpin» (Eppendorf, Germany) с охлаждением. Экстракты анализировали на бесцветном спектрофотометре «NanoDrop-2000» (Thermo Fisher Scientific, USA). Измерения POX, CAT, APX проводились при длине волны 470 нм, 340 нм, 290 нм, соответственно. Длина оптического пути равна 1 мм.

Для определения значимости отличия от контроля использовали критерий Манна-Уитни (*U*-тест) в Statistica 8.0. Все показания спектрофотометра были переведены в международные единицы ферментативной активности (МЕ). На рисунках представлены минимальные значения, первые квартили (Q_1),

медианы (M), третьи квартили (Q3), максимальные значения и выбросы.

Результаты и обсуждение

Активность САТ чистотела и клевера на радиоактивно загрязнённых участках Радин и Кулажин, а

также контрольном участке Ломыш ниже, чем на референтном участке Бабчин (рис. 1).

Активность РОХ клевера ползучего значимо ниже обеих контролей на участке Кулажин (рис. 2).

Активность АРХ клевера ниже, а горошка мышиного выше, чем на площадке Бабчин (рис. 3).

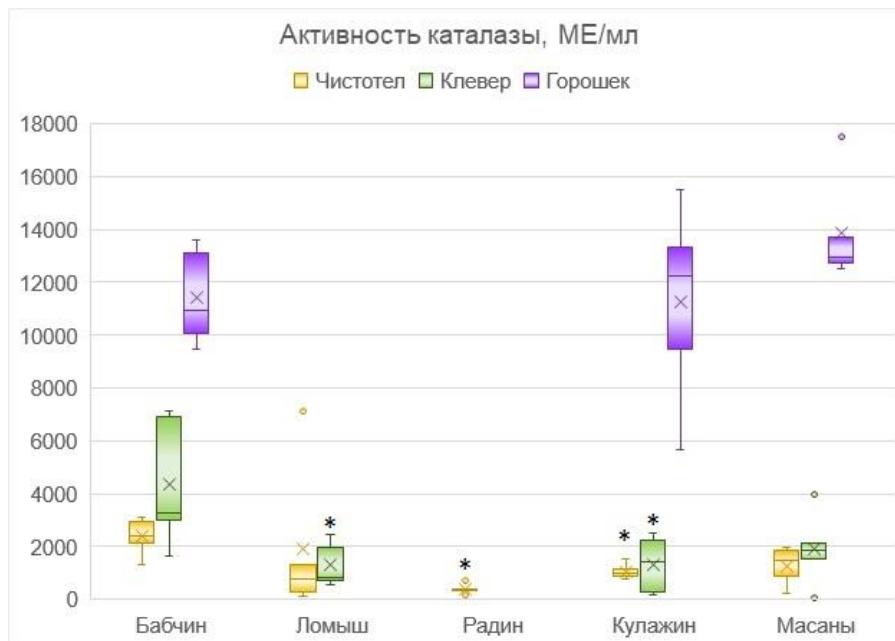


Рисунок 1. Активность фермента каталазы в зависимости от участка
* – значимое отличие от контроля Бабчин, $p < 0,05$

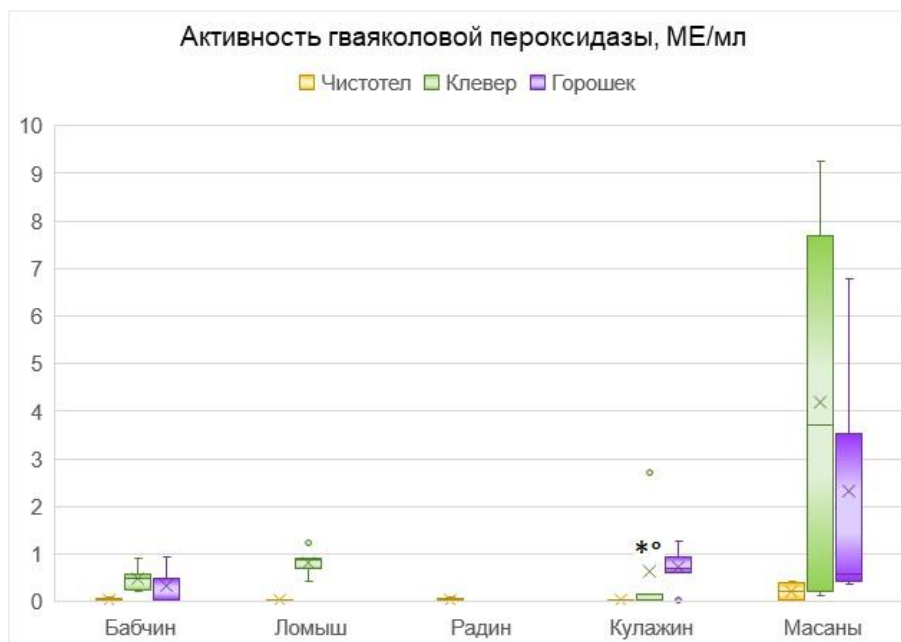


Рисунок 2. Активность фермента РОХ в зависимости от участка
* – значимое отличие от контроля Бабчин, $p < 0,05$;
° – значимое отличие от контроля Ломыш, $p < 0,05$

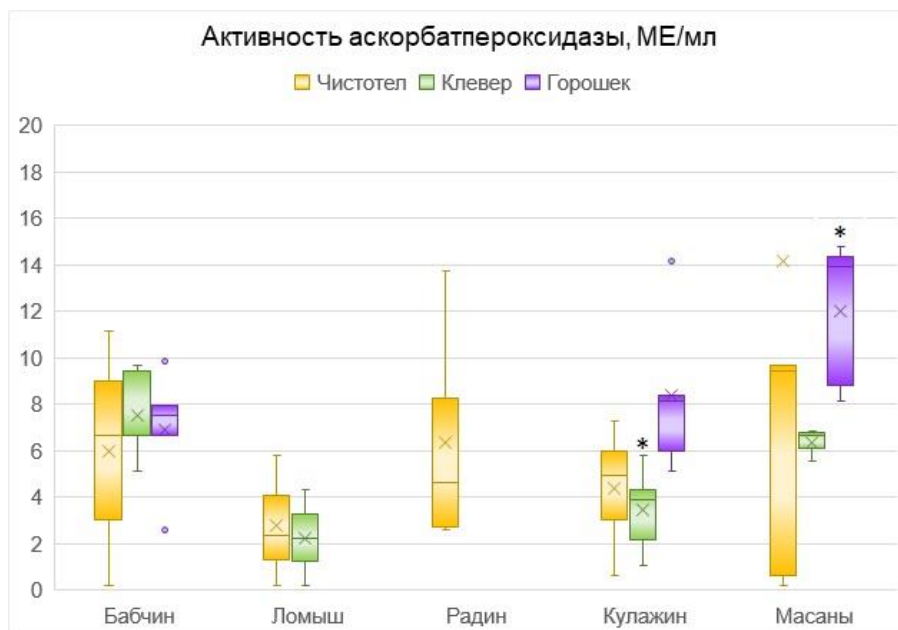


Рисунок 3. Активность фермента аскорбатпероксидазы в зависимости от участка
* – значимое отличие от контроля Бабчин, $p < 0,05$

Таким образом, при изучении чистотела большого, клевера ползучего и горошка мышиного спустя 35 лет после аварии не обнаружено устойчивого изменения активности антиоксидантных ферментов (РОХ, САТ и АРХ) при произрастании данных растений в ближней зоне Чернобыльской АЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 20-74-10004).

1. Bisswanger H. Practical enzymology. Wiley-VCH, Weinheim. 2004.

2. Esnault M.A., Legue F., Chenal C. Ionizing radiation: advances in plant response. Environ. Exp. Bot. 2010. V. 68. № 3. P. 231–237.

3. Verma S., Dubey R.S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants Plant Science. 2003. V. 164. P. 645–655.

Список литературы

EVALUATION OF CATALASE, GUAIACOL PEROXIDASE AND ASCORBATE PEROXIDASE ACTIVITY IN HERBACEOUS PLANTS FROM THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

Makarenko E.S., Prazyan A.A., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The activity of catalase, guaiacol peroxidase and ascorbate peroxidase in greater celandine, creeping clover and tufted vetch growing in the near zone of the Chernobyl NPP was studied. The ambient dose rate at one of the impact sites reached 6.8 $\mu\text{Sv/h}$. According to the results of the work, no stable changes in the activity of antioxidant enzymes were detected in these species under conditions of chronic radiation exposure.

Keywords: enzyme activity, *Trifolium repens* L., *Chelidonium majus*, the Chernobyl exclusion zone

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КУЛЬТУР *LISTERIA MONOCYTOGENES*, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Полякова И.В., Фролова Н.А., Губина О.А., Ефимова Е.С., Васильева Н.А., Чиж Т.В.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: irinaamchenkina@mail.ru

Листериоз – высоколетальное заболевание, которое связано с употреблением в пищу продуктов, зараженных грамположительной палочкой – *Listeria monocytogenes*. Необходим тщательный контроль продуктов питания для того, чтобы не допустить массовых заражений населения. Одним из самых эффективных методов снижения численности микроорганизмов является применение ионизирующего излучения в качестве бактерицидного агента. Однако для листерии показан довольно широкий диапазон радиационной чувствительности, связанный с различным составом и свойствами сред или продуктов, в которых находится бактерия. В своей работе мы провели выделение и идентификацию культур *Listeria spp.* по морфологическим и биохимическим признакам. Далее был проведен эксперимент по изучению влияния гамма-излучения в диапазоне доз от 0,1 до 3 кГр на выделенные культуры, которые подвергали облучению в виде суспензии с концентрацией клеток порядка 10^7 КОЕ/мл. Для полученных культур определены величины доз десятикратного снижения численности – D_{10} , которые составили 0,314 и 0,191 кГр. В результате показано, что гамма-излучение в дозе 3 кГр позволяет полностью инактивировать исследуемые бактерии.

Ключевые слова: листерия, гамма-излучение, радиочувствительность, обеспечение микробиологической безопасности, продукты питания животного происхождения

Грамположительная бактерия *Listeria monocytogenes* широко распространена в природе и является частым контаминантом пищевых продуктов. У человека и животных *L. monocytogenes* может вызывать тяжелую инфекцию, получившую название листериоз, и проявляющуюся в виде менингитов, менингоэнцефалитов, септициемий и др. Однако, как среди людей, так и у домашних животных, неоднократно было описано бессимптомное листериозное носительство, что свидетельствует о возможности длительной персистенции листерий в организме [1-3].

Заболееваемость листериозом среди людей в Российской Федерации официально регистрируют с 1992 г. – с того момента, когда Минздрав РФ своим приказом ввел во врачебную практику официальную регистрацию листериоза. До этого заболевание регистрировалось в США, Канаде, Мексике и странах Европы (Великобритания, Франция, Швейцария, Испания, Италия, Германия и др.) [4]. Листериоз не является широко распространенной инфекцией, по количеству выявленных случаев он значительно уступает сальмонеллезам и кампилобактериозам, но превосходит их по летальности и тяжести клинического течения [5].

В последние десятилетия большинство эпидемических вспышек листериоза с высоким процентом летальных исходов обусловлено потреблением пищевых продуктов, в том числе рыбы, мяса и мясных продуктов [6–10].

Человек в основном заражается листериозом через продукты животного происхождения, употребляемые в пищу без должной термической обработки. Одним из основных принципов профилактики листериоза у людей и животных является постоянный контроль качества продуктов питания и кормов.

Решить проблему обеспечения населения безопасными (с точки зрения микробиологии) продуктами питания может радиационная обработка. За более чем 60 лет существования технологии для большого количества разнообразных продуктов были определены параметры обработки и величины доз ионизирующего излучения необходимые для инактивации патогенных микроорганизмов, торможения размножения микроорганизмов порчи и замедления биохимических процессов, приводящих к изменению сенсорных показателей.

Аналізу поведения различных штаммов патогена *Listeria monocytogenes* в облученных (гамма-излучение) образцах куриного мяса, говяжьего фарша, говядины и фарша индейки, упакованных в обычной атмосфере и под вакуумом и хранящихся при различных температурных режимах был посвящен ряд исследований [11, 12].

Для данного патогена была определена величина D_{10} (доза, при которой происходит гибель 90 % клеток), однако она варьируется в пределах от 0,27 до 0,77 кГр. При этом в говядине с различной жирностью D_{10} достигала 1 кГр, но не зависела от величины этого показателя, а только от температуры

последующего хранения. Для индейки при температуре хранения 7°C только облучение в дозе 4,5 кГр предотвращало развитие бактерий [13].

Цель исследования – анализа ряда продуктов животного происхождения на наличие листерии и оценка радиационной чувствительности выделенных культур.

В розничной торговой сети были приобретены следующие продукты питания:

1. Колбаса варено-копченая «По-Черкизовски»;
2. Рыба белая, сырокопченая;
3. Куриное филе бедра, сырое;
4. Рыба красная, сырокопченая;
5. Рыба сырая, мороженая (горбуша).

Далее предобгащение, посев на селективные среды и проведение идентификационных тестов были проведены в соответствии с МУК 4.2.1122-02 и ГОСТ 32031-2012.

В итоге из куриного мяса были выделены микроорганизмы, которые по идентификационным признакам соответствовали листериям (размер, форма и цвет колоний, потемнение среды в результате образования сульфида железа).

После микроскопии и проведения биохимических тестов были выбраны две отдельных культуры

(№2 и № 5), которые были приняты в работу как, *Listeria monocytogenes*.

Для определения радиационной чувствительности выделенных культур был проведен ряд модельных экспериментов. Из суточной культуры листерии на основе стерильного физиологического раствора делали суспензию с концентрацией клеток порядка 10^7 КОЕ/мл.

Суспензии, разлитые в стерильные полипропиленовые пробирки, подвергали воздействию гамма-излучения на установке ГУР-120 (ФГБНУ ВНИИРАЭ). Величины поглощенных доз были следующие: 0(контроль), 0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 и 3 кГр. Дозиметрию проводили с помощью универсального дозиметра ДКС-01 с учетом известной мощности дозы.

Не позднее 24 после облучения исследуемые суспензии высевали на агаризованные питательные среды (ПАЛ, ПАЛКАМ или КМАФАМ агары) для подсчета количества выживших клеток. Инкубацию после посева проводили при температуре 37 °С. Время инкубации не менее 120 часов с ежедневным учетом количества выросших колоний.

В результате получено, что выделенные колонии близки, но не идентичны по своей чувствительности к облучению (Рисунок 1).

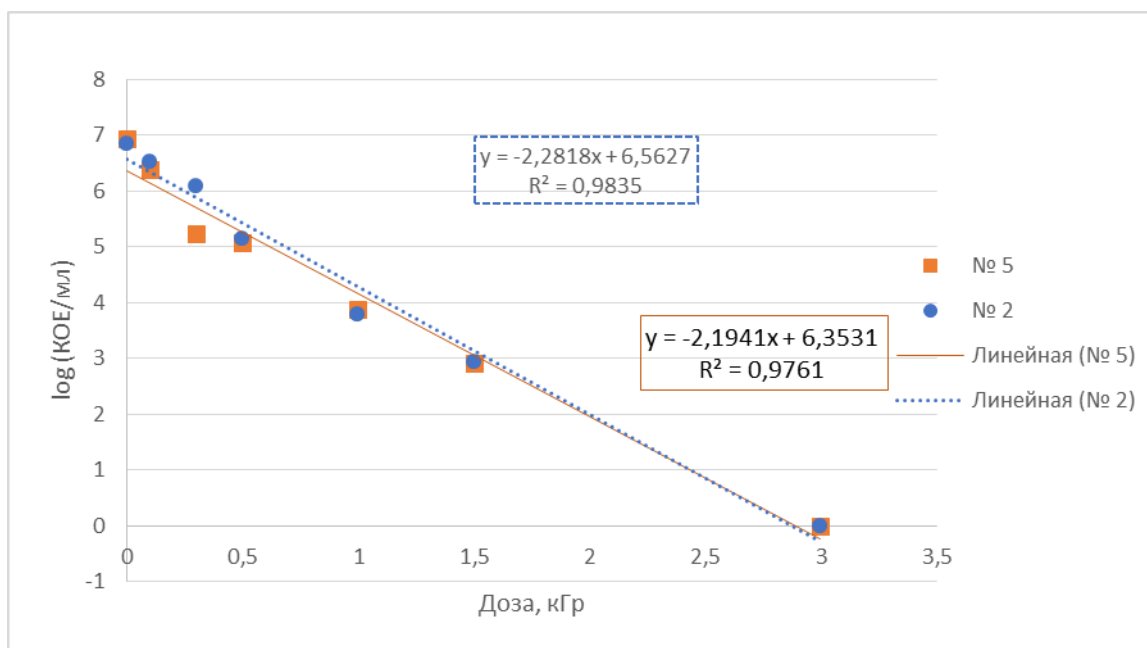


Рисунок 1. Зависимость снижения количества жизнеспособных клеток *Listeria monocytogenes* от величины поглощенной дозы

Также была оценена величина D_{10} : для культуры № 2 – 0,314 кГр, №5 – 0,191 кГр.

В результате проведенного исследования показано, что в продаже в розничной торговой сети можно найти продукты питания, зараженные листерией с содержанием выше нормативного значения в соответствии с СанПиН 2.3.2.1078-01. Листерии были обнаружены в образцах сырого куриного мяса. Выделенные микроорганизмы подвергли воздействию

гамма-излучения и определили, что доза в 3кГр позволяет полностью их инактивировать.

Это в очередной раз доказывает необходимость тщательного микробиологического контроля, а также свидетельствует о том, что радиационная обработка продукции животного происхождения может повысить микробиологическую безопасность.

Список литературы

1. Тартаковский И.С., Малеев В.В., Ермолаева С.А. Листерии: роль в инфекционной патологии человека и лабораторная диагностика. М.: Медицина для всех, 2002.
2. Farber J.M., Peterkin P.I. *Listeria monocytogenes*, a food borne parasite. // *Microbiol Rev.* 1991. 55. P. 476–511.
3. Vazquez-Boland J. A., Kuhn, M., Berche et al. *Listeria* pathogenesis and molecular virulence determinants. // *Clin. Microbiol. Rev.* 2001. 14. P. 584–640.
4. Valderrama W.B., Cutter C.N. An Ecological Perspective of *Listeria Monocytogenes* Biofilms in Food Processing Facilities. // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2013. – 53(1). P. 01–17.
5. Синельникова М.А., Бузолева Л.С., Беспечук Н.Ю., Колтун Г.Г. Индикация *Listeria monocytogenes* в мясе и мясных продуктах на территории сельскохозяйственной провинции. // *Гигиена и санитария.* 2017. 96(6). С. 590–593. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-6-590-593>.
6. E.C., Notermans S. Surveillance of listeriosis and its causative pathogen, *Listeria monocytogenes*. // *Food Control.* 2011; 22 (1): 1484–90.
7. Sauders B.D., Wiedmann M. Ecology of *Listeria* species and *L. monocytogenes* in the natural environment. In: Ryser E.T., Marth E.H., eds. *Listeria, listeriosis, and food safety.* Marcel Dekker. 2007. 1 (1). P. 21–53.
8. Endrikat S. et al. A comparative risk assessment for *Listeria monocytogenes* in prepackaged versus retail-sliced deli meat // *Journal of Food Protection.* 2010. Vol. 73. №. 4. P. 612–619.
9. Lambertz S.T., Nilsson C., Brådenmark A. et al. Prevalence and level of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat foods in Sweden 2010. // *Int. J. Food Microbiol.* 2012. 160 (1). P. 24–31.
10. Jamali H. et al. Prevalence, antimicrobial susceptibility and virulotyping of *Listeria* species and *Listeria monocytogenes* isolated from open-air fish markets // *BMC microbiology.* 2015. Vol. 15. №. 1. P. 1–7.
11. Huhtanen C.N., Jenkins R.K., Thayer D.W. Gamma radiation sensitivity of *Listeria monocytogenes* // *J. Food Prot.* 1989. № 52(9). P. 610–613.
12. Patterson M.F., Damoglou A.P., Buick R.K. Effects of irradiation dose and storage temperature on the growth of *Listeria monocytogenes* on poultry meat // *Food Microbiol.* 1993. № 10. P. 197–203.
13. Gursel B., Gurakan G.C. Effects of gamma irradiation on the survival of *Listeria monocytogenes* and on its growth at refrigeration temperature in poultry and red meat // *Poul. Sci.* 1997. № 76. P. 1661–1664.

INVESTIGATION OF RADIATION SENSITIVITY OF LISTERIA MONOCYTOGENES CULTURES ISOLATED FROM ANIMAL ORIGIN FOOD PRODUCTS

Polyakova I.V., Frolova N.A., Gubina O.A., Efimova E.S., Vasilyeva N.A., Chizh T.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Listeriosis is a highly lethal disease that is associated with eating foods infected with gram-positive bacillus – *Listeria monocytogenes*. Careful control of food products is necessary in order to prevent mass infections of the human population. One of the most effective methods of reducing the number of microorganisms is the use of ionizing radiation as a bactericidal agent. However, a fairly wide range of radiation sensitivity is shown for listeria, due to the different composition and properties of the media or products in which the bacterium is located. In our work, we carried out the isolation and identification of *Listeria spp.* cultures. according to morphological and biochemical characteristics. Next, an experiment was conducted to study the effect of gamma-radiation in the dose range from 0.1 to 3 kGy on isolated cultures that were irradiated in the form of a suspension with a cell concentration of about 10⁷ CFU/ml. For the obtained cultures the decimal reduce dose – D₁₀ were determined. It is amounted to 0.314 and 0.191 kGy. As a result, it was shown that gamma radiation at a dose of 3 kGy makes it possible to completely inactivate the studied bacteria.

Keywords: *listeria, gamma radiation, radiosensitivity, microbiological safety, animal origin food products*

ПОЛИМОРФИЗМ IRAP МАРКЕРОВ В ПОПУЛЯЦИЯХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Смирнова Е.А.¹, Крылова П.С.², Бондаренко С.В.², Бондаренко Е.В.³, Бондаренко В.С.³, Гераськин С.А.³

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» 249040 Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д.1, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева 127550, г. Москва, Тимирязевская улица, д. 49, Российская Федерация

³ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация

Представлены результаты молекулярно-генетического анализа хронически облучаемых популяций сосны обыкновенной, произрастающих в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Оценка генетической изменчивости популяций сосны проводилась с помощью IRAP-маркеров на основании полиморфизма фрагментов ДНК, расположенных между ретротранспозонами. Результаты исследований позволили кластеризовать популяции в соответствии с уровнем радиоактивного загрязнения.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, хроническое облучение, авария на Чернобыльской АЭС, генетическая изменчивость, ретротранспозоны, IRAP-анализ

Объектом исследования является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), которая рекомендована Международной комиссией по радиационной защите в качестве референтного вида при оценке последствий облучения для природных экосистем [2]. Популяции сосны играют важную роль в формировании структуры и функционировании лесных экосистем, поэтому оценка их генетической изменчивости является актуальной задачей для охраны окружающей среды и сельского хозяйства.

Изменения в генетической структуре хронически облучаемых популяций сосны обыкновенной могут свидетельствовать о процессе адаптации к стрессовому воздействию. Один из самых информативных способов оценки генетического разнообразия и частоты мутаций в популяциях растений заключается в использовании молекулярных маркеров. В настоящей работе был выбран метод IRAP (Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism), который представляет собой анализ полиморфных участков ДНК, амплифицированных между ретротранспозонами. Для этого в исследовании использовались 6 IRAP-маркеров

(IR_1: 5'AACTTGGGGTTGACATACAACAGGCATCGA3'; IR_3: 5'GTTCAAATCCCTTGTGGCT3'; IR_4: 5'TTCCAAAGTTTGGGGCCAAGTTCCGGTT3';

IR_5: 5'TTGAAGAAGGGCCAGAACCTAGTTCCTCCG3'; IR_7: 5'CTGTGTGCGCCTATATTTCCA3' и IR_9:

5'ATCTGGGGCTTCTTTGGACT3'), разработанных к длинным концевым повторам ретротранспозонов, дифференциально экспрессирующихся в сосне обыкновенной после воздействия теплового стресса и повреждений насекомыми [5].

Отбор проб проводили на территории Полесского радиационно-экологического заповедника (ПГЭРЗ) Гомельской области Республики Беларусь с разным уровнем радиоактивного загрязнения, оцененным с помощью дозиметра-радиометра МКС-02СА1 (Россия) [1]. Были выбраны два контрольных участка в деревне Рудинка (Руд1 и Руд2) и три экспериментальных на территории ПГЭРЗ: Масаны (Мас), Кулажин (Кул), и Гнездинка (Гн) (Таблица 1). Биологический материал (хвою) отбирали с 11 деревьев каждого участка, с разных сторон дерева. Выделение ДНК проводилось набором для выделения ДНК Сорб-ГМО-Б (Синтол) по протоколу производителя.

Условия и стадии проведения ПЦР: первичная денатурация 95 °С – 7 мин, денатурация 98 °С – 10 с, отжиг 68 °С – 40 с, элонгация 72 °С – 1 мин 30 с, финальная элонгация 72 °С – 5 мин. Для повышения специфичности продуктов реакция ПЦР проводилась по методу «touch down», т.е. отжиг праймеров осуществлялся в условиях температурного инкремента с 68 до 60 °С первые 11 циклов. Ампликоны разделяли с помощью электрофореза в 2 % агарозном геле с использованием ТАЕ буфера при напряжении 50 В. Для визуализации ДНК использовался краситель SYBR Green. Использовались маркеры длин производства ЗАО Евроген. Визуализация гелей проводилась в GelDoc Go Imaging System (BioRad). Статистическая обработка результатов в виде бинарных матриц проводилась в программе GenAlEx v.6.5 [4].

При исследовании 6 IRAP-маркеров суммарно проанализированы 128 аллелей. Длина фрагментов ДНК варьировала от 130 до 1500 п.н.

В таблице 1 представлены средние значения показателей генетического разнообразия локусов в исследуемых популяциях сосны.

Согласно таким показателям, как индекс Шеннона (I) и гетерозиготность (uHe), популяция сосны на экспериментальном участке Мас имеет самое

высокое (0,22 и 0,14) генетическое разнообразие, а самое низкое выявлено на участке Гн (0,17 и 0,10). Участок Мас выделяется также высоким значением полиморфизма аллелей в популяции: 52 %.

На рис. 1 представлен паттерн полиморфных аллелей по 6 IRAP-маркерам.

Таблица 1.

Средние значения показателей генетического разнообразия популяций сосны, произрастающих на участках с разной мощностью AMBIENTНОЙ ДОЗЫ (МАД)

Попул.	МАД(γ), мкЗв/ч	N	Na± SE	Ne± SE	I± SE	He± SE	uHe± SE	P, %
Руд1	0,11	11	0,92±0,09	1,19±0,03	0,20±0,02	0,12±0,01	0,14±0,02	46
Руд2	0,10	11	0,95±0,09	1,19±0,02	0,20±0,02	0,12±0,01	0,14±0,02	48
Гн	0,26	11	0,83±0,09	1,15±0,02	0,17±0,02	0,10±0,01	0,11±0,01	41
Мас	2,67	11	1,03±0,09	1,21±0,02	0,22±0,02	0,14±0,01	0,15±0,02	52
Кул	9,85	11	0,88±0,09	1,17±0,02	0,19±0,02	0,12±0,01	0,13±0,02	44

Примечание. N – количество образцов; Na – количество различных аллелей; Ne – число эффективных аллелей; I – информационный индекс Шеннона; He – ожидаемая гетерозиготность; uHe – неискаженная гетерозиготность; SE – стандартная ошибка.

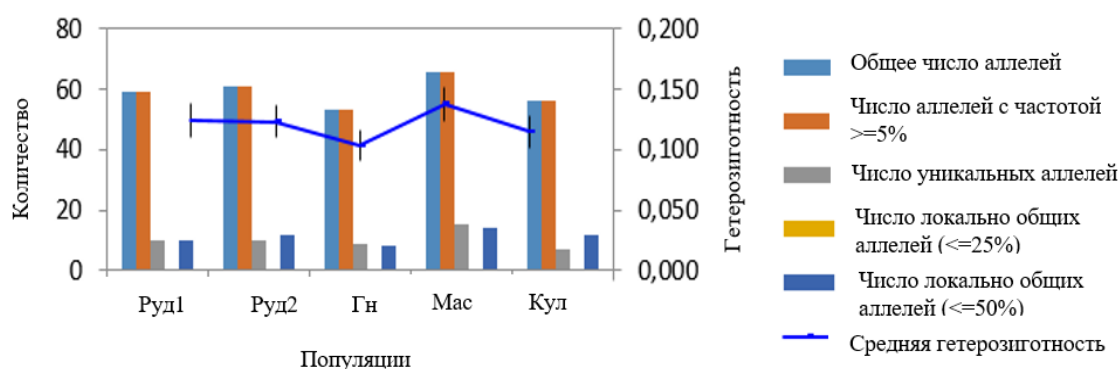


Рисунок 1. Общий паттерн аллелей для бинарных данных популяций сосны по IRAP-маркерам

Популяция сосны с участка Мас имеет самое большое количество аллелей (66), в том числе уникальных (15), по сравнению с остальными популяциями.

Анализ молекулярного разнообразия (AMOVA) показал, что сосна обыкновенная обладает высоким уровнем внутривидового генетического разнообразия (95 %), и лишь 5 % приходится на межпопуляционную составляющую. Более высокой степенью генетической дивергенции от остальных отличается популяция сосны с участка Мас, и самое большое генетическое расстояние Нея [6] было выявлено между популяциями Мас и Руд1 (0,027 у.е.).

Сравнение степени генетического разнообразия в популяциях по 6 IRAP-маркерам было проведено с использованием кластерного анализа по методу UPGMA. На дендрограмме, построенной на основании генетического расстояния, рассчитанного по Нею [3], наблюдается кластеризация популяций сосны в соответствии с уровнем радиоактивного загрязнения. Популяции с 2 импактных участков с наибольшим уровнем загрязнения – Кул и Мас – объединены

в одну подгруппу. Популяции с контрольных участков Руд2 и Руд1 находятся в отдельных подгруппах и характеризуются относительно низким генетическим разнообразием.

Таким образом, использованные IRAP-маркеры, подобранные к ретротранспозонам с дифференциальной экспрессией после воздействия на сосну теплового стресса и повреждений, оказались достаточно информативными для кластеризации популяций. Межпопуляционные различия уровня генетического разнообразия в целом, однако, незначительны. Популяция с импактного участка Мас выделилась наивысшим уровнем полиморфности локусов и средней гетерозиготности. Высокое количество уникальных аллелей в популяции Мас может косвенно свидетельствовать об активации ретротранспозонов и внутривидовых генетических перестройках. Используемые ретротранспозоны, после проведения дополнительных исследований, можно рекомендовать в качестве молекулярных маркеров радиоактивного загрязнения среды.

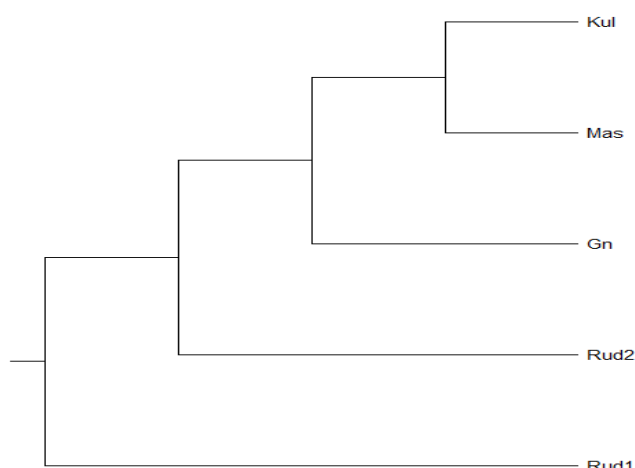


Рисунок 2. Генетическая дифференциация популяций сосны по IRAP-маркерам (на основе генетического расстояния Нея)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-16-00004.

Список литературы

1. Шестерикова Е.М. и др. Оценка активности антиоксидантного фермента каталазы в популяциях *Pinus sylvestris* L., произрастающих в условиях хронического радиационного воздействия в чернобыльской зоне отчуждения // Международная молодежная конференция «Современные проблемы радиобиологии, радиозологии и агроэкологии». 2021. С. 111–113.

2. ICRP, Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Annals of the ICRP. 2008. Vol. 38. No. 4–6.

3. Nei M., Li W.H. Mathematical Model for Studying Genetic Variation in Terms of Restriction Endonucleases // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 1979. Vol. 76. P. 5269–5273.

4. Peakall R., Smouse P.E. GenAEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update // Bioinformatics. 2012. Vol. 28. P. 2537–2539.

5. Voronova A., Rungis D. Development and Characterisation of IRAP Markers from Expressed Retrotransposon-like sequences in *Pinus sylvestris* L. // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences. 2014. Vol. 67. P. 485–492.

POLYMORPHISM OF IRAP MARKERS IN SCOTS PINE POPULATIONS FROM THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

Smirnova E.A.¹, Krylova P.S.², Bondarenko S.V.², Bondarenko E.V.³, Bondarenko V.S.³, Geras'kin S.A.³

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

³ Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The current study shows the results of molecular genetic analysis of chronically irradiated Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Chernobyl exclusion zone. Genetic diversity was assessed using IRAP markers based on the polymorphism of DNA fragments located between retrotransposons. The results allowed clusterization of the populations according to the level of radioactive contamination.

Keywords: Scots pine, chronic exposure, Chernobyl accident, genetic diversity, retrotransposons, IRAP analysis

The object of the study, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), was recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) as a reference species for estimating the effects of radiation in natural ecosystems. To estimate genetic diversity and mutation rates, samples of biological material (needles) were collected at five sites of Gomel oblast: Rud1 and Rud2 with a background level of radioactive contamination as the control sites; Mas, Kul, and Gn – radioactively contaminated as a result of the Chernobyl accident. The needles were sampled from 11 trees and then used for IRAP analysis and estimation of the polymorphism of DNA fragments located between retrotransposons.

6 IRAP markers, matched to retrotransposons with differential expression after exposure to heat stress

and damage to pine, turned out to be rather informative for clustering Scots pine populations according to the level of radioactive contamination. Interpopulation differences in the level of genetic diversity, however, were generally insignificant. The population from the Mas site was distinguished by the highest level of loci polymorphism and average heterozygosity. A high number of unique alleles in the Scots pine population from Mas site may indirectly indicate the activation of retrotransposons and intrapopulation genetic rearrangements. Retrotransposons used in this study can be recommended as molecular markers of radioactive contamination of the environment.

УДК 57.033

ADAPTIVE RESPONSES OF TUBE SUNFLOWER (*HELIANTHUS TUBEROSUS* L.) PLANTS UNDER CONDITIONS OF INCREASED RADIOACTIVE BACKGROUND

Tiurin K.N.^{1,2}, Polivanova O.B.², Smolina G.A.²

¹MIPT, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9, p. 1, Russian Federation

²FSBEI HE RSAU-MTAA named after K.A. Timiryazev, Moscow, st. Timiryazevskaya 49, Russian Federation
e-mail: k.vivo@internet.ru

The influence of elevated content of ¹³⁷Cs in soil in the range of 2.85 - 4.64 Ci/km² on the system of enzymatic and low molecular weight antioxidants of tubers of tuberous sunflower plants was studied. It has been shown that growth under conditions of increased radioactive background can lead to an increase in the activity of ascorbate peroxidase and an increase in the concentration of ascorbic acid, alcohol- and water-soluble phenolic compounds.

Ключевые слова: *ionizing radiation, radiocesium, sunflower tuberous, antioxidant enzymes, low molecular weight antioxidants*

Helianthus tuberosus L. (tuberous sunflower or Jerusalem artichoke) is a promising agricultural crop that practically does not require care and special cultivation methods, while giving high yields of both underground and aboveground biomass [20]. This plant raw material is used as fodder, food and industrial [21].

The stress state occurs in plants under the influence of factors of biotic and abiotic nature, while there is a functional change in the state of the organism, followed by normalization and compensation of this state [7]. One of the environmental factors that can cause stress in a plant organism is ionizing radiation (IR), which induces an increased formation of reactive oxygen species (ROS) [Oxidative Damage to Plants], which are able to interact with many cellular components, causing functional disorders of vital processes [11; 8].

To protect against the damaging effects of ROS and products of lipid peroxidation (LPO), an antioxidant system (AO) functions in the plant cell, which constantly inactivates ROS with the help of enzymatic

antioxidants (EAO) [8; 1] and low molecular weight antioxidants (LMWAO) [13; 6], subdivided into classical and non-specific [17]. The presence of such a system determines the resistance of plants to oxidative damage, leads to a decrease in the severity of the damaging effect of ionizing radiation. The purpose of this work was to determine the activity of the main EAO and the content of classical and nonspecific LMWAO.

Methodology and materials

Selection of experimental plots

The territories of the Bryansk region contaminated with radionuclides after the accident at the Chernobyl nuclear power station (increased radioactive background) were chosen as experimental sites: Rozhny (ROZH) and Olkhovka (OLKH) villages. The territories of four regions not contaminated with radionuclides (natural radioactive background) were chosen as control areas - Moscow, Kaluga and Orlovskaya: Maslovo village

(Solnechnogorsk district; K1), Botovo village (Chernogolovka district; K2), Kolpna urban settlement (Oryol region; K3) and non-profit gardening partnership "Druzhba" (district of Zhukov; K4).

Plant material and soil samples.

Were taken tuberous sunflower (*Helianthus tuberosus* L) tubers. Samples of plant material were taken without disturbing the soil structure in August-September 2021; after collection, the tubers were stored in the soil under natural background radiation at room temperature. To measure the content of ^{137}Cs in the soil, samples were taken at each site in a layer of 0–5 cm and stored in a tightly closed container at room temperature.

Analysis of ^{137}Cs content in soil

The measurements were carried out according to GOST R 54038-2010 [4] on a Wizard 2480 γ -spectrometer (Perkin-Elmer, USA). Made in four repetitions.

Spectrophotometric analysis EAO

To assess the activity of catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) and peroxidase (POX) in tubers *Helianthus tuberosus* L., sample preparation was carried out according to the recommendations of Bisswanger [3]. Catalase activity was assessed according to the method of Goth [5], ascorbate peroxidase activity was assessed according to the method of Nakano, Asada [12], peroxidase activity was assessed according to the method of Popov, Nejkovska [16]. In each enzyme preparation, the protein concentration was additionally measured according to the method of Kruger [9]. Enzyme activities were converted to nCAT/g protein. All analyzes were carried out on a CARY 50 spectrophotometer (VARIAN, USA). Made in three analytical and biological repetitions.

Spectrophotometric analysis of LMWAO

To assess the content of LMWAO, they were first lyophilized, then ground to a powder state. The lyophilizates were stored in a refrigerator at 4 °C in a tightly closed container. The content of the sum of water- and alcohol-soluble phenolic compounds (WPS and SPS) was assessed according to the method of Amarowicz et al. [2], the content of flavonoids (FL) was assessed according to the Pekal method [], the antioxidant capacity of the water and lipid fractions of the total antioxidants (WTA and LTA) was assessed according to the method of Prieto et al. [18], assessment of the content of proline (PRO) according to the method of Shikhaleev et al. [19], assessment of the content of ascorbic acid (ASA) according to the method of Latypova et al. [10].

All analyzes were carried out on a CARY 50 spectrophotometer (VARIAN, USA). Made in three analytical and biological repetitions.

Statistical data processing was carried out using the methods of parametric and nonparametric statistics in Microsoft programs office Excel 2019 and Prism 9 2021. Data presented as mean \pm standard error. Significance of differences was assessed using one-way analysis of variance (ANOVA) in combination with Tukey's test. Correlation analysis using the Spearman correlation coefficient was used to assess the relationship between radiocesium activity, enzyme activity, and LMWAO content.

Results

An assessment of the content of the radionuclide ^{137}Cs in the soil showed that the control plots K1, K2, K3 and K4 (0.19 ± 0.01 ; 0.15 ± 0.01 ; 0.42 ± 0.01 ; 0.17 ± 0.01 Ci/km² respectively) are characterized by background values of radioactive contamination, while the sites of ROZH and OLKH (4.64 ± 0.03 ; 2.85 ± 0.03 Ci/km² respectively) are characterized by a low level of contamination.

Radiocesium activity-dependent changes in the activity of AO enzymes were found only for ascorbate peroxidase ($R_s = 0.66$, $p < 0.05$), while the activities of catalase and peroxidase did not depend on radiation exposure (RE) ($R_s = -0.03$ and -0.49 , respectively, $p < 0.05$) (Figure 1).

LMWAO concentrations correlated with the level of radiation exposure ($R_s = -0.2 - 0.89$, $p < 0.05$). The total antioxidant capacity correlated moderately - in the case of the water-soluble fraction of AO ($R_s = 0.60$, $p < 0.05$) or did not correlate at all - in the case of the lipid fraction of AO with the level of PBC ($R_s = 0.03$, $p < 0.05$), which indicates the average overall response of AOS *Helianthus tuberosus* L. to grow in conditions of high background radiation. On the other hand, we noted a strong correlation between the RE and the content of ASA ($R_s = 0.89$, $p < 0.05$). It was shown that the content of phenolic compounds correlated strongly with the RE in the case of water-soluble compounds ($R_s = 0.77$, $p < 0.05$) and weakly correlated in the case of alcohol-soluble compounds ($R_s = 0.26$, $p < 0.05$). The PRO content correlated weakly with the RE ($R_s = 0.43$ and $R_s = -0.20$, respectively, $p < 0.05$), and the FL content did not correlate ($R_s = 0.03$, $p < 0.05$) (Figure 2).

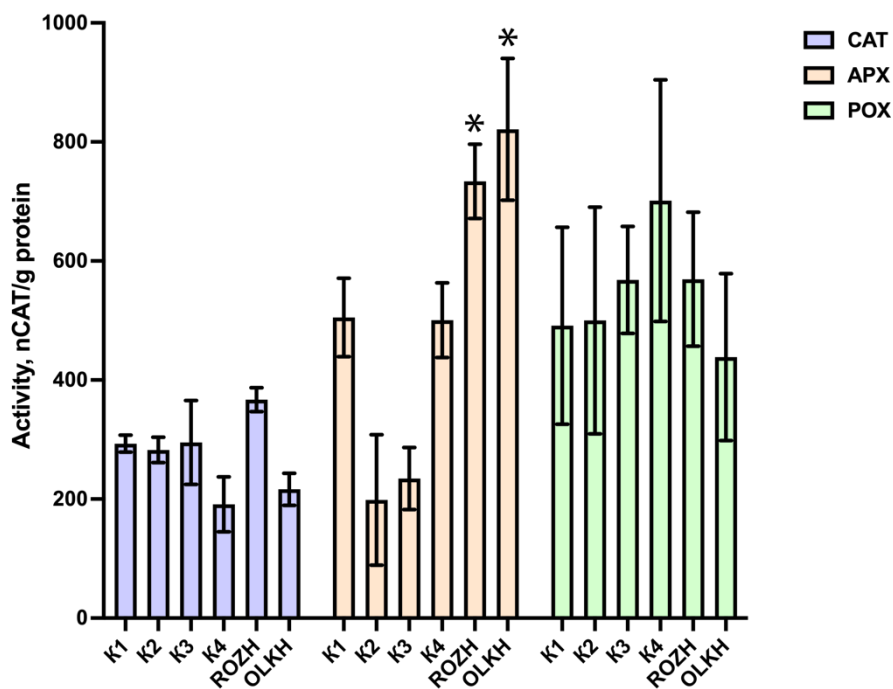


Figure 1. Activity indicators of catalase, ascorbate peroxidase and peroxidase

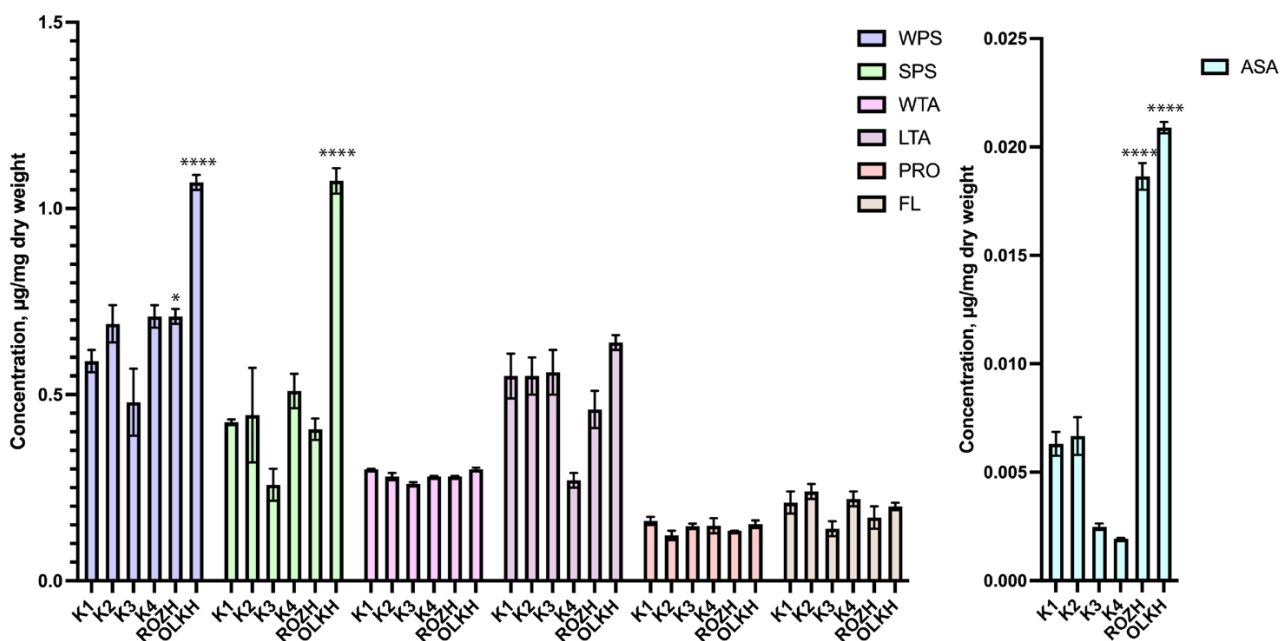


Figure 2. Concentrations of low molecular weight antioxidants

Bibliography

1. Alscher R.G., Erturk N., Heath L.S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants: Journal of experimental botany. 2002. Vol. 53. No. 372. P. 1331–1341.

2. Amarowicz R. et al. Effect of N fertilization on the content of phenolic compounds in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers and their antioxidant capacity: Agronomy. 2020. Vol. 10. No. 8. P. 1215.

3. Bisswanger H. Practical Enzymology. M.: BINOM. Knowledge Lab. 2013. 328 p.

4. GOST R 54038-2010 Method for determining ^{137}Cs in agricultural soils. 2012. 5 p.

5. Goth L. A simple method for determination of serum catalase activity and revision of reference range: Clinica Chimica ACTA. 1991. Vol. 196. P. 143–152.

6. Jaleel C.A. et al. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic

constraints: *Acta Physiologiae Plantarum*. 2009. Vol. 31. No. 3. P. 427–436.

7. Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V. Formation of adaptive reactions of plants to the action of abiotic stressors: *Osnova*. 2010. 352 p.

8. Kreslavsky V.D. et al. The signal role of reactive oxygen species during stress in plants: *Plant Physiology*. 2012. Vol. 59. No. 2. P. 163–178.

9. Kruger N.J. The Bradford method for protein quantitation: *The protein protocols handbook*. 2009. P. 17–24.

10. Latypova G.M. et al. Standardization of spring primrose leaves in terms of “ascorbic acid content”: Actual problems of medicine. 2012. Vol. 18. No. 10. P. 51–56.

11. Limon-Pacheco J., Gonsebatt M.E. The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress: *Mutation Research*. 2009. Vol. 674. P. 137–147.

12. Nakano Y., Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts: *Plant Cell Physiol*. 1981. Vol. 22. P. 867–880.

13. Noctor G., Foyer C.H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control: *Annual review of plant biology*. 1998. Vol. 49. No. 1. P. 249–279.

14. Oxidative Damage to Plants - Antioxidant Networks and Signaling [Editor by A. Parvaiz]: USA: Elsevier Inc. 2014. 635 p.

15. Pekal A., Pырzыnska K. Evaluation of aluminum complexation reaction for flavonoid content assay: *Food Analytical Methods*. 2014. Vol. 7. No. 9. P. 1776–1782.

16. Popov T., Neikovskaya L. Method for determining blood peroxidase activity: *Hygiene and Sanitation*. 1971. Vol. 10. P. 89–91.

17. Pradedova E.V., Isheeva O.D., Salyaev R.K. Classification of the antioxidant defense system as the basis for rational organization of experimental studies of oxidative stress in plants: *Plant Physiology*. 2011. Vol. 58. No. 2. P. 177–185.

19. Prieto P., Pineda M., Aguilar M. Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E: *Analytical biochemistry*. 1999. Vol. 269. No. 2. P. 337–341.

20. Shikhaleeva G.N. et al. Modified method for determining proline in plant objects: *Vesnik of V.N. Karazin. Series Biology*. 2014. No. 21. P. 168–172.

21. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Zvyagintsev P.S. et al. Jerusalem artichoke is a unique vegetable raw material: *Food industry*. 2015. No 8. P. 16–20.

22. Yaroshevich M.I., Evening N.N. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) is a promising culture of multi-purpose use: *Proceedings of the Belarusian State University*. 2010. Vol. 4. No 2. P. 1–12.

УДК 633.367

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА РАЗВИТИЕ ПРОРОСТКОВ *LUPINUS ANGUSTIFOLIUS* L., *LUPINUS LUTEUS* L. и *LUPINUS ALBUS* L.

Ханова А.С.¹, Крылова П.С.^{1,2}, Бондаренко В.С.¹, Битаршвили С.В.¹, Подобед М.Ю.¹, Празян А.А.¹, Блинова Я.А.¹, Бабина Д.Д.¹, Бондаренко Е.В.¹

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127550, г. Москва, Тимирязевская улица, д. 49, Российская Федерация
e-mail: micenyk-anastasi@mail.ru

Для изучения влияния γ -излучения на динамику прорастания и морфометрические параметры *Lupinus* L. семена трех видов люпина: *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus* – подвергли облучению в дозах 25, 50, 100, 200 и 400 Гр. Воздействие γ -излучения никак не повлияло на процент проросших семян люпина узколистного, желтого и белого, однако, с увеличением дозы статистически значимо увеличилось среднее время прорастания. Диапазон доз от 50 до 400 Гр статистически значимо уменьшал длину hypocotyle, корня и массу проростков *L. angustifolius*. Доза 50 Гр оказала стимулирующее воздействие на длину hypocotyle и корня *L. luteus* и *L. albus*. Анализ влияния γ -излучения на развитие проростков всех трех видов выявил самый чувствительный к γ -облучению параметр из изученных – длину hypocotyle. Для исследованных отечественных сортов *Lupinus* L. рассчитана доза, при которой длина hypocotyle уменьшается на 50 % (RD₅₀): *L. angustifolius* – 550 Гр, *L. luteus* – 660 Гр, *L. albus* – 400 Гр.

Ключевые слова: *L. angustifolius*, *L. luteus*, *L. albus*, гамма-облучение, параметры прорастания, морфометрические параметры

Из однолетних видов люпина на территории Российской Федерации в настоящий момент возделывают три: *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus*. *Lupinus* L. – культура многоцелевого использования. Люпин характеризуется рядом ценных сельскохозяйственных признаков, а именно: фиксацией азота в почве благодаря симбиозу с клубеньковыми бактериями, высоким содержанием белка и масла и низким содержанием ингибиторов трипсина, что делает люпин легкоусвояемым источником растительного белка [1, 2]. Поэтому *Lupinus* L. широко используют для улучшения плодородия почв, в кормопроизводстве и пищевой промышленности [2]. Тем не менее, несмотря на высокий потенциал использования люпина в сельском хозяйстве, есть ряд проблем, которые мешают его массовому возделыванию. Одной из таких проблем является низкая устойчивость люпина к грибковым фитопатогенам, в частности к антракнозу [3]. В связи с этим для решения данной проблемы встаёт необходимость увеличения генетического разнообразия отечественных сортов люпина, которое можно достигнуть при помощи радиационного мутагенеза [4], что в свою очередь, требует проведение ряда радиобиологических исследований для изучения фенотипического ответа и оценки радиочувствительности отечественных сортов люпина. Таким образом, целью данного исследования является оценка влияния

гамма-излучения на динамику прорастания семян, морфометрические (длина гипокотыля и корня, массу проростков) параметры проростков *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus*.

Сухие семена отечественных сортов люпина узколистного Белорозовый 144, люпина жёлтого Надёжный и люпина белого Мичуринский (любезно предоставленные ВНИИ люпина – филиал ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса», г. Брянск) облучали в дозах 25, 50, 100, 200 и 400 Гр с мощностью дозы 100 Гр/час на уникальной научной установке ГУР-120 (^{60}Co , ВНИИРАЭ) в 3-х повторностях по 20 семян в каждой. Семена выращивали в контролируемых условиях климатической камеры для культивирования растений. Статистическая обработка результатов проводилась в среде программирования R и MS Office Excel.

Процент прорастания семян люпина узколистного и люпина жёлтого не изменился под влиянием гамма-излучения по сравнению с растениями в контрольной группе. Однако с увеличением дозы статистически значимо увеличилось среднее время прорастания семян (рисунок 1).

Диапазон доз от 50 до 400 Гр статистически значимо ингибировал морфометрические параметры люпина узколистного (рисунок 2А, рисунок 3А, рисунок 4А).

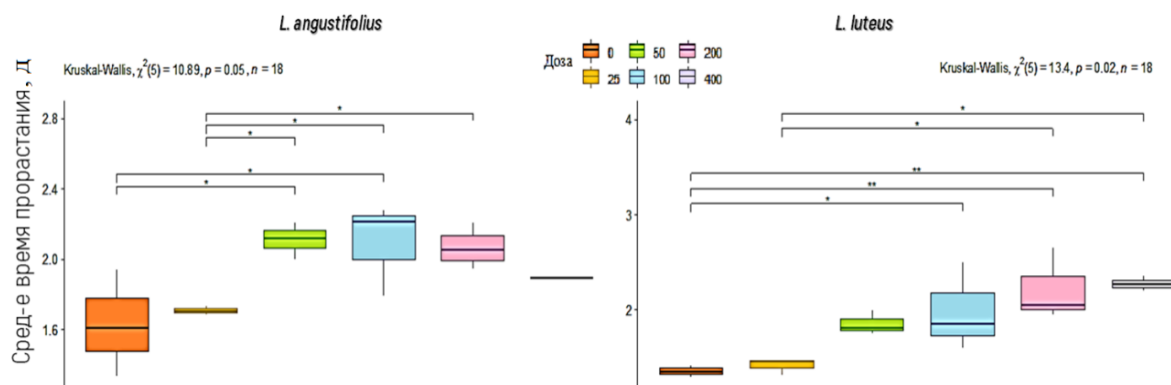


Рисунок 1. Среднее время прорастания семян *L. angustifolius* и *L. luteus*

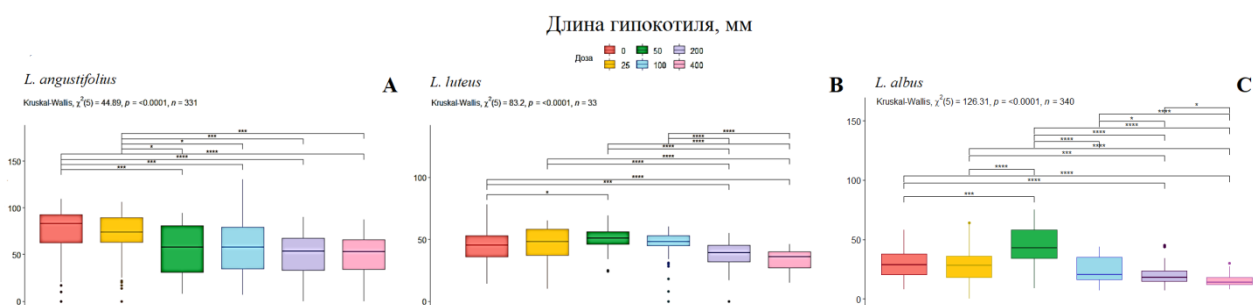


Рисунок 2. Оценка влияния гамма-облучения на длину гипокотыля *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus*

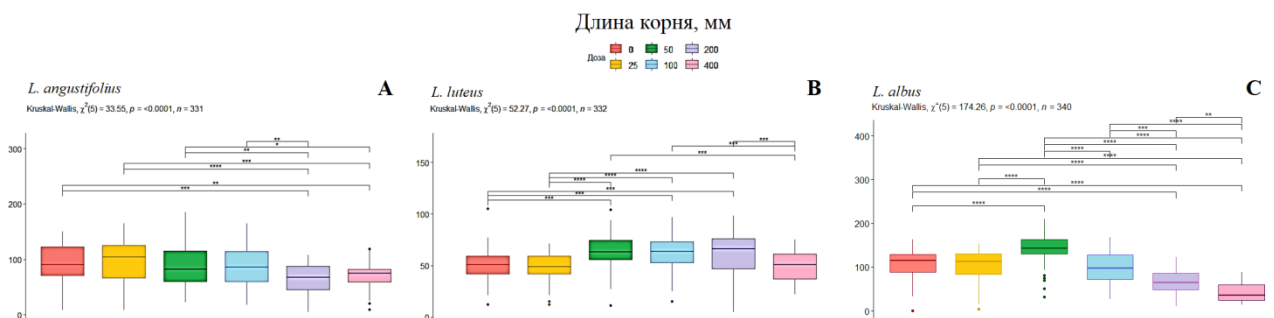


Рисунок 3. Оценка влияния гамма-облучения на длину корня *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus*

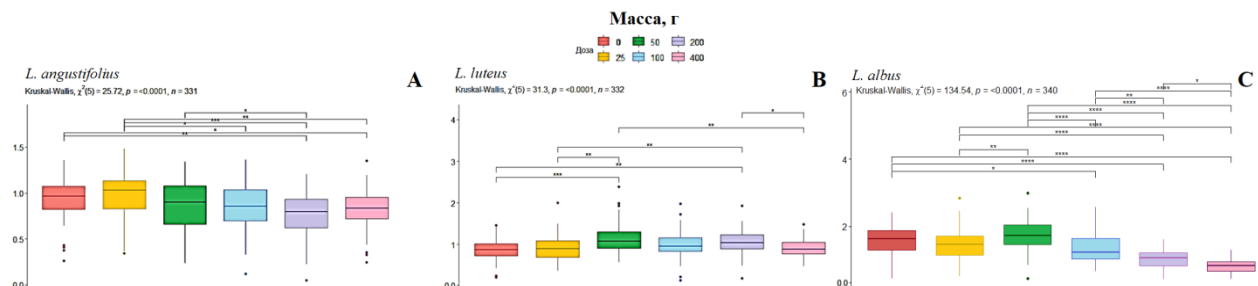


Рисунок 4. Оценка влияния гамма-облучения на массу проростков *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus*

В ответ на воздействие гамма-излучения в дозах 25, 50 и 100 Гр проростки сорта Белорозовый 144 имели развитую корневую систему, аналогично контрольной группе.

В результате анализа морфометрических параметров (масса, длина hypocotyle, корня) люпина жёлтого выявлен статистически значимый стимулирующий эффект в группе 50 Гр по сравнению с контролем (рисунок 2В, рисунок 3В, рисунок 4В). Воздействие излучения в дозе 200 Гр у *L. luteus*, как и у *L. angustifolius* при дозах 50 и 100 Гр, ингибировало

длину hypocotyle и стимулировало развитие корневой системы.

Доза 50 Гр оказала стимулирующий эффект на морфометрические параметры *L. albus*, проявившийся, так же, как и у *L. luteus*, в статистически значимом по сравнению с контролем увеличении длины hypocotyle и корня (рисунок 2С, рисунок 3С).

Между исследованными морфометрическими параметрами выявлена статистически значимая положительная корреляция у люпина узколистного, жёлтого и белого (рисунок 5).

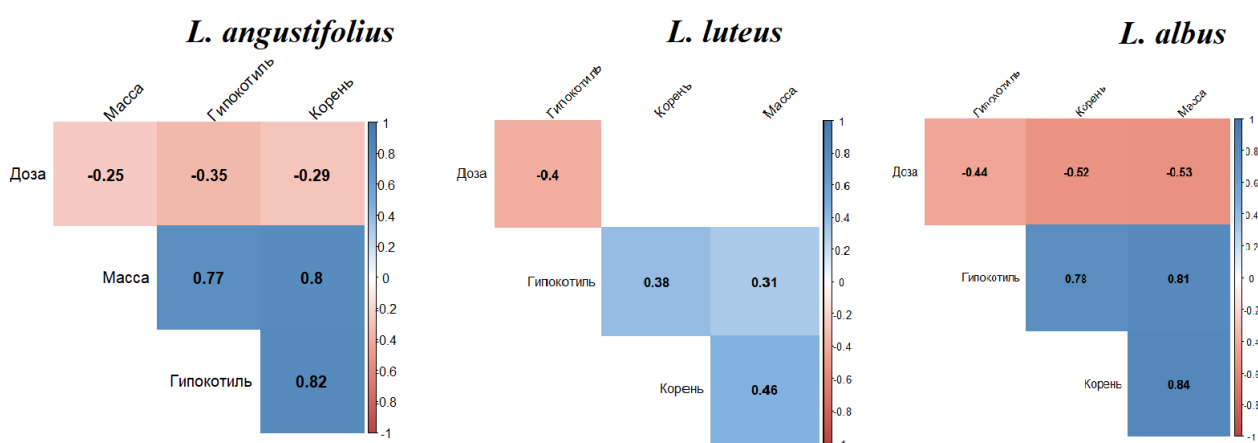


Рисунок 5. Корреляционная матрица изучаемых параметров (длина hypocotyle, длина корня, биомасса проростков). Цифрами представлены значения коэффициента корреляции Спирмена при $p < 0,05$.

Синим цветом обозначена положительная корреляция, **розовым** – отрицательная

У всех исследуемых видов люпина выявлена значимая положительная корреляция разной степени

(высокая корреляция у люпина узколистного и белого и слабая – у люпина желтого) между длинами

гипокотила и корня, длиной гипокотила и биомассой проростков, длиной корня и биомассой (рисунок 5). У *L. angustifolius* и *L. albus* отмечена статистически значимая отрицательная корреляция между исследуемыми морфометрическими параметрами и дозой гамма-излучения, а у люпина желтого – только между длиной гипокотила и дозой. Длина гипокотила, таким образом, оказалась самым чувствительным к гамма-облучению параметром.

Анализ фаз развития проростков показал, что дозы в диапазоне 100–400 Гр оказали негативное влияние как на скорость появления истинных листьев, так и на способность *L. angustifolius* их образовывать. В контроле и в группах, облученных в дозах 25 и 50 Гр, истинные листья появились на 24–48 часов раньше (на четвертые сутки прорастания), чем в группах, облученных в дозах 100–400 Гр.

Стадия появления первых истинных листьев у люпина жёлтого наступила на 7-е сутки в группе воздействия в дозе 50 Гр, что на 24 часа раньше, чем в контроле.

Начало образования первых истинных листьев *L. albus*, как и у *L. luteus*, пришлось на 8-е сутки в контроле; в группах 25 и 50 Гр – также на 8-е сутки, а в других группах – на 24–48 часов позже.

В результате эксперимента выявлена доза гамма-излучения, вызывающая 50 % уменьшение длины

гипокотила (RD_{50}). Для сорта Белорозовый 144 люпина узколистного величина RD_{50} составила 550 Гр, для люпина жёлтого сорта Надёжный – 660 Гр, а для люпина белого сорта Мичуринский – 400 Гр.

Полученные данные могут быть использованы в протоколах радиационного мутагенеза отечественных сортов люпина узколистного, жёлтого и белого, а также в решении других радиобиологических задач с использованием *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus* в качестве объектов исследования.

Список литературы

- 1 Хрулев А.А., Бесчетникова Н.А. Белок из люпина: технологии, применение, перспективы // Пищевая промышленность. 2015. Т. 12. С.63–65
2. Лукашевич М. И. и др. Достижения и перспективы селекции люпина // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. №. 2. С. 29–32.
3. Ksiazkiewicz M., Rychel-Bielska S., Plewinski P. et al. The resistance of narrow-leaved lupin to *Diaporthe toxica* is based on the rapid activation of defense response genes // Int. J. Mol. Sci. 2021. V 22. I. 2.
4. Анохина В.С., Дебелый Г.А. и др. Люпин: селекция, генетика, эволюция. – Минск: БГУ, 2012. 271 с.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECT OF GAMMA-IRRADIATION OF SEEDS ON THE DEVELOPMENT OF SEED LINGS OF *LUPINUS ANGUSTIFOLIUS* L., *LUPINUS LUTEUS* L., AND *LUPINUS ALBUS* L.

Khanova A.S.¹, Krylova P.S.^{1,2}, Bondarenko V.S.¹, Bitarishvili S.V.¹, Podobed M.Yu.¹, Prazyan A.A.¹, Blinova Ya.A.¹, Babina D.D.¹, Bondarenko E.V.¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

To study the effect of γ -irradiation on the germination dynamics and morphometric parameters of *Lupinus* L., the seeds of three lupine species, namely *L. angustifolius*, *L. luteus*, and *L. albus* were irradiated at doses of 25, 50, 100, 200, and 400 Gy. γ -irradiation had no impact on the percentage of germinated seeds of narrow-leaved, yellow and white lupine, however, it increased statistically significantly the average germination time with an increase in the dose. The dose range from 50 to 400 Gy statistically significantly reduced the length of the hypocotyl, root, and seedling weight of *L. angustifolius*. A dose of 50 Gy had a stimulating effect on the morphometric parameters of *L. luteus* and *L. albus*, characterized by a statistically significant increase in the length of the hypocotyl and root compared to the control. Analysis of the effect of γ -radiation over germination and morphometric parameters revealed the most sensitive parameter to γ -irradiation in all 3 species, i.e. the hypocotyl length. The dose reducing the average hypocotyl length by 50 % (RD_{50}) was determined for three studied Russian varieties of each of the three species of lupine: *L. angustifolius* – 550 Gy, *L. luteus* – 660 Gy, *L. albus* – 400 Gy. These results might be useful in the protocols of radiation mutagenesis of Russian varieties of narrow-leaved, yellow and white lupine.

Keywords: *L. angustifolius*, *L. luteus*, *L. albus*, gamma irradiation, germination parameters, morphometric parameters

Секция

РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ БИООБЪЕКТОВ

Авдюхина В.М.¹, Ананьев В.Ю.², Беклемишев М.К.³, Близнюк У.А.^{1,4}, Борщеговская П.Ю.^{1,4}, Болотник Т.А.³, Гордонова И.В.⁵, Золотов С.А.¹, Зубрицкая Я.В.¹, Ипатова В.С.⁴, Малюга А.А.⁶, Никитина З.К.⁵, Никитченко А.Д.¹, Родин И.А.^{3,7}, Студеникин Ф.Р.^{1,4}, Хмелевский О.Ю.¹, Черняев А.П.^{1,4}, Чуликова Н.С.⁶, Юров Д.С.⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Российская Федерация

² Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, г. Москва, Российская Федерация

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Российская Федерация

⁴ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Российская Федерация

⁵ ФГБНУ "Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений", г. Москва, Российская Федерация

⁶ Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Российская Федерация

⁷ ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), кафедра эпидемиологии и доказательной медицины, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: uabliznyuk@gmail.com

Исследования в области радиационной обработки объектов органического происхождения, проводимые в МГУ имени М.В. Ломоносова, направлены на анализ фундаментальных процессов, протекающих в объектах, после воздействия излучения, а также на повышение эффективности обработки объектов. Выявлены нелинейные зависимости химических и микробиологических показателей биообъектов от физических параметров ионизирующего излучения. Разработаны методы повышения однородности обработки ускоренными электронами. Найдены биохимические индикаторы радиационной обработки отдельных категорий пищевой продукции, а также ведутся исследования по разработке новых экспресс-методов выявления химических изменений в продуктах питания после воздействия излучения.

Ключевые слова: радиационная обработка, продукты питания, пучки электронов, химические и микробиологические показатели, повышение однородности, газовый хромато-масс-спектрометрический анализ, метод отпечатков пальцев, фитосанитарный анализ сельскохозяйственных культур, биохимические маркеры

Радиационная обработка с успехом применяется в промышленности и в сельском хозяйстве для стерилизации медицинских изделий и биоматериалов, дезинсекции зерновых культур, для продления сроков годности пищевой продукции, для контроля фитосанитарного состояния сельскохозяйственных культур и обеспечения микробиологической безопасности продуктов питания. Исследования на кафедре Физики ускорителей и радиационной медицины Физического факультета МГУ в области радиационной обработки совместно в Химическом факультетом, НИИЯФ МГУ, Всероссийским научно-исследовательским институтом лекарственных и ароматических растений, Сибирским Федеральным научным центром агробиотехнологий академии РАН и Роспотребнадзором ведутся по пяти направлениям.

Первое направление связано с повышением эффективности обработки ускоренными электронами, что продиктовано увеличением количества центров промышленной радиационной обработки в мире на базе ускорителей электронов с энергией до 10 МэВ в

связи с более высокой мощностью дозы, получаемой объектом, по сравнению с разрешенными для обработки радиоизотопами. При обработке электронами неизбежна неоднородность облучения объектов, обусловленная характером распределения поглощенной дозы по глубине объекта. Для решения этой проблемы нами был разработан метод с использованием комбинации алюминиевых пластин-модификаторов пучка, позволяющий увеличить равномерность распределения поглощенной дозы до 98 % для объектов толщиной до 8 см при двустороннем облучении ускоренными электронами с энергией 10 МэВ [1].

Другое направление посвящено реконструкции спектров пучка электронов, а также распределений поглощенной дозы в целевом веществе, например, в продукте, по экспериментально измеренному распределению дозы в эталонном веществе, например, в алюминии. Применяется компьютерное моделирование для расчета распределений поглощенной дозы в объекте из заданного вещества при облучении электронами с энергией до 10 МэВ. Далее

математически осуществляется подбор линейной комбинации моноэнергетических пучков электронов таким образом, что суммарное распределение дозы в объекте наилучшим образом приближает экспериментально измеренное распределение дозы в заданном объекте. В ходе исследования был предложен алгоритм восстановления спектров ускорителей электронов с точностью не менее 85 %, при этом точность реконструкции распределений поглощенной дозы по глубине объекта достигает 95 %. [2].

Третье направление исследований посвящено исследованию влияния характеристик ионизирующего излучения на микробиологические и химические показатели пищевой продукции. При планировании радиационной обработки продукта необходимо установить эффективный диапазон доз, при котором обеспечивается его микробиологическая безопасность, и при этом отсутствуют химические изменения в продукте. Исследования направлены на изучение влияния как характеристик самого объекта, а именно начальной обсемененности продукта, типов бактерий и микроорганизмов, населяющих продукцию, концентрации питательных веществ в продукте, химического состава, ферментативного состава, содержания воды в продукте, так и физических характеристик излучения, а именно, дозы, мощности дозы, типа излучения на границы эффективного диапазона доз. Предложены математические модели, описывающие поведение микробиологических и химических показателей продукции от физических характеристик излучения и предсказывающие сроки хранения продукции в зависимости от характеристик обработки [3].

Задача идентификации факта облучения пищевой продукции актуальна в связи с участвовавшими в последнее время фактами незадекларированной радиационной обработки пищевой продукции в России. В связи с этим отдельное направление исследований посвящено поиску биохимических маркеров радиационной обработки пищевой продукции. Метод газовой хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией, позволяет с высокой точностью определить низкие концентрации специфических органических летучих соединений, которые не обнаруживаются в необлученной продукции, но при этом их содержание устойчиво возрастает с увеличением дозы облучения продуктов. Обнаружен ряд соединений, являющихся потенциальными маркерами радиационной обработки отдельных категорий продуктов питания. Установлено, что в продуктах мясного и рыбного происхождения, а также в картофеле концентрация альдегидов возрастала с увеличением дозы обработки, и со временем хранения наблюдался пик возрастания содержания альдегидов, характерный для определенных доз облучения. Альдегиды, ответственные за формирование специфического вкуса и запаха продукции, могут быть универсальными маркерами радиационной обработки широкого спектра пищевой продукции [4].

Также ведутся исследования по разработке экспрессного метода выявления факта облучения пищевой продукции на основе флуориметрического метода «отпечатков пальцев». Были найдены специфические карбоцианиновые красители, при добавлении которых в облученный продукт возникают химические реакции агрегации и окисления, интенсивность которых зависит от концентрации веществ, вступающих в данные индикаторные реакции, и концентрация которых меняется при воздействии излучения. В результате меняется интенсивность флуоресценции красителя и спектры поглощения вещества продукта. Метод позволяет с точностью до 95% различить образцы картофеля, облученного в диапазоне доз от 10 Гр до 10 кГр [5].

Для нужд агропромышленного комплекса с целью повышения урожайности сельхоз культур ведутся исследования по поиску эффективного диапазона доз радиационной обработки картофеля и зерновых культур, зараженных грибковыми заболеваниями. В ходе двухлетнего исследования было изучены кинетика фенофаз растений, выращенных из клубней, прошедших радиационную обработку, урожайность культуры, степень заражения ризоктиниозом. Было получено, что поверхностная обработка картофеля ускоренными электронами с энергией до 1 МэВ в дозах от 40 до 50 Гр позволяет снизить степень заражения склероциальными и несклероциальными формами ризоктиниоза при незначительном снижении урожайности культуры [6].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075; при поддержке междисциплинарных научно-образовательных школ Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» и «Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология».

Список литературы

1. Студеникин Ф.Р., Близнюк У.А., Черняев А.П. и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2022. Т. 1. С. 3-9.
2. Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Y., Ipatova V.S. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. Vol. 86. P. 500-507.
3. Bliznyuk U., Borshchegovskaya P., Bolotnik T. et al. // Separations. 2022. Vol. 9, № 8. P. 227.
4. Bliznyuk U., Avdyukhina V., Borshchegovskaya P. et al. // Scientific reports. 2022. Vol. 12, № 1. P. 750.
5. Chernyaev A.P., Rozanov V.V., Beklemishev M.K. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. Vol. 84, № 11. P. 1380-1384.
6. Bliznyuk U., Chulikova N., Malyuga A. // KnE Life Sciences. 2022. Vol. 2022. P. 10106.

PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS OF IRRADIATION TREATMENT FOR BIOOBJECTS

**Avdyukhina V.M.¹, Ananiev V.Yu.², Beklemishev M.K.³, Bliznyuk U.A.^{1,4,a},
Borshchegovskaya P.Yu.^{1,4}, Bolotnik T.A.³, Gordonova I.V.⁵, Zolotov S.A.¹, Zubritskaya Ya.V.¹,
Ipatova V.S.⁴, Malyuga A.A.⁶, Nikitina Z.K.⁵, Nikitchenko A.D.¹, Rodin I.A.^{3,7}, Studenikin F.R.^{1,4},
Khmelevsky O.Yu.¹, Chernyaev A.P.^{1,4}, Chulikova N.S.⁶, Yurov D.S.⁴**

¹ Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia.

² FBUZ "Federal Hygienic and Epidemiological Center" of Rospotrebnadzor, Moscow, Russian Federation

³ Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russia.

⁴ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁵ All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russian Federation

⁶ Siberian Federal Research Center for Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Region, Krasnoobsk, Russian Federation

⁷ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, Moscow, Russian Federation

The Lomonosov Moscow State University is conducting research on the radiation treatment of objects of organic origin with the goal of analyzing the fundamental processes that take place in irradiated materials and increasing radiation processing efficiency. It has been discovered that the chemical and microbiological properties of biological objects rely nonlinearly on the physical characteristics of ionizing radiation. Methods for increasing the uniformity of processing by accelerated electrons have been developed. Biochemical indicators of radiation treatment of specific categories of food products have been discovered. Research is being conducted to create new express methods for identifying chemical changes in food products following radiation exposure.

Keywords: radiation treatment, chicken, foodstuffs, electron beams, chemical and microbiological parameters, method of improving homogeneity, gas chromatography-mass spectrometric analysis, fingerprint method, phytosanitary analysis of agricultural crops, biochemical markers

УДК 635.21:631.563/.547.1/.559.2

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ КАРТОФЕЛЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Андрианов С.В.

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха»
140051, Московская обл., г. Люберцы, д.п. Красково, ул. Лорха, д.23 «В», Российская Федерация
e-mail: and-585@yandex.ru

Технология возделывания картофеля принципиально состоит из двух основных блоков – выращивания и хранения. Существуют различные методы воздействия на клубни при хранении, обеспечивающие повышение урожайности в последствии и улучшение лёжкости при хранении. Как показали совместные исследования, проведённые в ФГБНУ «ФИЦ картофеля» и ФГБНУ ВНИИРАЭ, одним из таких перспективных методов является использование гамма-облучения в малых дозах.

Ключевые слова: картофель, гамма-облучение, убыль массы, биометрические показатели, урожайность

В зависимости от назначения различают картофель семенной, продовольственный и предназначенный для промышленной переработки [1]. При хранении семенного картофеля основное внимание уделяется сохранению и по возможности улучшению посадочных показателей клубней [2]. В этой связи помимо классических химических методов обработки интерес для изучения представляет гамма-облучение с целью достижения эффекта радиационного гормезиса, выражающегося в увеличении урожайности в последствии [3]. Хранение продовольственного и особенно предназначенного для переработки картофеля сопряжено с повышенной температурой, необходимой для исключения накопления в клубнях редуцирующих сахаров. По этой причине важным элементом технологии длительного хранения картофеля является применение различных ингибиторов прорастания клубней, в том числе и на основе радиационных методов обработки [4, 5].

Цель исследований: определить эффективность гамма-облучения семенных клубней картофеля при хранении на урожайность в последствии, а также изучить влияние гамма-облучения на лёжкость, биохимические показатели и пригодность картофеля к промышленной переработке.

Методика исследований

Исследования проводили в 2020–2022 гг. на базе ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». Облучение картофеля осуществляли в ФГБНУ ВНИИРАЭ (Калужская область, г. Обнинск) на УНУ «Гамма-установка радиационного облучения ГУР-120» (регистрационный номер 2795259), площадь гамма-облучения 2х2 м, интенсивность - 6 Гр в час.

Опыт №1 - облучение семенного картофеля с последующей посадкой на поле экспериментальной базы «Коренёво» ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». Фактор А - сорт картофеля - Гранд и Вымпел (оба среднеспелые); Фактор Б - доза гамма-облучения - контроль (без обработки), 1 Гр, 5 Гр, 10 Гр; Фактор В - срок гамма-облучения - сентябрь и апрель.

Опыт №2 - облучение продовольственного и предназначенного для переработки картофеля с оценкой потерь при длительном хранении. Фактор А - сорт картофеля - Гранд, Вымпел, Гала, Ред Скарлетт; Фактор Б - доза гамма-облучения - контроль (без обработки), 15 Гр, 25 Гр, 50 Гр; Фактор В - температура хранения - 6-7 °С для продовольственного картофеля; 9-10 °С для картофеля, предназначенного для промышленной переработки.

Определения и учёты проводили по общепринятым ГОСТам (29270-95, 26832-86) и методическим указаниям [6, 7].

Результаты исследований

Установлено, что гамма-облучение семенного картофеля малыми дозами 1Гр в последствии существенно влияло на интенсивность прорастания не оказывало. Облучение в дозах 5-10Гр приводило к задержке прорастания на 3–5 дней. Выявлено влияние различных сроков обработки картофеля. При гамма-облучении в сентябре отмечалось на 2–3 дня более позднее начало прорастания картофеля, чем при апрельском сроке облучения. Но к фазе происходило выравнивание в биометрических показателях растений.

Отмечено увеличение на 0,5–1,3 числа стеблей на куст по изученным сортам при гамма-облучении в дозе 10 Гр. Высота растений в зависимости от вариантов исследований колебалась в пределах 3-5 см и определённой зависимости от доз и сроков облучения не выявлено.

Установлено, что гамма-облучение семенного картофеля сорта Гранд в дозе 1 Гр при апрельском сроке обработки способствовало увеличению урожайности на 1,7 т/га. При этом отмечено снижение товарности клубней фракции 50+ мм на 4,1 %. По сорту Вымпел данный вариант обработки существенно от контрольного не отличался. Более высокие дозы обработки (5 и 10 Гр) независимо от сорта и срока обработки, как правило, негативно сказывались на урожайности и товарности клубней (табл. 1).

При хранении продовольственного картофеля установлено, что для достижения эффективного подавления прорастания клубней при температуре хранения 6–7 °С достаточно послеуборочного гамма-облучения в дозах 15–25 Гр. В зависимости от сорта, потери при хранении при температуре 6–7 °С за счёт гамма-облучения снижались на 0,9–2,9 %.

При температуре хранения 9–10 °С картофель начинал прорастать раньше и значительно более интенсивно, чем при 6–7 °С. На контрольных вариантах потери на ростки составляли от 5,4 до 14,6 %, что в 6–7 раз больше по соответствующим сортам, чем при 6–7 °С. Также при повышенной температуре хранения вдвое возрастала и сопряжённая с прорастанием величина естественной убыли массы (табл. 2).

С увеличением доз облучения потери на ростки наиболее сильно (в 2–3 раза в зависимости от сорта) снижались при переходе от 15 до 25 Гр. Таким образом, картофель оказался наиболее отзывчив на облучение в дозе 25 Гр и использование доз выше 50 Гр представляется едва ли целесообразным.

На контрольных вариантах (9–10 °С) по изученным сортам содержание редуцирующих сахаров в мае месяце составляло 1,0–1,3 %. При увеличении дозы облучения до 50 Гр оно снижалось до 0,5–0,6 %. Это позволяло получать хрустящий картофель и фри по показателю цвета равный 6 баллам, что соответствует минимально приемлемому качеству.

Таблица 1

Урожайность и товарность картофеля в зависимости от сорта, срока и дозы гамма-облучения семенных клубней при хранении (2021–2022 гг.)

Сорт	Срок облучения	Доза облучения, Гр	Урожайность, т/га	Товарность, % (50 мм +)
Гранд	Сентябрь	без обработки	17,0	17,7
		1	16,8	2,9
		5	16,4	18,1
		10	16,8	24,4
	Апрель	без обработки	17,0	17,7
		1	18,7	13,6
		5	16,1	18,3
		10	14,9	15,2
Вымпел	Сентябрь	без обработки	15,3	33,1
		1	16,4	29,5
		5	13,9	28,2
		10	13,3	30,3
	Апрель	без обработки	15,3	33,1
		1	15,2	35,9
		5	14,3	41,4
		10	13,8	31,9

Таблица 2

Потери картофеля при хранении в зависимости от сорта и дозы гамма-облучения при температуре хранения 9–10 °С (сентябрь – май в среднем за 2021–2022 гг.)

Сорт картофеля	Доза гамма-облучения, Гр	Потери всего, %	в том числе:			
			убыль массы, %	технический отход, %	абсолютная гниль, %	ростки, %
Вымпел	Контроль (без облучения)	39,6	16,8	5,6	2,7	14,6
	15 Гр	34,8	14,4	5,3	2,6	12,6
	25 Гр	25,6	11,8	5,5	2,5	5,9
	50 Гр	22,2	9,3	5,5	2,9	4,5
Гранд	Контроль (без облучения)	38,8	15,5	5,8	3,0	14,6
	15 Гр	33,1	14,5	5,1	3,0	10,5
	25 Гр	26,2	11,5	6,1	3,2	5,5
	50 Гр	20,9	9,4	5,6	3,2	2,7
Ред Скарлет	Контроль (без облучения)	21,6	10,8	3,7	1,8	5,4
	15 Гр	18,0	9,2	3,6	1,7	3,5
	25 Гр	14,9	8,1	3,6	1,7	1,6
	50 Гр	13,3	7,5	3,7	1,7	0,5
Гала	Контроль (без облучения)	30,4	16,1	3,9	2,0	8,5
	15 Гр	27,5	14,5	4,3	2,3	6,5
	25 Гр	19,0	10,1	4,5	2,3	2,2
	50 Гр	17,1	9,5	4,2	2,2	1,2

Существенного влияния изученных доз гамма-облучения на содержание в клубнях сухого вещества, крахмала, нитратов и витамина С не выявлено.

Выводы

Установлено положительное влияние на урожайность в последствии дозы гамма-облучения 1 Гр при апрельском сроке обработки на одном из двух изученных сортов - Гранд. В остальных вариантах исследования облучение отрицательно сказывалось на урожайности и товарности клубней.

При хранении продовольственного картофеля при температуре 6–7 °С гамма-облучение обеспечило снижение общих потерь на 0,9–2,9 %. Наиболее эффективной оказалась доза 15 Гр.

При хранении картофеля, предназначенного для промышленной переработки (9–10 °С), гамма-облучение при 50 Гр способствовало снижению общих потерь на 8,3–17,9 % или в 1,6–1,9 раза в зависимости от сорта. Причём основная часть данного снижения потерь отмечалась уже при 25 Гр.

Существенного влияния изученных доз гамма-облучения на такие биохимические показатели клубней картофеля, как содержание сухого вещества, крахмала, нитратов и витамина С не выявлено.

Список литературы

1. Пшеченков К.А., Смирнов А.В., Мальцев С.В. Современное состояние и перспективы развития картофельного комплекса России // Защита картофеля. 2017. № 1. С. 22–29.

2. Мальцев С.В., Абросимов Д.В., Абашкин О.В. Хранение семенного картофеля с использованием химических и физических методов воздействия на клубни // Картофель и овощи. 2019. № 5. С. 31–34.

3. Jargis S.V. Hormesis and radiation safety norms. Human & experimental toxicology. 2012. № 31. P. 671–675.

4. Мальцев С.В., Андрианов С.В., Митюшкин А.В. Эффективность применения ингибиторов прорастания при хранении сортов картофеля различного целевого использования // Картофель и овощи. 2021. № 3. С. 29–33.

5. Мальцев С.В., Пшеченков К.А. Обработка клубней ингибитором прорастания снижает потери при хранении // Картофель и овощи. 2009. № 1. С. 9.

6. Пшеченков К.А., Давыденкова О.Н., Седова В.И., Мальцев С.В., Чулков Б.А. Методические указания по оценке сортов картофеля на пригодность к переработке и хранению. М.: ВНИИКХ, 2007. 39 с.

7. Доспехов Б.А. и др. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 1985.

PROSPECTS FOR THE USE OF GAMMA IRRADIATION DURING STORAGE OF POTATOES INTENDED FOR VARIOUS PURPOSES

Andrianov S.V.

Russian Potato Research Centre, Moscow Region, Russian Federation

Potato cultivation technology basically consists of two main blocks – growing and storage. There are various methods of influencing tubers during storage, providing an increase in yield in the aftereffect and an improvement in shelf life during storage. As shown by joint research conducted at the Russian Potato Research Centre and Russian Institute of Radiology and Agroecology, one of such promising methods is the use of gamma irradiation in small doses.

Keywords: *potatoes, gamma irradiation, weight loss, biometric indicators, yield*

The conducted studies revealed an increase in the yield of the Grand variety by 1.7 t/ha due to pre-planting irradiation of seed potatoes. It has also been found that gamma irradiation of potatoes in the post-harvest period is a very effective technique to restrain the germination of tubers and reduce the weight losses of potato during long-term storage. When storing ware potatoes at a temperature of 6–7 °C, gamma irradiation (15–25 Gy) provided a decrease in total weight losses by 0.9–2.9 %. When storing potatoes intended for

industrial processing (9–10 °C), the reduction in weight losses from gamma irradiation at 50 Gy was 8.3–17.9 % or 1.6–1.9 times, depending on the variety.

There was no significant effect of the studied doses of gamma radiation on such biochemical parameters of potato tubers as the content of dry matter, starch, nitrates and vitamin C. However, there was a decrease of up to two times the content of reducing sugars, which is very important for potatoes intended for industrial processing.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ ДОЗИМЕТРА ФРИККЕ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМОЙ ПРИ РАЗНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА

Басырова Д.В., Харламов В.А., Горбатов С.А., Петрухина Д.И., Глущенко Н.В., Меджидов И.М., Шишко В.И., Тхорик О.В., Иванов И.А., Тихонов В.Н., Тихонов А.В.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: reckunowa.dasha@yandex.ru; kharlamof@gmail.com*

В работе рассмотрены окислительные свойства аргоновой нетермальной плазмы атмосферного давления при однократном воздействии на дозиметр Фрикке. Ферросульфатный дозиметр применяется для измерения больших доз ионизирующего излучения. Полученные результаты близки к значениям поглощенной дозы для биологических тканей, где в качестве среды также использован водный раствор. Цель исследования – изучить эффективность воздействия нетермальной плазмы на ферросульфатный дозиметр (дозиметр Фрикке) для измерения окислительных свойств при разной скорости потока газа. Показано, что под воздействием плазмы в пробе ферросульфатного дозиметра образуются окислители, что характеризуется изменением оптической плотности при длине волны 304 нм. Изменение концентрации окисленной формы иона железа Fe^{3+} от скорости потока подачи аргона имеет зависимость близкую к линейной.

Ключевые слова: ферросульфатный дозиметр Фрикке, нетермальная плазма, скорость потока газа, эффективность обработки, спектрофотометрический метод анализа

Введение

Во многих странах используют радиационную обработку в сельском хозяйстве и пищевом производстве. Наиболее широкое применение нашли установки и ускорители электронов, но все чаще стали находить применение методы обработки с помощью нетермальной плазмы, что делает проблему ее использования актуальной [5].

В настоящее время возникает необходимость поиска и внедрения новых методик для увеличения качества продуктов питания после их обработки. Перспективным методом исследования является использование нетермальной плазмы с целью увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и их защиты во время хранения. Нетермальная плазма представляет собой частично ионизированный газ, состоящий из электронов, ионов и нейтральных частиц, полученный при атмосферном давлении и имеющий макроскопическую температуру, близкую к температуре окружающей среды. Эта технология может быть использована для инактивации микроорганизмов, находящихся на материалах и средах, используемых в технологических процессах в сельском хозяйстве [4].

Стоит отметить ряд преимуществ нетермальной плазмы: высокая неспецифическая бактерицидная активность; низкая вероятность появления устойчивых форм; отсутствие ионизирующих излучений и высокотоксичных веществ; комфортная температура; относительная простота и дешевизна методики; отсутствие специфических требований к обрабатываемой поверхности [3]. Подходы, основанные на

использовании холодной плазмы, определяют современный прогресс во многих областях науки, техники, биомедицине и, в частности, в области химической технологии и экологии [2].

При радиационной обработке биообъектов используют средства контроля параметров и характеристик поля излучения. Дозиметр Фрикке является одним из таких средств, его принцип работы основан на окислении Fe^{2+} продуктами радиолитического распада воды в кислом водном растворе и последующем измерении концентрации образовавшихся ионов Fe^{3+} , которая в широком диапазоне пропорциональна поглощенной дозе [6]. Доказано, что ферросульфатный дозиметр может быть использован для дозиметрии смешанного γ -нейтронного излучения реакторов в широком диапазоне мощностей и доз до 750 Гр [7]. Применимость дозиметра Фрикке для изучения окислительных свойств была доказана в статье «Использование дозиметра Фрикке для измерения окислительных свойств нетермальной плазмы» [8].

Так как в литературе имеется достаточно информации об использовании ферросульфатного дозиметра Фрикке при облучении различными источниками и возникновении при этом окислительного эффекта, сопровождаемого переходом ионов железа Fe^{2+}/Fe^{3+} , принято решение изучить эффективность его обработки нетермальной аргоновой плазмой при разной скорости подачи газа.

Материалы и методы исследования

В работе применяли источник нетермальной СВЧ плазмы «Пластер-СВЧ» (рис.1) при давлении,

близком к атмосферному, сконструированный на базе ФГБНУ ВНИРАЭ, г.Обнинск. Он предназначен для обеспечения возможности создания и поддержания микроволнового разряда в потоке аргона.



Рисунок 1. Внешний вид СВЧ генератора нетепловой плазмы

С техническими характеристиками СВЧ генератора можно ознакомиться на сайте производителя установки [1]. Параметры установки при воздействии на дозиметр Фрикке 0,001 М были следующие: расход аргона – 3, 5, 7, 10 л/мин; мощность установки – 1 уровень (2А); расстояние до облучаемого объекта – 16 см; тип облучения – в конусе; диаметр чашек Петри при облучении – 8,5 см; объем облучаемого раствора – 30 мл.

Определение окислительных свойств нетермальной плазмы

Объектом исследования служил 0,001 М ферросульфатный дозиметр Фрикке, приготовленный

следующим образом: 0,392 г/л (0,001 М) водный раствор соли Мора; 26,8 мл/л концентрированной серной кислоты; 0,06 г/л хлорида натрия.

Для измерения окислительных свойств 30 мл полученного раствора помещали в чашку Петри ($d=8,5$ мм), располагали внутри конусовидной насадки и устанавливали на расстоянии 16 см до источника облучения. Эксперимент проводили в трехкратной повторности. Время экспозиции составило 5 мин, скорость потока аргона была выбрана с учетом нормального функционирования источника нетермальной плазмы – 5, 7, 10 л/мин.

Непосредственно после облучения проведено измерение оптической плотности при длине волны 304 нм на спектрофотометре СФ-2000. Раствором сравнения является 0,001 М ферросульфатный дозиметр Фрикке необработанный плазмой. Измерение проводили при температуре в помещении 20° С. Молярную концентрацию ионов железа Fe^{3+} рассчитывали на основании закона Бугера-Ламберта-Бера.

Результаты исследования и обсуждения

Обработка полученных данных проводилась с помощью программы Microsoft Excel 2019. В ходе работы были получены следующие результаты: при 5 л/мин - $2,50 \cdot 10^{-5}$ моль/л Fe^{3+} , при 7 л/мин - $4,28 \cdot 10^{-5}$ моль/л Fe^{3+} , при 10 л/мин - $5,49 \cdot 10^{-5}$ моль/л Fe^{3+} и построена гистограмма (рис.2) для визуализации происходящих процессов.

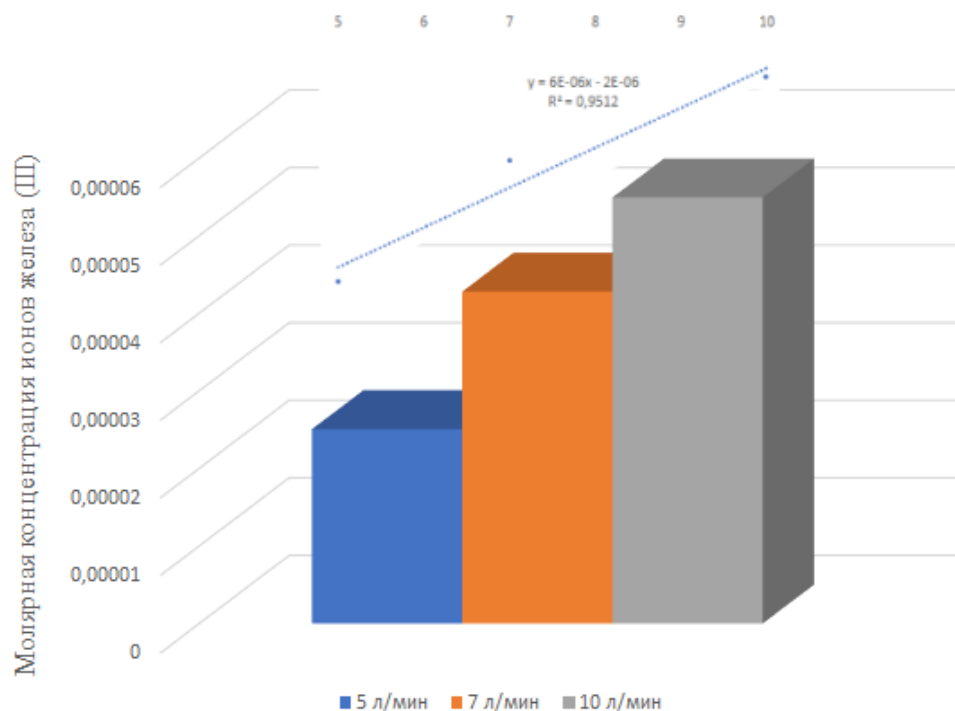
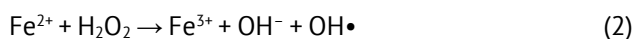


Рисунок 2. Содержание ионов железа Fe^{3+} в растворе дозиметра Фрикке после его облучения нетермальной плазмой: **1** – скорость потока аргона 5 л/мин; **2** – скорость потока аргона 7 л/мин; **3** – скорость потока аргона 10 л/мин

Было установлено, что после однократного воздействия нетермальной плазмой в пробах ферросульфатного дозиметра возрастает концентрация окислителей прямо пропорционально изменению скорости потока газа. Зависимость имеет характер, близкий линейному и описывается уравнением $y = 6 \cdot 10^{-6}x + 2 \cdot 10^{-6}$. При увеличении скорости потока аргона с 5 до 10 л/мин концентрация ионов трехвалентного железа увеличилась более чем в 2 раза (с $2,50 \cdot 10^{-5}$ до $5,49 \cdot 10^{-5}$).

Основной вклад в накопление окислителей в растворах вносит коротковолновая область УФ-излучения низкотемпературной газоразрядной плазмы. При действии ионизирующего излучения на ферросульфатный дозиметр двухвалентное железо окисляется в трехвалентное по следующему механизму:



Дозиметр Фрикке показал линейный отклик при воздействии нетермальной аргоновой плазмой. Как и ожидалось из механизма, лежащего в основе ферросульфатного дозиметра, доза демонстрировала линейную зависимость с выходами ионов Fe^{3+} в 0,001М растворе Фрикке, что отражается в изменении значения оптических плотностей.

Настоящее исследование позволяет оценить эффективность воздействия плазмой на ферросульфатный дозиметр Фрикке при различных скоростях потока газа. Как показало исследование, для увеличения эффективности обработки объектов сельскохозяйственных культур и пищевой продукции необходимо использовать наибольшее значение скорости потока аргона – 10 л/мин.

Список литературы

1. Агроэкотех. СВЧ генератор нетепловой плазмы. URL: <https://agroecotech.ru/index.php/katalog/svch-generator-neteplovoj-plazmy> (дата обращения: 28.03.2022).

2. Акишев Ю.С. Низкотемпературная плазма при атмосферном давлении и ее возможности для приложений // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2019. т.62 №8. с. 26–60.

3. Герасименко М. Ю., Зайцева Т.Н., Евстигнеева И.С. Низкотемпературная плазма – перспективный метод реабилитации // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация – сентябрь 2019. т.1 №3. с. 79 – 89

4. Делягин В.Н., Карзанов А.Н., Некрасов М.Ю., Бочаров В.И. Использование низкотемпературной плазмы для инактивации микроорганизмов // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: материалы Международной научно-технической конференции (р.п. Краснообск, 7-8 октября 2021 г.) / ФГБУ науки Сибирский федеральный Научный Центр агроботехнологий РАН. Новосибирск, 2021. с. 210–213

5. Павлов А.Н., Пименов Е.П., Снегирев А.С. и др. Практические аспекты применения современных радиационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности // Товаровед продовольственных товаров №3, 2020.

6. Павлов А.Н., Чиж Т.В., Воробьев М.С. Дозиметрические системы в современной практике радиационной обработки // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018.с. 166–168.

7. Потетня В.И., Корякина Е.В., Трошина М.В., Корякин С.Н. Применение химического дозиметра Фрикке и его модификаций для дозиметрии гамма-нейтронного излучения импульсного реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2021. №02. с. 106–118

8. Техногенные системы и экологический риск: Тезисы докладов V Международной (XVIII Региональной) научной конференции / Под общ. ред. А.А. Удаловой. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2022. с. 311–313

EFFICIENCY OF TREATMENT OF THE FRICKKE DOSIMETER WITH NON-THERMAL PLASMA AT DIFFERENT GAS FLOW RATES

Basyrova D.V., Kharlamov V.A., Gorbatov S.A., Petrukhina D.I., Glushchenko N.V., Medzhidov I.M., Shishko V.I., Tkhорik. O.V., Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology Obninsk, Russian Federation

The paper considers the oxidizing properties of argon non-thermal atmospheric pressure plasma during a single exposure to the Fricke dosimeter. Ferrosulfate dosimeter is used to measure high doses of ionizing radiation. The results obtained are close to the absorbed dose values for biological tissues, where an aqueous solution was also used as a medium. It has

been shown that oxidizing agents are formed in the sample of the ferrosulfate dosimeter under the influence of plasma, which is characterized by a change in optical density at a wavelength of 304 nm. The change in the concentration of the oxidized form of the iron ion Fe^{3+} on the flow rate of the argon supply has a close to linear dependence.

Keywords: *Fricke ferrosulfate dosimeter, non-thermal plasma, gas flow rate, processing efficiency, spectrophotometric analysis method*

УДК 621.384.6

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ИЛУ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ И ТОРМОЗНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Дрогунов Е.В., Коробейников М.В., Максимов С.А., Пак А.В., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.*

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, пр-кт Академика Лаврентьева, 11 Российская Федерация
e-mail: shtarklev@gmail.com

В последние десятилетия приобрело большое значение внедрение эффективных, экологически чистых и экономичных методов стерилизации медицинской и сельскохозяйственной продукции. Традиционно применяемые для этих целей методы, такие как пар, этилен-оксид, а также изотопные источники ($Co-60$) не позволяют полностью решить указанные задачи. В связи с этим осуществляется переход на радиационную стерилизацию. Становится актуальной задача пастеризации пищевых продуктов и животноводческих кормов, а также дезинсекции и дезинфекции семян. Импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ, выпускающиеся в ИЯФ СО РАН более 30 лет, оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов. Помимо высокой мощности пучка и энергии ускоренных электронов одно из преимуществ данных ускорителей состоит в том, что они способны работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного гамма-излучения, имеющего высокую проникающую способность. Это позволяет перекрывать весь спектр обрабатываемой пищевой продукции, используя для пастеризации наряду с электронами тормозное гамма-излучение, генерируемое при конверсии пучка ускоренных электронов.

Ключевые слова: *ускоритель электронов, радиационная стерилизация, электронный пучок, тормозное излучение, конвертер, пастеризация*

Ускоритель ИЛУ-14

Импульсные линейные ускорители электронов типа ИЛУ разрабатываются и производятся институтом ядерной физики СО РАН. Их отличительными особенностями являются простота конструкции, удобство в эксплуатации и надежность при длительной работе в условиях промышленного производства. Ускорители ИЛУ перекрывают диапазон энергий ускоренных электронов от 0.6 до 10 МэВ при мощности ускоренного пучка до 100 кВт. В таблице 1 приведены параметры основных моделей промышленных линейных ускорителей электронов ИЛУ.

Последняя разработка ИЯФ СО РАН – ускоритель ИЛУ-14. В отличие от предыдущих моделей этот

ускоритель расположен горизонтально и представляет собой модульную структуру, состоящую из пяти полных и двух половинных ускоряющих резонаторов, в которых электронный пучок ускоряется до энергии 10 МэВ. Отдельные модули ускоряющей структуры собираются из узлов, выпускаемых экспериментальным производством института.

Мощный промышленный ускоритель ИЛУ-14, блок-схема которого представлена на рис. 1, содержит: ускоряющую структуру, триодную электронную в.ч.-пушку, двухкаскадный автогенератор, фидерную систему, в.ч.-вводы мощности, модуляторы, систему развертки и конвертер тормозного излучения [1].

Параметры ускорителей серии ИЛУ

Параметры	ИЛУ-8	ИЛУ-6	ИЛУ-10	ИЛУ-14
Энергия электронов, МэВ	0.6÷1.0	1.5÷2.5	2.5÷5.0	7.0÷10.0
Средний ток пучка, мА	30	20	15	10
Средняя мощность пучка, кВт	25	20	50	100
Потребляемая мощность, кВт	80	100	150	450
Масса ускорителя, т	0.6	2.2	2.9	4

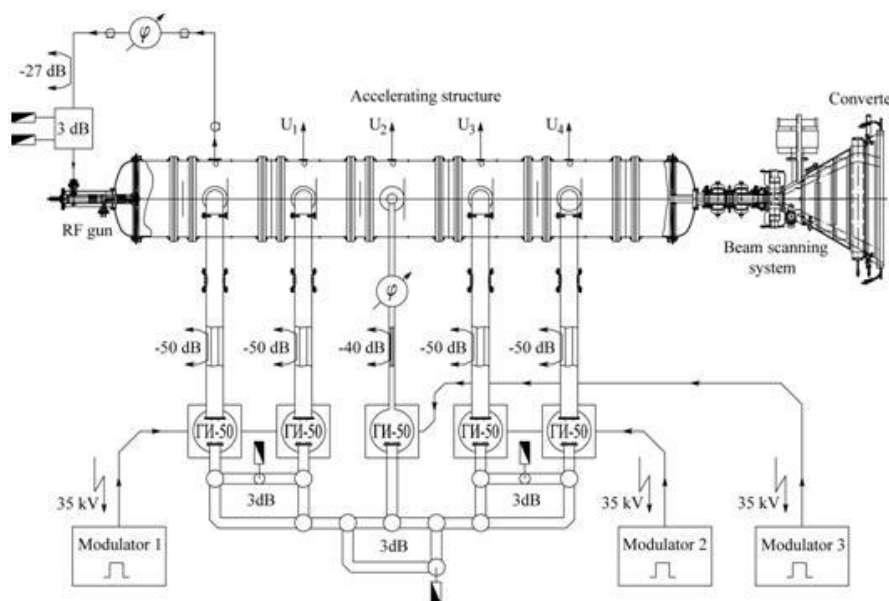


Рисунок 1. Блок-схема ускорителя ИЛУ-14

После ускоряющей структуры электронный пучок попадает в систему выпуска, состоящую из: двухкоординатного корректора оси пучка, дублета квадрупольных линз для фокусировки пучка и сканирующего электромагнита, при помощи которого пучок сканируется на необходимую ширину в выпускном устройстве (раструбе) ускорителя [2]. Для коррекции формы сканирующего поля перед сканирующим электромагнитом расположен электромагнит коррекции. После сканирования развернутый пучок проходит дополнительную рассеивающую линзу и через выпускное окно раструба выводится в атмосферу. Линза Пановского, расположенная перед выпускным окном, позволяет менять угол вывода электронного пучка в атмосферу [3].

Радиационная стерилизация продукции электронным пучком

Основные области применения ускорителей ИЛУ на данный момент:

– стерилизация одноразовых медицинских изделий;

- стерилизация биодобавок и растительного лекарственного сырья;
- стерилизация медпрепаратов и их компонентов;
- улучшение изоляции проводов;
- производство термоусаживаемых трубок и пленок.

Принцип радиационной стерилизации базируется на способности электронного пучка разрушать ДНК живых организмов. Для невозможности самовосстановления, молекула ДНК должна быть разрушена в двух местах. При радиационной стерилизации продукции взаимодействие электронного пучка с микробиологическими объектами можно описать двумя процессами:

1) электроны непосредственно ионизируют атомы цепочек ДНК бактерий, необратимо повреждая их, и, препятствуя их дальнейшему размножению;

2) электроны образуют из молекул воды высокоактивные свободные радикалы H^+ и OH^- , которые также разрушают ДНК бактерий.

При этом вклад первого процесса в итоговый результат составляет 10 %, а второго – 90 %. Характерные особенности взаимодействия электронов с

веществом приводят к тому, что поглощенная доза D на поверхности облучаемого материала не является максимальной, она достигает максимума внутри материала, а затем начинает спадать и на некотором расстоянии от поверхности материала сравнивается с поверхностной дозой. Данное расстояние принимается за эффективную глубину проникновения электронов в вещество $R_{эф}$. Из этого следует, что при одностороннем облучении продукции и толщине упаковки менее $R_{эф}$ теряется значительная часть мощности пучка, что в свою очередь снижает производительность установки. Для исключения этих потерь на ускорителях обычно используется облучение образцов с двух сторон.

Одной из основных характеристик электронного пучка является его мощность, определяющая производительность работы ускорителя в режиме радиационной стерилизации. Мощность пучка P есть произведение энергии электронов на средний ток пучка. Производительность установки T при радиационной стерилизации с применением ускорителей электронов вычисляется по следующей формуле:

$$T[\text{кг/час}] = \frac{P[\text{Вт}] \cdot k}{D[\text{Гр}]} \cdot 3600, \text{ где } k=0.5 - \text{коэффициент, учитывающий двустороннее облучение.}$$

Производительность ускорителей серии ИЛУ при стандартной для радиационной стерилизации дозе облучения 25 кГр достигает нескольких тонн в час.

Пастеризация пищевых продуктов при помощи тормозного излучения

Одной из перспективных областей применения радиационных технологий в сельском хозяйстве является дезинсекция и дезинфекция семян, а также пастеризация пищевых продуктов и животноводческих кормов. Однако, при этом возникает проблема: в ряде случаев может оказаться необходимой обработка продуктов питания со сложной геометрией и большой массовой толщиной (20 г/см² и более), а проникающая способность электронного пучка при максимально допустимой по нормам МАГАТЭ энергии 10 МэВ сравнительно мала (до 8 г/см² при двустороннем облучении), что ставит ограничения на объём облучаемого материала.

Разумным выходом из данной ситуации является использование для пастеризации пищевых продуктов промышленных ускорителей серии ИЛУ, способных работать как в режиме электронной обработки продукции, так и в режиме генерации тормозного гамма-излучения, обладающего высокой проникающей способностью. Это позволяет перекрывать весь спектр обрабатываемой пищевой продукции, используя для пастеризации наряду с электронами тормозное гамма-излучение, генерируемое при конверсии пучка ускоренных электронов. Перевод ускорителя из режима генерации электронного пучка в режим генерации тормозного излучения занимает не более 10 минут.

Специально разработанный конвертер представляет собой тормозную мишень, состоящую из пластины алюминия с каналами для охлаждающей воды, на которую методом сварки взрывом закреплена пластина тантала [4]. Поглощающий электроны слой тантала обращён в вакуум. Его толщина составляет от 0.8 до 1.5 мм, при такой толщине процент выхода гамма-излучения уже достигает максимального значения, а не конвертированные электроны максимально поглощаются в алюминии. Это улучшает тепловой режим поглощающего слоя и мишени в целом, поскольку приводит к более равномерному распределению тепла в устройстве.

Согласно рекомендации МАГАТЭ, энергия ускорителей электронов не должна превышать 10 МэВ при использовании электронов и 5 МэВ при использовании тормозного излучения (7.5 МэВ в США). Доза тормозного излучения с энергией 7.5 МэВ в геометрии плоского продукта падает почти экспоненциально с длиной поглощения около 20 г/см². Для режима тормозного излучения производительность примерно в 15 раз меньше, чем для электронного из-за эффективности преобразования, углового распределения тормозного пучка, большей доли рассеяния. А вот толщина изделия может быть намного больше. При двустороннем тормозном облучении с энергией 7.5 МэВ массовая толщина продукта при максимальной производительности составляет около двух длин поглощения или 40 г/см² при коэффициенте однородности дозы (DUR) около 1.55. Таким образом, при характерных дозах облучения пищевых продуктов, составляющих единицы кГр, производительность ускорителя при работе в гамма-режиме может достигать нескольких тонн в час.

Обработка пищевых продуктов при помощи ускорителей ИЛУ имеет ряд положительных эффектов: уничтожение болезнетворных микроорганизмов (Сальмонелла, Е-Коли и др.); увеличение времени хранения продукта; уничтожение насекомых; удешевление пастеризации продуктов по сравнению с традиционными методами (например, возможность производства тушёнки и консервов в пластиковой упаковке).

При этом важно учесть влияние излучения на свойства продуктов питания. В 1980 г. объединённый комитет экспертов (ФАО, МАГАТЭ и ВОЗ) рассмотрел данные международного проекта по исследованию токсичности облучённых пищевых продуктов. Комитет заключил, что при дозе облучения не более 10 кГр они не более вредны, чем обычные пищевые продукты, содержащие в неумовимо малых количествах мутагены. При этом максимальные дозы, необходимые для пастеризации продуктов питания, как правило, составляют единицы килогрэй.

Заключение

Промышленные ускорители ИЛУ оптимально подходят для использования в качестве универсальных стерилизационных комплексов, на которых

может производиться как радиационная стерилизация медицинских изделий, биодобавок и лекарственного сырья электронным пучком, так и пастеризация пищевых продуктов при помощи тормозного излучения. ИЯФ СО РАН имеет лицензию на разработку и производство ускорителей. Разработаны технологии стерилизации различных видов продукции. На данный момент в институте идёт изготовление ускорителя ИЛУ-14 для облучения рыбы и морепродуктов во Вьетнаме и ускорителя ИЛУ-12 для облучения фруктов и ягод в Узбекистане.

Список литературы

1. Брызгин А.А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14 // ПТЭ. 2011. № 3. С. 5–21.
2. Методика расчета и конструирования выпускных устройств для импульсных ускорителей электронов серии ИЛУ / В.В. Безуглов [и др.]. Новосибирск. 2008. 36 с.
3. Bezuglov V.V. et al. Beam extraction system for industrial electron accelerator ILU-14 // Proc. of RuPAC. 2012. Saint-Petersburg. P. 161–163.
4. Auslender V.L. et al. Bremsstrahlung converters for powerful industrial electron accelerators // Rad. Phys. Chem. 2004. V. 71. P. 297–299.

INDUSTRIAL ACCELERATORS ILU FOR RADIATION TREATMENT OF PRODUCTS BY ELECTRON BEAM AND BREMSSTRAHLUNG

Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Voronin L.A., Drogunov E.V., Korobeynikov M.V., Maksimov S.A., Pak A.V., Radchenko V.M., Sidorov A.V., Tkachenko V.O., Shtarklev E.A.

Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation

In recent decades, the introduction of efficient, environmentally friendly and economical methods of sterilization of medical and agricultural products has become of great importance. The methods traditionally used for these purposes, such as steam, ethylene oxide, as well as isotope sources (Co-60), do not completely solve these problems. In this regard, the transition to radiation sterilization is being carried out. The task of pasteurization of food products and livestock feed, as well as disinsection and disinfection of seeds, is becoming urgent. Pulsed linear electron accelerators of the ILU type, produced at the BINP SB RAS for more than 30 years, are optimally suited for use as universal sterilization complexes. In addition to the high beam power and the energy of accelerated electrons, one of the advantages of these accelerators is that they can operate both in the mode of electron processing of products and in the mode of generating bremsstrahlung gamma radiation, which has a high penetrating power. This makes it possible to cover the entire range of processed food products, using for pasteurization, along with electrons, bremsstrahlung gamma radiation generated during the conversion of an accelerated electron beam.

Keywords: *Electron accelerator, radiation sterilization, electron beam, bremsstrahlung, converter, pasteurization*

Pulsed linear electron accelerators of the ILU type are developed and manufactured by the Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Their distinguishing features are simplicity of design, ease of use and reliability during

long-term operation in industrial production. ILU accelerators cover the energy range of accelerated electrons from 0.6 to 10 MeV at an accelerated beam power of up to 100 kW. Table 1 shows the parameters of the main models of industrial linear electron accelerators ILU.

Table 1.

Parameters of ILU accelerators

Parameters	ILU-8	ILU-6	ILU-10	ILU-14
Electron energy, MeV	0.6÷1.0	1.5÷2.5	2.5÷5.0	7.0÷10.0
Average beam current, mA	30	20	15	10
Average beam power, kW	25	20	50	100
Power consumption, kW	80	100	150	450
Accelerator mass, t	0.6	2.2	2.9	4

The main areas of application of ILU accelerators at the moment:

- sterilization of disposable medical devices;
- sterilization of bioadditives and herbal medicinal raw materials;
- sterilization of medications and their components;
- improvement of wire insulation;
- production of heat-shrinkable tubes and films.

During radiation sterilization of products, the interaction of an electron beam with microbiological objects can be described by two processes:

- 1) electrons directly ionize the atoms of bacterial DNA chains, irreversibly damaging them and preventing their further reproduction;
- 2) electrons form highly active free radicals H⁺ and OH⁻ from water molecules, which also destroy the DNA of bacteria.

One of the promising areas of application of radiation technologies in agriculture is the disinsection and disinfection of seeds, as well as the pasteurization of food products and livestock feed. However, this raises

a problem: in some cases, it may be necessary to process food products with complex geometry and large mass thickness, and the penetrating power of the electron beam is relatively small, which places restrictions on the volume of the irradiated material.

A reasonable way out of this situation is to use industrial accelerators of the ILU series for pasteurization of food products, capable of operating both in the mode of electronic processing of products and in the mode of generating bremsstrahlung gamma radiation with a high penetrating power. This makes it possible to cover the entire range of processed food products, using for pasteurization, along with electrons, bremsstrahlung gamma radiation generated during the conversion of an accelerated electron beam.

The processing of food products by ILU accelerators has a number of positive effects: destruction of pathogens (Salmonella, E-Koli, etc.); increasing the shelf life of the product; destruction of insects; reduction in the pasteurization cost compared to traditional methods (for example, the possibility of producing stew and canned food in plastic packaging).

УДК 539.1.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ «ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ» ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАРТОФЕЛЯ, ОБРАБОТАННОГО ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Близнюк У.А.*, Беклемишев М.К., Авдюхина В.М., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю.,
Зубрицкая Я.В.****

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, ГСП-1, Ленинские горы дом 1, строение 2, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: *uabliznyuk@gmail.com, **yuryana@gmail.com*

В данной работе была исследована возможность выявления химических изменений в картофеле, обработанном рентгеновским излучением, с использованием хемометрических методов «отпечатков пальцев». Изменения в химическом составе облучённого в разных дозах картофеля оценивали по изменению интенсивности флуоресценции красителей, добавленных в исследуемые образцы, а также по изменению их спектра поглощения. Методом главных компонент был установлен факт различия в химическом составе облучённых и необлучённых образцов. Посредством линейного дискриминантного анализа удалось с вероятностью 100 % различить образцы, облучённые в дозах 100 и 1000 Гр в течение 6 суток наблюдения.

Ключевые слова: радиационная обработка, методы «отпечатков пальцев», рентгеновское излучение

С увеличением масштабов распространения радиационной обработки пищевой продукции важным становится вопрос поиска способов обнаружения факта облучения продуктов. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом приводит к нарушению целостности его структур и, соответственно, изменениям в его химическом составе, таким образом, факт радиационной обработки может быть выявлен при соответствующем химическом анализе. Одними из методов химического анализа, не

требующих точного знания состава анализируемых объектов, являются методы «отпечатков пальцев». Данные методы обычно используются для определения сходства или различия близких по составу веществ – от белков до сортов масла и видов почв – и основаны на спектроскопии и флуоресценции. Важным в данных методах является подбор красителей, которые, при добавлении к образцу, в зависимости от его химического состава будут давать различные результаты флуоресценции полученной смеси и её

цветовой окраски. С увеличением различий в химическом составе изучаемых образцов будет увеличиваться и различие в спектрах флуоресценции и поглощения. Так как поглощённая продуктом доза будет влиять на то, как сильно изменится его химический состав, использование методов «отпечатков пальцев» является перспективным для различения прошедших радиационную обработку продуктов.

Образцы картофеля сорта Агата с размерами $15 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$ и массой $(0,5 \pm 0,1) \text{ г}$ были помещены в полипропиленовые пробирки, после чего облучались рентгеновским излучением с использованием установки ДРОН УМ-2 с источником питания ПУР5/50 и рентгеновской трубкой БСВ-23 с медным анодом. Пробирки помещались перед бериллиевым окном с рентгеновской трубкой с током 26 мА и напряжением 30 кВ.

Для определения средней дозы, поглощённой образцами, был использован дозиметр Фрикке. Пробирки с 0,5 мл раствора сульфата железа и добавлением 0,4 моль серной кислоты облучались в тех же условиях, что и образцы картофеля. Повторность опыта была трёхкратной, время облучения фиксировалось. Дозы, поглощенные указанным дозиметрическим раствором, оценивали с учетом изменения его оптической плотности после облучения. Полученные значения использовались для вычисления мощности дозы облучения используемой установки и последующего определения необходимого времени облучения образцов для получения ими выбранных доз – 100 и 1000 Гр. Средняя мощность дозы P составила $(1,8 \pm 0,3) \text{ Гр/с}$. Ошибка определения дозы не превышала 15 %, в целях повышения равномерности распределения поглощенной дозы по объему образцов обработка рентгеновским облучением проводилась с двух противоположных сторон.

Контроль равномерности облучения проводился посредством компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения GEANT4. Производилось облучение водного фантома образца картофеля потоком фотонов, после чего объём данного фантома был разделён на кубические ячейки с ребром 1 мм. Для каждой ячейки подсчитывалась энергия E_i полученная из взаимодействий излучения с веществом. С учётом массы ячейки m_i доза, полученная i ячейкой, находилась по формуле:

$$D_i = \frac{E_i}{m_i}.$$

Полученная карта дозового распределения для водного параллелепипеда показала, что большая часть излучения была поглощена в первых 0,5 мм слоя образца.

Химический анализ облучённых образцов проводился на 0-й, 2-й и 6-й день после облучения с использованием методов «отпечатков пальцев», каждое значение дозы было представлено 2 образцами. Подготавливались водные растворы картофеля, после чего проводился их анализ с помощью

индикаторных реакций окислительно-восстановительного и агрегатного типов. В окислительно-восстановительной реакции был задействован краситель ДОР-145, в реакции агрегатного типа – Акри-278. Полученные растворы заливались в лунки планшета по пять лунок на образце.

После заполнения лунок производилась их съёмка в видимом спектре (с разложением на RGB), а также на длинах волны 254 нм, 365 нм и 660 нм с целью фиксирования интенсивности флуоресценции и изменения спектров поглощения смеси в лунках. В случае окислительно-восстановительной реакции съёмка проводилась четырёхкратно с интервалом в 10 минут начиная с момента добавления красителя для мониторинга изменения цвета и флуоресценции со временем. Итого, количество кадров для обработки в каждый из дней составило 30 штук.

Полученные изображения обрабатывались с использованием программы ImageJ для получения значений интенсивности окраски растворов и анализировались хемометрическими методами главных компонент (PCA) и линейного дискриминантного анализа (LDA). Визуализация представляла собой двумерные графики в координатах главных компонент или LDA-факторов. В качестве визуальных ориентиров различимости вокруг групп точек одинаковой дозы строились эллипсы. В случае LDA данные разделялись на обучающие и проверочные для проверки возможности программы самостоятельно относить полученные результаты к той или иной группе, обозначающей полученную дозу излучения. Во все дни исследования повторность опыта составила 10 лунок и, следовательно, 10 точек для каждой из доз. Количество контрольных – неизвестных программе – значений равнялось 5 точкам из 30.

С использованием метода PCA для картофеля сорта Агата удалось различить облучённые образцы и необлучённые, однако между собой образцы, обработанные в дозах 100 и 1000 Гр, оказались неразличимы. При использовании LDA анализа образцы сорта Агата, облучённые в разных дозах, были полностью различимы за исключением результатов 2-го дня исследования, для которых различение результатов, относящихся к образцам, облучённым в дозах 100 и 1000 Гр, оказалось невозможным. Тем не менее, точность соотнесения неизвестных программе значений результатов к дозовым группам составила 100% для всех дней исследования.

Таким образом, было выявлено, что с использованием хемометрических методов «отпечатков пальцев» возможно отделить облучённые образцы картофеля от необлучённых вне зависимости от прошедшего после облучения времени в течение первых 6 суток после облучения. Индикаторные реакции агрегатного типа для данной культуры проходили с большим различием во флуоресценции, а окислительно-восстановительного – в спектрах поглощения.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF APPLYING «FINGERPRINTING» METHODS FOR IDENTIFICATION OF IRRADIATED POTATOES

Bliznyuk U.A., Beklemishev M.K., Avdyukhina V.M., Chernyaev A.P., Borshchegovskaya P.Yu., Zubritskaya Ya.V.

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

This paper was a study of the possibility of chemical changes detection in potatoes irradiated by X-rays using chemometric "fingerprinting" methods. Changes in the chemical composition of the potatoes irradiated at different doses were estimated by changing the fluorescence intensity of the dyes added to the samples as well as by changing their absorption spectrum. The principal component analysis was able to determine the fact that the chemical composition of the irradiated and unirradiated samples is different. The linear discriminant analysis was able to distinguish the samples irradiated at doses of 100 and 1000 Gy from each other with 100% probability within 6 days after exposure to radiation.

Keywords: *radiation treatment, "fingerprinting" methods, X-rays*

УДК 539.1.06

ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МЭВ НА ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

Близнюк У.А.^{1,2}, Борщegovская П.Ю.^{1,2}, Болотник Т.А.³, Ипатова В.С.², Никитченко А.Д.¹, Родин И.А.^{3,4}, Хмелевский О.Ю.^{1,a}, Юров Д.С.², Черняев А.П.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Российская Федерация

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Российская Федерация

⁴Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Москва, Российская Федерация

e-mail: ^a thexmeli99@gmail.com

В данной работе представлены результаты исследования воздействия пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на органические соединения, содержащиеся в продуктах питания. Показаны зависимости концентрации белка, жирных кислот, алдегидов, кетонов и спиртов от поглощенной дозы в диапазоне от 0,15 кГр до 10 кГр.

Ключевые слова: *радиационная обработка, ускоренные электроны, летучие органические соединения, белок, жирные кислоты*

Радиационная обработка продуктов питания является эффективным методом подавления микробной загрязненности и увеличения сроков хранения продукции без применения химических соединений, консервирования и дополнительного нагрева или замораживания обрабатываемого объекта. [1-4]. Для каждого вида продукции необходимо подбирать диапазон доз облучения [5], мощность дозы излучения [6], схему облучения, включающую в себя выбор источника ионизирующего излучения и режима его работы [7] взаимное расположение источника и объекта обработки, тару для размещения обрабатываемой продукции, упаковку и т.д. [4, 8]. Несоблюдение технологических режимов радиационной обработки приводит к химическим изменениям в продукте, и,

как следствие, к изменению его органолептических, питательных и структурных свойств.

Основной целью данной работы являлось исследование изменений химических свойств продуктов, следствием которых могут являться изменения органолептики, структуры, состава и питательных свойств продуктов в результате проведения радиационной обработки. Поскольку ионизирующее излучение влияет на химический состав и биохимические процессы, протекающие в тканях, для оценки степени его воздействия были выбраны одни из самых важных компонент для любого организма - белки и жирные кислоты.

Белки и жирные кислоты составляют неотъемлемую часть в формировании клеток и тканей любых продуктов мясного или растительного

происхождения. Под воздействием ионизирующего излучения могут происходить процессы денатурации белков в результате разрыва пептидных связей молекулы с образованием низкомолекулярных фрагментов. У жирных кислот могут происходить процессы окисления и распада на летучие соединения: спирты, кетоны и альдегиды. Спирты также могут распадаться на кетоны и альдегиды

В качестве объектов для исследования химических изменений жирных соединений были выбраны охлажденное филе индейки и семги, для исследования изменения белков – бычий сывороточный альбумин (БСА).

Облучение всех образцов проводилось на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ. Схемы и описания экспериментов выложены в работах [6,9]

При проведении эксперимента контроль дозы проводился с помощью стандартных образцов «СО ПД(Э)-1/10» и ферросульфатного дозиметра Фрикке [9].

При исследовании радиационного воздействия на структурные характеристики белка был проведен модельный эксперимент с облучением бычьего сывороточного альбумина (БСА). Набор пептидов, полученных с помощью метода трипсинолиза из белка, в физиологическом растворе 0,9 % NaCl облучался при средней мощности 3,6 Гр/с в дозах 0,15 кГр, 0,3 кГр, 0,6 кГр, 1 кГр, 4 кГр и 8 кГр. Было обнаружено, что чем больше доза облучения, тем большее количество белков подвергается денатурации. Так при дозах 0,3 кГр, 0,6 кГр и 1 кГр для всех образцов уникальных пептидов в результате воздействия пучком ускоренных электронов после трипсинолиза наблюдалась денатурация 20–30 % белков. При дозах 4 кГр и выше происходило резкое уменьшение содержания БСА в пробе в 5 раз.

В эксперименте по исследованию влияния ионизирующего излучения на жирные кислоты в качестве исследуемых соединений были выбраны 25 насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в образцах семги и индейки, облученных при дозах от 0,7 кГр до 10 кГр. Было обнаружено, что концентрация жирных кислот практически не изменялась в дозах до 10 кГр. Это говорит о сохранении питательных свойств жиров при облучении. В результате процессов радиолитического окисления небольшого количества жирных кислот образуются летучие соединения: спирты, альдегиды и кетоны. При малых изменениях концентраций жирных кислот, изменения концентраций летучих соединений заметны и могут быть значительными.

В эксперименте по воздействию излучения на летучие соединения были облучены образцы мяса индейки при дозах 0,25 кГр, 0,5 кГр, 1 кГр, 2 кГр, 5 кГр и 10 кГр. Были идентифицированы три группы летучих соединений: альдегиды (нонаналь, гексаналь, октаналь, гептаналь, пентаналь), спирты (гексанол-1, пентанол-1) и кетон (3-метилбутанон-2).

В результате взаимодействия с радикалами, возникающими в веществе в результате воздействия ионизирующего излучения, спирты могут окисляться до альдегидов или кетонов, альдегиды и кетоны могут также распадаться в другие карбонильные соединения.

Для всех идентифицируемых соединений в области доз до 1 кГр наблюдался немонокотный характер зависимости концентраций от дозы облучения, далее с увеличением дозы наблюдалась более гладкая форма данных зависимостей.

В результате анализа полученных зависимостей была предложена модель, описывающая изменения концентраций летучего соединения в образце мяса птицы от дозы облучения. Она состоит из функции распада летучего соединения и функции накопления молекул за счет распада других летучих соединений.

В ходе проведенных исследований были установлены зависимости концентраций ряда органических соединений (белков, жирных кислот и летучих соединений) в экспериментальных образцах от поглощенной дозы при воздействии пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ. Было выявлено, что при дозах до 1 кГр не происходит химических изменений у всех органических соединений, что говорит о безопасности продукта и сохранении всех первоначальных свойств продуктов, далее с увеличением дозы наблюдаются химические изменения, которые могут влиять на органолептические и питательные качества продукта.

Исследование выполнено в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» при поддержке Гранта РФФ №22-63-00075.

Список литературы

1. Алимов А.С. Практическое применение электронных ускорителей / Препринт НИИЯФ МГУ № 2011 – 13/877.
2. Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority. EFSA Journal. 2011. Vol. 9. № 4(2107). 57 p.
3. CAC, 2003. CODEX STAN 106-1983, Rev.1-2003. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Irradiated Foods. Codex Alimentarius, FAO/WHO, Rome.
4. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технического развития // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 1(16). С. 197–206.
5. K. Jayathilakan, Khudsia Sultana, K. Jalarama Reddy et al. Radiation Processing of Meat and Meat Products – An Overview / International Journal of New Technology and Research (IJNTR) ISSN: 2454-4116, Volume-1, Issue-5, September 2015 Pages 05-12.

6. Черняев А.П., Авдюхина В. М., Близнюк У.А. и др. Применение низкоэнергетического электронного излучения для обработки охлажденного мяса индейки. Оптимизация параметров воздействия / Научные технологии. 2020. Т. 21. №1. С.40–49.

7. Manual of good practice in food irradiation : sanitary, phytosanitary and other applications. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2015. p. 104.

8. J. Kim, R.G. Moreira, M.E. Castell-Perez. Validation of irradiation of broccoli with a 10 MeV electron beam accelerator.

9. Близнюк У.А., Авдюхина В.М., Борщевская и др. Определение микробиологических и химических показателей мясной продукции после обработки электронным излучением. «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». 2021;87(6):5–13.

EFFECTS OF 1 MEV ACCELERATED ELECTRONS ON ORGANIC COMPOUNDS IN FOOD

Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Bolotnik T.A.³, Ipatova V.S.¹, Nikitchenko A.D.², Rodin I.A.^{3,4}, Khmelevsky O.Yu.², Yurov D.C.¹, Chernyaev A.P.^{1,2}

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³ Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁴ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

This paper presents the results of a 1 MeV accelerated electron beam effect on organic compounds contained in foodstuffs. Concentrations of protein, fatty acids, aldehydes, ketones and alcohols are shown to depend on the absorbed dose in the range from 0,15 kGy to 10 kGy.

Keywords: radiation treatment, accelerated electrons, volatile organic compounds, protein, fatty acids

УДК 619:616-001.28/.29+579

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОЗАЩИТНОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ *FUSOBACTERIUM NECROPHORUM*

Гайнутдинов Т.Р.

ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности»

420075 г. Казань, Научный городок-2, Российская Федерация

e-mail: gtr_timur@mail.ru

В работе представлена технология получения радиозащитного препарата на основе микроорганизма *Fusobacterium necrophorum* путем выращивания культуры с последующей радиационной инактивацией в дозах 25 и 30 кГр. Показано, что интенсивность роста *F. necrophorum* находится в прямой зависимости от дозы гамма-облучения. Установлено, что полученный препарат стерильный, не реактогенный, не токсичный, безвредный и может быть применен в качестве радиозащитного средства при лучевой болезни.

Ключевые слова: радиационные технологии, микроорганизм, гамма-облучения, подбор доз, инактивация, радиозащитный препарат

Введение

Ионизирующие излучения в настоящее время находят широкое применение в медицине, промышленности, сельском хозяйстве и других сферах народного хозяйства [1, 5]. Имеющие место аварии на предприятиях ядерно-энергетического цикла, возникающие в результате нарушения эксплуатации их

деятельности, оказывают пагубное действие на экосистему, приводя к возникновению лучевой болезни и её комбинаций [8].

В последнее время всё чаще гамма-облучение находит применение в биопромышленности при получении вакцин, антигенов и других биологических препаратов [4].

Антигены, полученные в результате гамма-облучения, имеют более высокую серологическую активность по сравнению с антигенами, полученными с использованием химических и физических методов, к которым относятся ультразвуковая и механическая обработка, УФ-облучение, формалин, гидроокись алюминия и т.д. [7].

С учетом имеющихся сведений о том, что соматические клетки и продукты метаболизма микробов содержат биологически активные вещества (аминокислоты, микроэлементы, ферменты, белки), которые участвуют в формировании радиорезистентности организма [6]. В настоящей работе представлены результаты опытов по изучению возможности получения радиозащитного препарата на основе *Fusobacterium necrophorum*.

Материалы и методы

Поставленную задачу выполняли в условиях бокса, используя культуру *Fusobacterium necrophorum* штамм 8TS630501, с использованием питательной среды Китта-Тароцци с добавлением нормальной сыворотки крупного рогатого скота.

Опыты по определению стерильности [2], токсичности, безвредности и реактогенности [3] проводили на 120 белых мышах.

Результаты исследований

Алгоритм получения препарата был следующим. Колбу с содержанием суточной культуры *Fusobacterium necrophorum* в жидкой питательной среде Китта-Тароцци с добавлением 10 % нормальной сыворотки крупного рогатого скота термостатировали при температуре 37 °С в соответствии с методическими и технологическими требованиями. Выращенную трехсуточную культуру разливали в стерильные флаконы и осаждали центрифугированием при 3000 об/мин в течение 40 минут. Затем надосадочную жидкость сливали, осадок микробов доводили до 1×10^9 м.к./мл стерильной дистиллированной водой, используя стандарт мутности Л. А. Тарасевича.

Полученную взвесь фасовали во флаконы по 10 мл, закрывали их резиновыми пробками и обкатывали алюминиевыми колпачками. После этого культуру *F. necrophorum* облучали на гамма-установке «Исследователь», (источник – ^{60}Co) с мощностью поглощенной дозы 1,03 Гр/с в дозах 5, 10, 15, 20, 25 и 30 кГр с междозовым интервалом 5 кГр.

Степень инактивации *F. necrophorum* определяли путем высева их на среду Китта-Тароцци с содержанием 10 % нормальной сыворотки крупного рогатого скота с последующей выдержкой в термостате в течение 7 сут и регистрацией наличия или отсутствия роста микроорганизма через каждые 24 часа.

Результаты опытов показали, что радиационное воздействие на культуру ингибирует её рост, а увеличение дозы облучения до 25–30 Гр ведет к полной инактивации микроба. Следовательно,

интенсивность роста *F. necrophorum* находится в прямой зависимости от дозы гамма-облучения.

С выращенных культур делали мазки, окрашивали по Граму, микроскопировали под иммерсией с 90-кратным увеличением. В поле зрения отчетливо обнаруживались грамтрицательные длинные нити с густыми сплетениями и короткие тонкие нити, палочки с колбовидными утолщениями, характерными для изучаемой культуры *F. necrophorum* штамм 8TS630501.

Культуры *F. necrophorum*, радиоинактивированные гамма-лучами в дозах 25–30 кГр, в дальнейшем использовали в качестве радиозащитного препарата. Перед клиническими испытаниями в первой серии опытов определяли стерильность в соответствии с Межгосударственным стандартом [2] путем высева испытуемого средства на питательные среды. Установлено, что роста бактерий, грибов и микоплазм в инкубированных жидких (Китт-Тароцци, Сабуро, Хейфлика, МПБ) и твердых (Сабуро, Хейфлика, МПА) питательных средах не наблюдалось. Следовательно, изучаемые облученные препараты стерильны.

В следующей серии опытов проводили исследования по определению реактогенности, токсичности и безвредности полученного препарата в соответствии с Межгосударственным стандартом [3].

Для определения реактогенности смешанную пробу *F. necrophorum*, облученного в дозах 25 и 30 кГр вводили 10 белым мышам обоего пола живой массой 18–20 г, в терапевтической дозе – в объеме $0,2 \text{ см}^3$ (2×10^8 микробных клеток на животное) однократно подкожно. Оценку местного действия, а также состояния здоровья осуществляли на основании данных ежедневных осмотров в течение 7 суток. Установлено, что использование препарата никаких реакций не вызывало: животные были активны, охотно принимали корм и воду, адекватно реагировали на естественные раздражители, что свидетельствует об ареактогенности препарата и переносимости использованной дозы.

Опыты по исследованию безвредности и токсичности смешанной пробы радиоинактивированной в дозах 25 и 30 кГр культуры *F. necrophorum* проводили на 110 здоровых белых мышах обоего пола живой массой 19–21 г, разделенных на 11 групп по 10 животных в каждой. Животным 1-й группы препарат вводили в объеме $0,1 \text{ см}^3$, содержащий радиоинактивированную культуру в количестве 1×10^8 микробных клеток; 2-й – $0,2 \text{ см}^3$ (2×10^8 м.к.); 3-й – $0,3 \text{ см}^3$ (3×10^8 м.к.); 4-й – $0,4 \text{ см}^3$ (4×10^8 м.к.); 5-й – $0,5 \text{ см}^3$ (5×10^8 м.к.); 6-й – $0,6 \text{ см}^3$ (6×10^8 м.к.); 7-й – $0,7 \text{ см}^3$ (7×10^8 м.к.); 8-й – $0,8 \text{ см}^3$ (8×10^8 м.к.); 9-й – $0,9 \text{ см}^3$ (9×10^8 м.к.) и 10-й – $1,0 \text{ см}^3$ (1×10^9 м.к.). Животным 11-й группы препараты не вводили, они служили биологическим контролем.

Исследования показали, что испытуемые инактивированные гамма-лучами бактериальные культуры *F. necrophorum* при подкожном введении в объемах от $0,1$ до $1,0 \text{ см}^3$, содержащие от 1×10^8 м.к./ $0,1 \text{ см}^3$ до 1×10^9 м.к./ см^3 , не оказывали неблагоприятного

воздействия на белых мышей и не вызывали гибели их в течение срока наблюдения (14 сут). Следовательно, препараты не обладают токсичностью.

Введение препаратов в 2-5-кратной терапевтической дозе не вызывало клинических признаков некробактериоза и падежа животных в течение 14 суток, что указывает на его безвредность.

Проведенными исследованиями показано, что полученный препарат стерильный, нереагтогенный, нетоксичный, безвредный и может быть применен в качестве радиозащитного средства при лучевой болезни.

Список литературы

1. Гайнутдинов Т.Р. Экспериментальный подбор доз ионизирующего излучения, вызывающих ингибирование роста и полную инактивацию золотистого стафилококка // Ветеринарный врач. 2020. № 4. С. 4–8.

2. ГОСТ 28085-2013. Средства лекарственные биологические для ветеринарного применения. Методы бактериологического контроля стерильности. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.

3. ГОСТ 31926-2013. Средства лекарственные для ветеринарного применения. Методы определения безвредности. М.: Стандартинформ, 2014. 17 с.

4. Вагин К.Н. и др. Использование радиоинaktivированных штаммов микроорганизмов в качестве

современного технологического сырья для конструирования на их основе биологических радиопротекторов // Исследования вопросов радиационной, химической и биологической защиты в мирное и военное время. Часть II: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, 14-15 сентября 2021. Кострома, 2021. С. 76–81.

5. Гайнутдинов Т.Р. и др. Определение оптимальных доз ионизирующего излучения для инактивации возбудителя некробактериоза // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2020. Т. 244 (IV). С. 61–64.

6. Конюхов Г.В. и др. Усовершенствование технологии получения радиозащитных препаратов на основе *B. bifidum*, *E. coli* в сочетании с биополимером и оценка их эффективности на сельскохозяйственных животных // Ветеринарный врач. 2017. № 6. С. 31–35.

7. Gaynutdinov T.R. et al. Obtaining radioactivated strains of microorganisms and studying their antiradiation efficiency // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. P. 042008. doi: org/10.1088/1755-1315/723/4/042008.

8. Gaynutdinov T.R. et al. Radioprotective activity of gamma-irradiated *St. aureus* variants // Linguistica Antverpiensia. 2021. № 2. P. 1176–1193.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR OBTAINING A RADIOPROTECTIVE DRUG BASED ON *FUSOBACTERIUM NECROPHORUM*

Gaynutdinov T.R.

FSBSI «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety», Kazan, Russian Federation

The paper presents a technology for obtaining a radioprotective drug based on the microorganism *Fusobacterium necrophorum* by culture cultivation followed by radiation inactivation at doses of 25 and 30 kGy. It is shown that the intensity of growth of *F. necrophorum* is directly dependent on the dose of gamma irradiation. It has been established that the resulting drug is sterile, non-reactogenic, non-toxic, harmless and can be used as a radioprotective agent for radiation sickness.

Keywords: radiation technologies, microorganism, gamma irradiation, dose selection, inactivation, radioprotective drug

The algorithm for obtaining the drug was as follows. A flask containing a daily culture of *Fusobacterium necrophorum* in a Kitt-Tarozzi liquid nutrient medium with the addition of 10 % normal cattle serum was thermostated at 37 °C in accordance with methodological and technological requirements. The grown three-day culture was poured into sterile vials and precipitated by centrifugation at 3000 rpm for 40 minutes. Then the sedimentary liquid was drained over, the microbial sediment was brought to 1×10^9 m.k./ml with sterile distilled water using the turbidity standard of L. A. Tarasevich.

The resulting suspension was packed into 10 ml vials, closed with rubber stoppers and rolled with aluminum caps. After that, the culture of *F. necrophorum* was irradiated on a gamma installation "Researcher", (source - ^{60}Co) with an absorbed dose rate of 1.03 Gy/s at doses of 5, 10, 15, 20, 25 and 30 kGy with an inter-dose interval of 5 kGy.

The degree of inactivation of *F. necrophorum* was determined by seeding them on a Kitt-Tarozzi medium containing 10% of normal bovine serum, followed by exposure in a thermostat for 7 days and registration

of the presence or absence of growth of the microorganism every 24 hours.

The results of the experiments showed that radiation exposure to the culture inhibits its growth, and an increase in the radiation dose to 25-30 Gy leads to complete inactivation of the microbe. Consequently, the intensity of growth of *F. necrophorum* is directly dependent on the dose of gamma radiation.

Experiments to determine sterility [2], toxicity, harmlessness and reagentogenicity [3] were carried out on 120 white mice.

The conducted studies have shown that the resulting drug is sterile, non-lactogenic, non-toxic, harmless and can be used as a radioprotective agent for radiation sickness.

УДК 632.95.02:575.2:577.3:579.842.11

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕНОМА ОБЛУЧЕННОЙ *E. coli*

Галлямова М.Ю., Хаммадов Н.И., Вагин К.Н., Рахматуллина Г.И.

Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности
420075, Республика Татарстан, Казань, Научный городок-2 Российская Федерация
e-mail: vnivi@vnivi.ru

Статья посвящена анализу генетических изменений культуры *Escherichia coli*, многократно облученной ^{60}Co в постепенно увеличивающихся дозах. С помощью полимеразной цепной реакции получены дискретные единичные ампликоны, которые были изучены с помощью метода полиморфизма длин рестрикционных фрагментов (ПДРФ). Полученные данные свидетельствуют о том, что после действия гамма-лучей в ДНК исследуемого микроорганизма произошли определенные изменения, после восстановления целостности (в процессе трех пассажей на питательной среде) профиль исходной ДНК и облученной не совпадают.

Ключевые слова: геном, ионизирующее облучение, изменчивость микроорганизмов, кишечная палочка, *Escherichia coli*, ДНК, ПДРФ, ПЦР

Введение

Различные физические факторы окружающей среды оказывают значительное влияние на жизнь микроорганизмов, вызывая своим воздействием адаптивный ответ [1]. Изучение эффектов и механизма действия ионизирующего излучения на живые объекты является важной и актуальной проблемой радиобиологии. Исследование реакции клетки на облучение представляет практический и научный интерес.

Адаптация микробных клеток к высоким дозам гамма-излучения основывается на процессах репарации полученных повреждений нуклеиновых кислот. Механизмы, участвующие в процессе клеточной адаптации и обеспечивающие устойчивость к облучению, можно разделить на две основные группы. Первую группу составляют системы, предупреждающие повреждения в клетках. Вторая представлена механизмами, производящими репарацию (восстановление) повреждения ДНК [2-4].

Повреждения ДНК бактерий могут характеризоваться единичными заменами (мутациями) и более обширными изменениями (рекомбинациями). Для обнаружения и определения возникновения изменчивости используется рестрикционный анализ продуктов амплификации конкретного локуса. Данный метод показывает единичные нуклеотидные замены

в сайтах рестрикции применяемых при проведении анализа эндонуклеаз рестрикции.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использованы образцы ДНК от полученных ранее радиоустойчивых вариантов штамма *Escherichia coli* «ПЛ-6» [5]. Для изучения возможных изменений в генетической структуре бактерий были подобраны локусы. При подборе ориентировались на полногеномные нуклеотидные последовательности *Escherichia coli* J53 – хромосома (GenBank id NZ_CABFNN010000000) и плазмидные ДНК на ресурсе NCBI. Олионуклеотидные последовательности, используемые для анализа, представлены в таблице 1.

Все продукты амплификации предварительно подвергали электрофорезу в 1,7 % агарозном геле. В результате чего были получены дискретные единичные ампликоны, пригодные для дальнейшего рестрикционного анализа.

Рестрикции подвергались продукты амплификации. Для этого использовали эндонуклеазы рестрикции *Rsa* I (GT↑AC/CA↓TG) и *Hae* III (GG↑CC/CC↓GG). Рестрикцию проводили на амплификаторе *My* Cycler BIORAD (США) в течение 120 мин, затем производили инактивацию рестриктаз в течение 20 мин.

Олионуклеотидные последовательности, используемые для анализа

Локус	Праймер	Последовательность праймера	Температура плавления, °С
pNDM102337	F	TGGAGAACACAATGCGAAGTCA	55,5
	R	CCTTTCCTGAGCATTCTTCCG	55,4
pVM01	F	AACTCCCTCGTCACAGCACTGA	55,3
	R	CCCTCTTACGCTTCTGCTGC	55,8

Молекулярную массу фрагментов ДНК определяли по ее сопоставлению с молекулярными массами ДНК-маркера (100–1000 п.о., шаг 100 п.о.) в программном обеспечении GelAnalyzer 19.1.

Результаты исследования и их обсуждение. По результатам электрофореза установлено, что все

продукты амплификации локуса pNDM102337 были примерно одной молекулярной массы.

После амплификации образцы подвергли рестрикции с применением эндонуклеаз рестрикции Rsa I и Hae III, результаты электрофоретического разделения продуктов амплификации представлены на рис. 1.

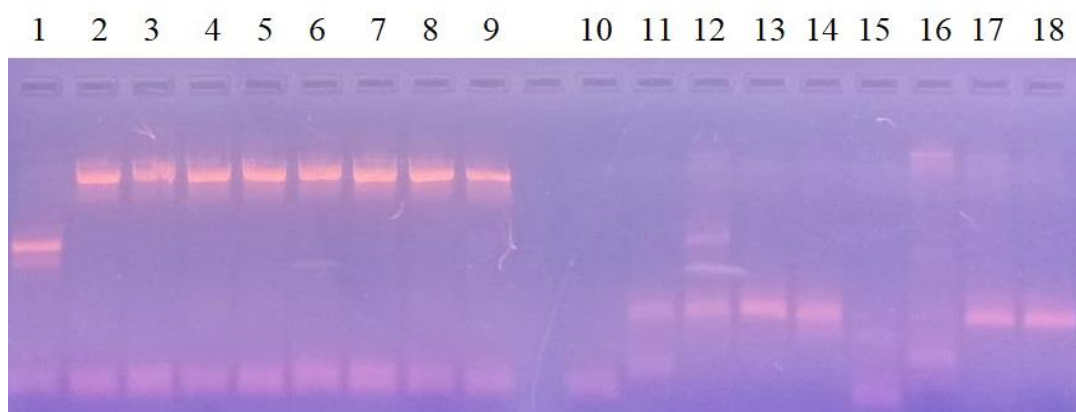


Рисунок 1. Электрофорез продуктов рестрикции локуса pVM01 эндонуклеазами Rsa I и Hae III

Обозначения: **1-9** рестрикция ферментом Rsa I, **10-18** рестрикция ферментом Hae III;

1, 10 – ДНК не облучённых бактерий; **2, 11** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 4,5 кГр;

3, 12 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 5,5 кГр; **4, 13** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 7 кГр;

5, 14 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 9 кГр; **6, 15** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 15 кГр;

7, 16 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 25 кГр; **8, 17** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 30 кГр, после 3-х пересевов; **9, 18** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 30 кГр, исходный препарат

Воздействие эндонуклеазы рестрикции Rsa I на продукты амплификации локуса pNDM102337 *E. coli* во всех облучённых культурах способствовало образованию абсолютно идентичных профилей ДНК-фрагментов, визуальное отличие молекулярной массы установлено лишь у необлучённых бактерий.

Воздействие эндонуклеазы рестрикции Hae III на продукты амплификации локуса pNDM102337 *E. coli* в отличие эндонуклеазы Rsa I характеризовалось образованием различных профилей молекулярных масс фрагментов ДНК. В то же время схожие по молекулярной массе фрагменты ДНК так же присутствовали (у бактерий, облучённых в дозах: 4,5; 5,5; 7; 9 и 30 кГр). Профиля молекулярной массе фрагменты ДНК аналогичного необлучённым бактериям не обнаружено.

По результатам электрофореза установлено, что все продукты амплификации локуса pVM01 были примерно одной молекулярной массы – около 2000 п.о.

После амплификации образцы подвергли рестрикции с применением эндонуклеаз рестрикции Rsa I и Hae III, результаты электрофоретического разделения продуктов амплификации представлены на рис.

Результат электрофореза продуктов рестрикции эндонуклеазами Rsa I и Hae III представлен на рис. 2.

Рестрикты подвергли цифровой обработке для определения их молекулярных масс. Результат анализа представлен в таблице 2.

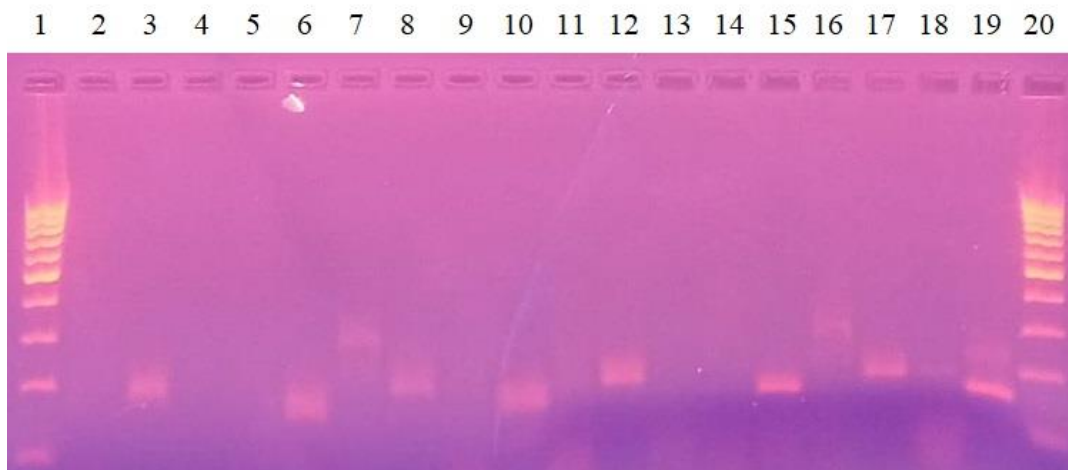


Рисунок 2. Электрофорез продуктов рестрикции локуса rVM01 эндонуклеазами Rsa I и Hae III

Обозначения: **2-10** рестрикция ферментом Rsa I, **11-19** рестрикция ферментом Hae III;
1, 20 – маркер молекулярной массы ДНК от 100 до 1000 п.о.; **2, 11** – ДНК не облучённых бактерий;
3, 12 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 4,5 кГр; **4, 13** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 5,5 кГр;
5, 14 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 7 кГр; **6, 15** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 9 кГр;
7, 16 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 15 кГр; **8, 17** – ДНК бактерий, облучённых в дозе 25 кГр;
9, 18 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 30 кГр, после 3-х пересевов;
10, 19 – ДНК бактерий, облучённых в дозе 30 кГр, исходный препарат

Таблица 2

Молекулярные массы ДНК при рестрикции продуктов амплификации локуса rVM01

	№ лунки																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Молекулярная масса фрагментов, п.о.		165			153	276	171		172		215				186		218	235, 116	193

Молекулярная масса, исходя из анализа фрагментов ДНК, образованных при рестрикции обеими эндонуклеазами, характеризовалась наличием единичных визуально видимых фрагментов ДНК в диапазоне около 110 п.о. – 300 п.о. Часть ампликонов после рестрикции характеризовались отсутствием визуально видимых фрагментов ДНК. Полного совпадения молекулярных масс фрагментов ДНК после рестрикции не выявлено.

Заключение

В процессе работы было проанализировано две олигонуклеотидные последовательности. С помощью полимеразной цепной реакции были получены дискретные единичные ампликоны выбранных локусов. Был проведен их рестрикционный анализ, используя эндонуклеазы рестрикции Rsa I и Hae III.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что ионизирующее излучение, воздействуя на микробную культуру, вызвало повреждения ДНК. После восстановления целостности ДНК (в процессе

пассажей культуры на питательной среде) профили исходной (необлученной) и облученной ДНК отличаются.

Список литературы:

1. Засухина Г.Д. Адаптивный ответ общебиологическая закономерность: факты, гипотезы, вопросы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48. № 4. С. 464–473
2. Бухарин О.В. и др. Механизмы выживания бактерий, Москва : Медицина, 2005. 367 с.
3. Галлямова М.Ю., Вагин К.Н., Низамов Р.Н. и др. Модификация синтеза антиоксидантных ферментов в процессе развития радиорезистентности у *Escherichia coli* // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии : Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–24 сентября 2021 года. – Обнинск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», 2021. С. 27–29.

4. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / под общ. ред. Г.В. Козьмина, С.А. Гераськина, Н.И. Санжаровой. Москва-Обнинск : ИНФОРМПОЛИГРАФ, 2015. 400 с.

5. Галлямова М.Ю., Вагин К.Н., Низамов Р.Н. и др. Фенотипическая изменчивость *E. coli*, индуцированная γ -лучами ^{60}Co // Ветеринарный врач. 2021. № 3. С. 19-23. DOI 10.33632/1998-698X.2021-3-19-23.

ANALYSIS OF THE GENOME VARIABILITY OF IRRADIATED *E. coli*

Gallyamova M.Yu., Khammatov N.I., Vagin K.N., Rakhmatullina G.I.

FSBSI «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety», Kazan, Russian Federation

The article is devoted to the analysis of genetic changes in the culture of *Escherichia coli* repeatedly irradiated with ^{60}Co in gradually increasing doses. Using polymerase chain reaction, discrete single amplicons were obtained, which were studied using the restriction fragment length polymorphism method (RFLP). The data obtained indicate that after the action of gamma rays, certain changes occurred in the DNA of the studied microorganism, after the restoration of integrity (during three passages on the nutrient medium), the profile of the original DNA and the irradiated do not coincide.

Keywords: genome, ionizing radiation, variability of microorganisms, *E. coli*, *Escherichia coli*, DNA, RFLP, PCR

Bacterial DNA damage can be characterized by single substitutions (mutations) and more extensive changes (recombinations). Restriction analysis of amplification products of a particular locus is used to detect and determine the occurrence of variability.

DNA samples from previously obtained radio-resistant variants of the *Escherichia coli* strain "PL-6" were used as the object of research. Loci were selected to study possible changes in the genetic structure of bacteria. The selection was based on the genome-wide nucleotide sequences of *Escherichia coli* J53 chromosome (GenBank id NZ_CABFNN010000000) and plasmid DNA on the NCBI resource.

Amplification products were subjected to restriction. For this purpose, restriction endonucleases

RsaI (GT=AC/CA=TG) and HaeIII (GG=CC/CC=GG) were used. Restriction was performed on the My Cycler BIO RAD amplifier (USA) for 120 min, then restriction was inactivated for 20 min.

In the process of work, two oligonucleotide sequences were analyzed. Discrete single amplicons of selected loci were obtained by polymerase chain reaction. Their restriction analysis was carried out using the restriction endonucleases RsaI and HaeIII.

The data obtained allow us to conclude that ionizing radiation, acting on the microbial culture, caused DNA damage. After DNA integrity is restored (during culture passages on a nutrient medium), the profiles of the original (non-irradiated) and irradiated DNA differ.

УДК 632.935.43: 632.4

ПРЕДПОСЕВНОЕ ОБЛУЧЕНИЕ УФ-С КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ФИТОПАТОГЕНАМИ

Гусева О.А.¹, Цыгвинцев П.Н.¹, Зейрук В.Н.², Деревягина М.К.²

¹ ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: gusevaoks65@yandex.ru

² ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха» Московская обл., г. Люберцы, д.п. Красково, Российская Федерация

В полевом эксперименте изучено действие низких доз УФ-С-излучения (0, 10, 15, 20, 30 и 40 кДж/м²) на клубнях картофеля сорта «Санте», предварительно пораженных паршой обыкновенной, паршой серебристой и фитофторозом. Доза облучения 15 кДж/м² привела к достоверному снижению ($p < 0,05$) распространенности парши обыкновенной на 20 % и парши серебристой на 30 %. Распространенность фитофторы на клубнях уменьшилось в 2 раза относительно контрольного значения при дозе облучения 10 кДж/м². В лабораторном эксперименте при двух температурных режимах 24 °С в темноте и 10 °С в холодильнике изучали скорость прорастания клубней картофеля

двух сортов «Гала» и «Леди Клер», ускорения прорастания клубней при облучении УФ-С в дозах 0, 5, 10, 20, 30 кДж/м² не обнаружено.

Ключевые слова: *УФ-С, картофель, парша серебристая, парша обыкновенная, фитофтороз, скорость прорастания*

Введение

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – важная клубневая сельскохозяйственная культура, потребляемая во всем мире. Клубни картофеля являются богатым источником крахмала, а также содержат белки, минералы и некоторые фитохимические вещества, такие как флавоноиды, фенолы, каротиноиды и полиамины [1].

Минимально обработанные клубни представляют собой интересный продукт для увеличения продаж сырого предварительно очищенного картофеля на рынке общественного питания и розничной торговли [2]. Особенностью картофеля является то, что вследствие вегетативного размножения, болезни передаются через семенные клубни, которые являются первичным источником инфекции.

Среди исследованных нетепловых методов облучение коротковолновым ультрафиолетовым излучением (УФ-С) рассматривается как одно из перспективных направлений. Облучение УФ-С в низких дозах приводит к накоплению противогрибковых соединений в тканях, контролирует естественную зараженность и поддерживает общее качество разных фруктов и овощей [3–6].

Цель исследования состояла в том, чтобы изучить воздействие различных доз облучения УФ-С на восприимчивость патогенов картофеля, таких как парша обыкновенная, парша серебристая и фитофтороз, и выявить влияние на скорость прорастания клубней после обработки УФ-С при разных температурных условиях.

Материалы и методы

В условиях мелкоделяночного полевого эксперимента на поле ФГБНУ ВНИИРАЭ высаживали семенные клубни сорта «Санте», предварительно пораженные патогенами, после облучения УФ-С разными дозами. Клубни отбирались согласно ГОСТ 33996-2016 по массе от 35 до 100 г (стандарт I класса) и со степенью развития болезней в 80-90 %.

В лабораторных условиях отдельно определяли скорость прорастания клубней в темноте при двух температурных условиях – 24 °С и 10 °С. В качестве объектов исследования выбраны два сорта «Гала» и «Леди Клер».

Облучение клубней проводили в специальной УФ камере на расстоянии 0,2 м, при рассчитанной мощности облучения 148 Вт/м². Равномерность облучения всей поверхности клубня обеспечивалась роликовым транспортером, на котором монтировалась УФ камера. В качестве источников бактерицидного ультрафиолетового излучения использовались без

озоновые лампы низкого давления фирмы Philips типа TUV-75, излучающие УФ-С с максимумом на 254 нм. Бактерицидный поток одной лампы – 20 Вт, количество ламп – 20 шт.

После уборки в поле проводили анализ полученного урожая на пораженность клубней фитопатогенами в институте картофелеводства им. Лорха. Степень развития болезни рассчитывали по формуле Эббота:

$$R = \frac{\sum bt \times 100}{7n} \quad (1)$$

где: R – степень развития болезни или повреждения ботвы (%); $\sum bt$ – сумма произведений балла поражения или повреждения на количество растений или клубней, пораженных или поврежденных по этому баллу; n – количество растений или клубней в пробе; 7 – высший балл шкалы учета.

Распространенность рассчитывали по формуле:

$$P = \frac{n \times 100}{N} \quad (2)$$

где: P – распространенность болезни (%); n – количество растений или клубней, пораженных болезнью; N – количество растений или клубней в пробе.

В лабораторном эксперименте в течение 30 дней проклюнувшихся глазков в клубнях для каждого сорта картофеля.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ данных по изучению распространенности фитопатогенов на клубнях картофеля нового урожая сорта «Санте» показал достоверное отличие от контроля ($p < 0,05$). Для парши обыкновенной при дозе облучения 15 кДж/м² и парши серебристой при дозе облучения 10 кДж/м² отмечено снижение распространенности по сравнению с контролем на 20–30 %. Распространенность фитофтороза снижается в 2 раза после воздействия минимальной дозой облучения 10 кДж/м² (таблица 1). В работе Scott et al. [5] в результате исследования предпосевного облучения УФ-С семян томата, пораженных *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici* (FOL) and f. Sp. *Radicis-lycopersici* (FORL) выявлено статистически значимое снижение заболеваемости и прогрессирование *B. cinerea* на 10 % после доз облучения 4 и 6 кДж/м². Таким образом, оптимальная доза УФ-С, которая определяет устойчивость патогенов к облучению, будет зависеть от сельскохозяйственной культуры и типа фитопатогенов, которые их населяют.

Влияние УФ-С излучения на динамику прорастания глазков показало существенные различия. Спустя трое суток после облучения клубни сорта «Гала» при дозах облучения 5, 10 и 20 кДж/м² имели

проклюнувшиеся глазки, как и в контрольном варианте (температура хранения 24 °С, (рис. 1.)). У сорта «Леди Клер» первые глазки появились спустя 7 суток при дозах облучения 5 и 30 кДж/м², в контроле они наблюдались на четвертые сутки.

При хранении клубней в холодильной камере при 10 °С (рис. 2) после облучения прорастание глазков у обоих сортов было равномерным спустя

неделю как в контроле, так и в опытных образцах, т.е. стимулирующего эффекта УФ-С излучения не наблюдалось. Работы зарубежных авторов показали, что предпосевное УФ-С облучение семян сельскохозяйственных культур (томатов, бобов мунг, зеленой фасоли) увеличивает скорость прорастания, сухую биомассу, повышает индекс силы проростков. [5, 7].

Таблица 1

Распространенность патогенов картофеля после облучения УФ-С

Доза облучения, кДж/м ²	Фитопатогены, % от контроля		
	Парша обыкновенная	Парша серебристая	Фитофтороз
Контроль	100	100	100
10	124	58	30
15	84	71	40
20	75		
30	78		
40	68		

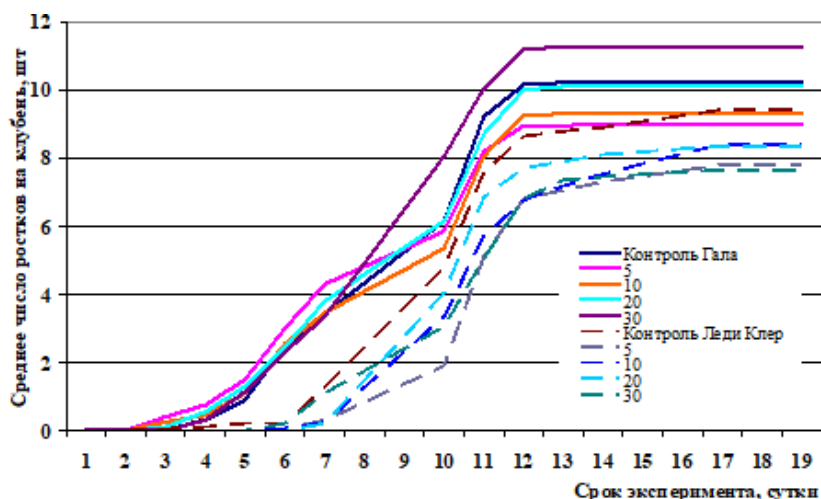


Рисунок 1. Динамика прорастания глазков после облучения УФ-С у сортов «Гала» и «Леди Клер» при температуре хранения 24 °С

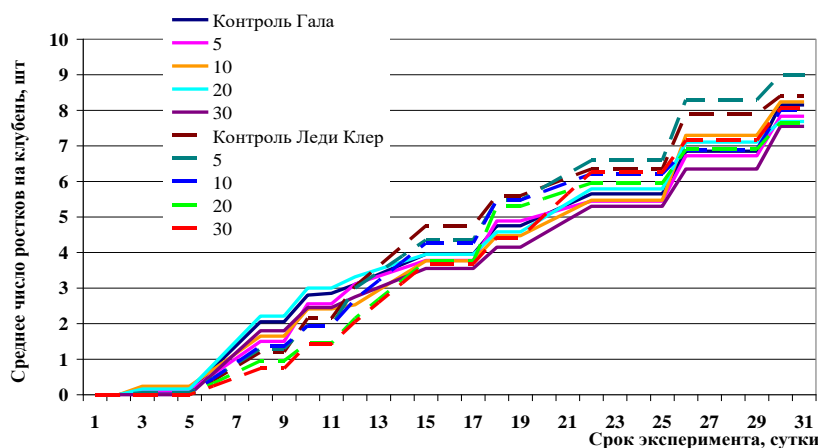


Рисунок 2. Динамика прорастания глазков после облучения УФ-С у сортов «Гала» и «Леди Клер» при температуре хранения 10 °С

Заклучение

Таким образом, результат воздействия предпосевного УФ-С облучения зависит как от дозы облучения, так и от вида фитопатогена, распространенного на сельскохозяйственной культуре. Дозы от 10 кДж/м² и выше приводит к достоверному снижению распространенности парши обыкновенной и серебристой, фитофтороза. Данный эффект может быть обусловлен непосредственным воздействием УФ-С излучения вначале на фитопатогены, поскольку существенных изменений в динамике прорастания клубней картофеля разных сортов не наблюдалось.

Список литературы

1. Wencai, Qi, Jingwen, Ma, Jinguo, Z. et. al. Effects of low doses of UV-B radiation supplementation on tuber quality in purple potato (*Solanum tuberosum* L.) // *Plant Signal. Behav.* 2020. Vol. 15 №9. P. 1–8.

2. Shing Teoh, L., Lasekan, O. et.al. The effect of ultraviolet treatment on enzymatic activity and total phenolic content of minimally processed potato slices // *J Food Sci Technol.* 2016. Vol. 53 № 7. P. 3035–3042.

3. Artes-Hernandez F., Robles P. A., Gomez P. A. et al. Low UV-C illumination for keeping overall quality of fresh-cut watermelon // *Postharvest Biol Technol.* 2010. Vol. 55. P. 114–120.

4. Crupi P., Pichierra A., Basile T., Antonacci D. Post-harvest stilbenes and flavonoids enrichment of table grape cv Redglobe (*Vitis vinifera* L.) as affected by interactive UV-C exposure and storage conditions // *Food Chem.* 2013. Vol. 141. P. 802–808.

5. Scott G., Almasrahi A., Malekpoor Mansoorkhani F. et.al. Hormetic UV-C seed treatments for the control of tomato diseases // *Plant Pathology.* 2019. Vol. 68, №4. P. 1–8. Doi: 10.1111/ppa.12987.

6. Hassenberg K., Huyskens-Keil S., Herppich W.B. Impact of postharvest UV-C and ozone treatments on microbiological properties of white asparagus (*Asparagus officinalis* L.) // *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2012. V 85(2), P. 174–181.

7. Hamid N., Javvaid F. Influence of seed pre-treatment by UV-A and UV-C radiation on germination and growth of mung beans. Pakistan // *Journal of Chemistry.* 2011. V. 1. P. 164–167.

PRE-SOWING UV-C IRRADIATION OF POTATO TUBERS AS A FACTOR IN REDUCING THE INCIDENCE OF PHYTOPATHOGENS

Guseva O.A., Tsygvintsev P.N.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The effect of low doses of UV-C radiation was studied in a field experiment (0, 10, 15, 20, 30 and 40 kJ/m²) on previously affected potato tubers of the "Sante" variety with scab and silver scab, late blight. The radiation dose of 15 kJ/m² led to a significant decrease ($p < 0.05$) in the prevalence of scab by 20 % and silver scab by 30%. The prevalence of phytophthora on tubers decreased by 2 times relative to the control value at an irradiation dose of 10 kJ/m². In a laboratory experiment at two temperature conditions of 24 °C in the dark and 10 °C in the refrigerator, the germination rate of potato tubers of two varieties "Gala" and "Lady Clare" was studied when irradiated with UV-C doses, the results obtained did not show the expected increase in the germination rate of tubers when irradiated with UV-C.

Keywords: *ultraviolet C, potato, Streptomyces scabies, Helminthosporium solani, Phytophthora, germination rate*

In a field experiment, the presowing effect of low doses of UV-C radiation was studied on affected *Streptomyces scabies*, *Helminthosporium solani* and *Phytophthora* potato tubers of the "Sante" variety. The following results were obtained: the radiation dose of 15 kJ/m² resulted to a significant reduction ($p < 0.05$) of such phytopathogens as *Streptomyces scabies* by 20 % and *Helminthosporium solani* by 30 %. At exposed to a minimum radiation dose of 10 kJ/m² the spread of *Phytophthora* on tubers decreased by 2 times relative to the control value. In a laboratory experiment, the germination rate of potato tubers of two varieties "Gala" and "Lady Clare" was studied at irradiated doses UV-C of 0, 5, 10, 20, 30 kJ/m² at two temperature conditions of 24 °C in the dark and 10 °C in the refrigerator. The results obtained did not reveal the expected increase in the

rate of germination of tubers under the influence of UV-C radiation, control and experimental samples germinated simultaneously, but some stimulating effect was observed at irradiated with 5, 10, 20 kJ/m² when stored at 24 °C in the "Gala" variety, while when stored at 10 °C the germination of control and experimental tubers of both varieties was evenly. That is, the result of exposure to pre-sowing UV-C radiation depends on both the radiation dose and the type of pathogen. Thus, doses of 10 kJ/m² and higher lead to a significant reduction in comparison with the control of both the prevalence and the degree of development of *Streptomyces scabies*, *Helminthosporium solani* and *Phytophthora*. At the same time, the results of the study on the detection of an increase in the rate of germination of tubers by the selected radiation doses did not reveal

the effective effect of UV-C radiation, which may become one of the aspects for further work with this crop.

УДК 631.17; 539.122.04

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН РАЙГРАСА ОДНОЛЕТНЕГО НА СОДЕРЖАНИЕ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ

Гусева Ю.Е.

*Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева
127550, г. Москва, Тимирязевская улица, д. 49, Российская Федерация
e-mail: uguseva@rgau-msha.ru*

Изучено влияние γ -облучения семян райграса однолетнего сорта «Рапид» на содержание в растениях азота, фосфора и калия. Определено, что обработка посевного материала ионизирующим излучением в дозе 10 Гр резко снижает содержание азота в сельскохозяйственной культуре. Явление радиационного гормезиса на содержание в растениях райграса первого укоса фосфора зафиксировано при поглощенных дозах 15 и 20 Гр, ингибирующее действие радиации на накопление макроэлемента растениями второго укоса отмечается при облучении семян в дозах 8 и 10 Гр. Предпосевное гамма-облучение семян райграса однолетнего в дозах 4–20 Гр снижает содержание калия растениями первого и второго укоса.

Keywords: γ -облучение, райграс однолетний, радиационный гормезис, азот, фосфор, калий

Одной из перспективных радиационных технологий в сельском хозяйстве в настоящее время является облучение семян сельскохозяйственных культур перед посевом. Обработка посевного материала ионизирующим излучением позволяет улучшить рост растений, их развитие, увеличить урожай и качество растениеводческой продукции. Стоит отметить, что для каждой сельскохозяйственной культуры можно выделить диапазон доз, при которых будут наблюдаться положительные эффекты от воздействия радиации. Явление радиационного гормезиса позволяет ускорить деление, рост и развитие клеток.

Во многих исследовательских работах [1–3] подтверждается гипотеза о том, что облучение низкими дозами ионизирующего излучения может вызывать стимулирующий эффект на рост и развитие растений вследствие изменения в клетках гормональной сигнальной сети или же повышения антиоксидантной способности клеток. Ингибирование роста, вызванное облучением в высоких дозах, связывают с остановкой клеточного цикла во время деления соматических клеток и (или) различным повреждением всего генома. Взаимосвязь между ростом облученных растений и дозой гамма-облучения была выявлена путем исследования морфологических изменений и роста проростков облученных растений. Низкие дозы, по-видимому, ингибируют синтез ауксина, в то время как большие дозы могут непосредственно разрушать его активность.

Ускоренное развитие облученных растений связывают с интенсивным притоком питательных

веществ к поврежденным облучением мембранам и накоплением отдельных метаболитов [2].

В 2022 году на кафедре агрономической, биологической химии и радиологии был заложен вегетационный опыт с целью изучения влияния разных доз ионизирующего излучения на содержание в растениях райграса однолетнего сорта «Рапид» азота, фосфора и калия в двух укосах. Перед закладкой опыта посевной материал был облучен во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии на гамма-установке радиационного облучения ГУР-120 в дозах 4, 8, 10, 15 и 20 Гр. Источником ионизирующего излучения был ^{60}Co .

Согласно проведенным исследованиям, γ -облучение семян райграса дозами 4–20 Гр оказывает влияние на содержание макроэлементов в растениях (табл. 1).

Содержание азота в растениях райграса однолетнего сорта «Рапид» 1 укоса (таблица 1, рисунок 1) колебалось в пределах 0,012–0,198 %. Стимулирующего действия радиации на накопление растениями азота зафиксировано не было. Уменьшение содержания макроэлемента в райгресе наблюдалось уже с поглощенной дозы 4 Гр. В варианте, где посевной материал облучали ионизирующим излучением в дозе 10 Гр, было отмечено наименьшее накопление азота в растениях, а именно 0,012 %, что на 94,06 % ниже контроля. Статистически значимое снижение содержания азота в райгресе также было зафиксировано при поглощенной дозе 20 Гр и составляло 0,073 %. При облучении семян в дозах 4–20 Гр снижение контрольных значений было на 9,61–94,06 %.

Облучение семян райграса однолетнего ионизирующим излучением в дозах 4–20 Гр оказало влияние и на содержание фосфора в растениях 1 укоса. Накопление культурой элемента минерального питания колебалось в пределах 0,013–0,034 %. Стимулирующее действие радиации было зафиксировано при обработке посевного материала радиацией в

дозах 15 и 20 Гр. В данных вариантах зафиксировано наибольшее накопление макроэлемента, а именно 0,034 и 0,033 % соответственно, что на 153,85–161,54 % выше контрольных значений. Статистически значимых изменений содержания фосфора в остальных вариантах отмечено не было.

Таблица 1

Влияние предпосевного гамма-облучения семян райграса однолетнего сорта «Рapid» в дозах 4-20 Гр на содержание азота, фосфора и калия в растениях 1 укоса, %

Вариант, доза облучения, Гр	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	0,198	0,013	0,741
4	0,179	0,013	0,518
8	0,104	0,016	0,486
10	0,012	0,015	0,495
15	0,169	0,034	0,501
20	0,073	0,033	0,499
НСР ₀₅	0,12	0,008	0,103

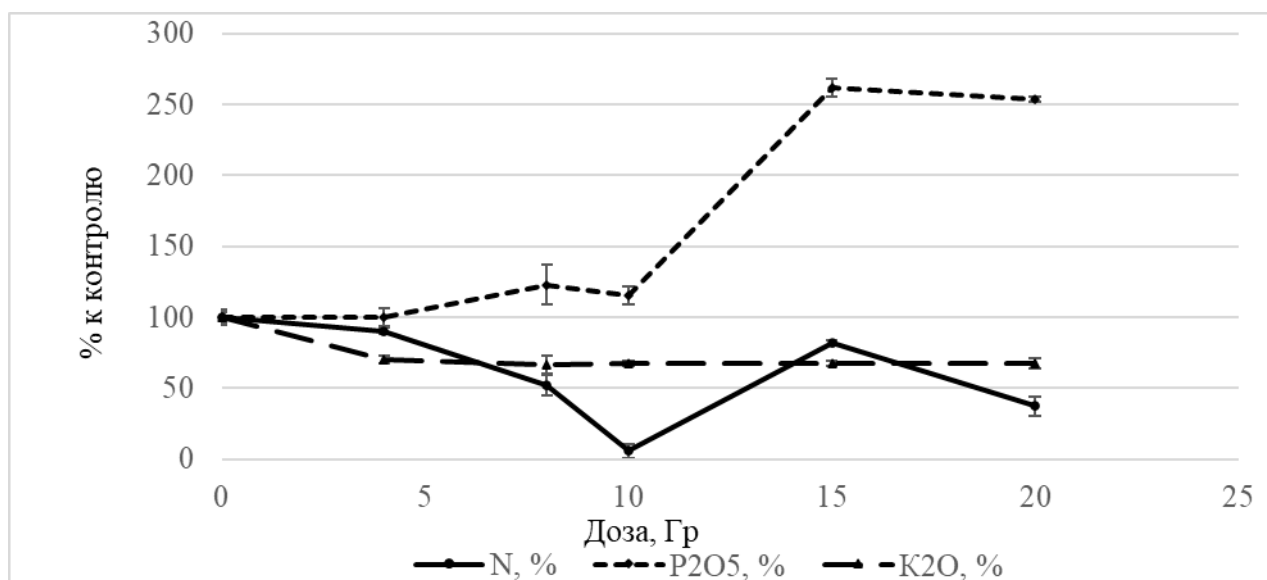


Рисунок 1. Влияние предпосевного гамма-облучения семян райграса однолетнего сорта «Рapid» в дозах 4–20 Гр на содержание в растениях 1 укоса основных элементов минерального питания

Накопление растениями райграса однолетнего сорта «Рapid» 1 укоса калия также зависело от полученной дозы облучения. Содержание макроэлемента в сельскохозяйственной культуре находилось в пределах 0,486–0,741 %. Положительного действия ионизирующего излучения на содержание калия отмечено не было. Начиная с воздействия радиацией на посевной материал в дозе 4 Гр наблюдалось статистически значимое уменьшение накопления растениями макроэлемента. При облучении семян райграса в дозах 4–20 Гр снижение контрольных значений было на 29,73–33,78 %.

Содержание в растениях райграса однолетнего сорта «Рapid» 2 укоса азота колебалось в пределах

0,140–0,695% (таблица 2, рисунок 2). Положительное действие радиации было отмечено при воздействии на посевной материал в дозе 20 Гр, где содержание азота составляло 0,695 %, что на 48,21 % выше контроля. Ингибирующее действие ионизирующего излучения зафиксировано также при облучении семян в дозе 10 Гр, где накопление азота растениями райграса было 0,140 %, что на 70,4 % ниже содержания элемента питания в варианте с необлученными семенами. Статистически значимых изменений накопления макроэлемента в остальных вариантах отмечено не было.

Влияние предпосевого гамма-облучения семян райграса однолетнего сорта «Рapid» в дозах 4–20 Гр на содержание азота, фосфора и калия в растениях 2 укоса, %

Вариант, доза облучения, Гр	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	0,469	0,031	0,664
4	0,502	0,027	0,387
8	0,467	0,022	0,402
10	0,140	0,023	0,350
15	0,454	0,025	0,308
20	0,695	0,022	0,334
НСР ₀₅	0,14	0,008	0,234

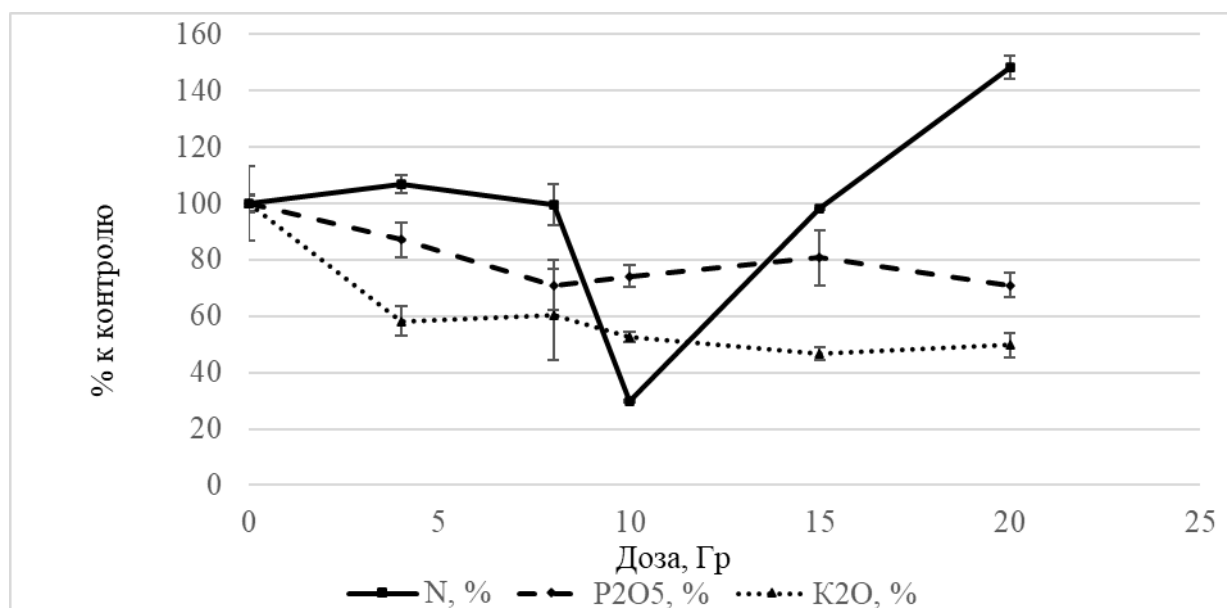


Рисунок 2. Влияние предпосевого гамма-облучения семян райграса однолетнего сорта «Рapid» в дозах 4–20 Гр на содержание в растениях 2 укоса основных элементов минерального питания

Воздействие радиацией на посевной материал в дозах 4 – 20 Гр повлияло и на накопление фосфора растениями райграса однолетнего сорта «Рapid» 2 укоса. Содержание макроэлемента в сельскохозяйственной культуре находилось в пределах 0,022–0,031 %. Стимулирующего действия ионизирующего излучения на накопление в растениях райграса 2 укоса отмечено не было. Статистически значимо снижается содержание фосфора в сельскохозяйственной культуре при облучении посевного материала в дозах 8, 10 и 20 Гр, где накопление макроэлемента составляло 0,022–0,023 %, что на 25,81–29,03 % ниже контроля. Достоверных изменений содержания фосфора в остальных вариантах не отмечено.

Облучение семян райграса однолетнего ионизирующим излучением в дозах 4–20 Гр оказало влияние и на содержание калия в растениях 2 укоса. Накопление элемента питания сельскохозяйственной культурой колебалось в пределах 0,308–0,664 %. Стимулирующего эффекта воздействия радиации на посевной материал зафиксировано не было.

Достоверное уменьшение накопления растениями калия наблюдалось уже при гамма-облучении семян райграса в дозе 4 Гр. При воздействии радиации в дозах 4–20 Гр снижение контрольных значений было на 39,46–53,31 %.

Список литературы

1. Kim J.S., Kim J.K., Lee Y.K. et al. Effects of low dose gamma radiation on the germination and yield components of Chinese cabbage. // Kor. J. Environ. Agr, 2017. P. 274–278.
2. Wi S.G., Chung B.Y., Kim J.H. et al. Ultrastructural changes of cell organelles in Arabidopsis stem after gamma irradiation. // J. Plant Biol. 2005. P. 195–200.
3. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

INFLUENCE OF γ -IRRADIATION OF THE SEEDS OF ANNUAL RYEGASS ON THE CONTENT OF MACROELEMENTS

Guseva Yu.E.

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

The effect of γ -irradiation of seeds of annual ryegrass of the Rapid varieties on the content of nitrogen, phosphorus and potassium in plants was studied. It has been determined that the treatment of seed material with ionizing radiation at a dose of 10 sharply increases the nitrogen content in the crop. The phenomenon of radiation hormesis on the content of phosphorus in ryegrass plants of the first cut was recorded at absorbed doses of 15 and 20 Gy. The inhibitory effect of radiation on the accumulation of macroelements by plants of the second cutting level causes irradiation of seeds with doses of 8 and 10 Gy. Presowing gamma irradiation of annual ryegrass seeds in doses of 4-20 Gy reduces the potassium content in plants of the first and second cuts.

Keywords: *γ -irradiation, annual ryegrass, radiation hormesis, nitrogen, phosphorus, potassium*

One of the promising radiation technologies in agriculture at present is the irradiation of crop seeds before sowing. The treatment of seed material with ionizing radiation makes it possible to improve the growth of plants, their development at the early stages of ontogenesis, to increase the yield and quality of the products obtained. It is worth noting that for each crop, a range of doses can be distinguished at which positive effects from irradiation will be observed. The phenomenon of radiation hormesis allows you to accelerate the division, growth and development of cells.

In 2022, a vegetation experiment was laid at the Department of Agronomic, Biological Chemistry and Radiology to study the effect of different doses of ionizing radiation on the content of nitrogen, phosphorus and potassium in ryegrass plants in two cuts. Before the experiment, the seed material was irradiated at the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology at the GUR-120 gamma radiation irradiation unit at doses of 4, 8, 10, 15 and 20 Gy. The source of ionizing radiation was ^{60}Co .

According to the studies, the pre-sowing irradiation of seeds of annual ryegrass of the Rapid varieties with doses of 4-20 affects the accumulation of macronutrients in plants.

The stimulating effect of radiation on the accumulation of nitrogen by plants was not recorded. Starting from an absorbed dose of 4 Gy, the content of the macroelement in ryegrass decreased. In the variant where

the seed material was irradiated with ionizing radiation at a dose of 10 Gy, the smallest accumulation of nitrogen in plants was noted, namely 0.012 %, which is 94.06 % lower than the control. A statistically significant decrease in the nitrogen content in ryegrass was also recorded at an absorbed dose of 20 Gy and amounted to 0.073 %. When seeds were irradiated with doses of 4–20 Gy, the decrease in control values was by 9.61–94.06 %.

The accumulation of the phosphorus by the culture varied within 0.013 - 0.034%. The stimulating effect of radiation was recorded when the seed material was treated with radiation at doses of 15 and 20 Gy. In these variants, the highest accumulation of the macroelement was recorded, namely 0.034 and 0.033%, respectively. Exceeding the control values by 153.85 - 161.54%. There were no statistically significant changes in the phosphorus content in the remaining variants.

Accumulation by plants of ryegrass of the annual variety Rapid 1 mowing of potassium also depended on the received radiation dose. The content of the macroelement in the agricultural crop was in the range of 0.486 - 0.741%. There was no stimulating effect of radiation on this indicator. Starting with an absorbed dose of 4 Gy, a significant decrease in the accumulation of potassium by plants was observed. When the seed material was exposed to radiation in doses of 4–20 Gy, the decrease in control values was by 29.73–33.78 %.

РАСЧЁТ КОМБИНАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Золотов С.А.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Студеникин Ф.Р.^{1,2}, Крусанов Г.А.³, Кречетов Н.Д.¹, Соколов С.А.¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины, г. Москва, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Российская Федерация.

³ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: ^а zolotov.sa15@gmail.com

Предложен метод повышения равномерности радиационной обработки ускоренными электронами, основанный на расчете весовых коэффициентов для глубинных дозовых распределений от электронов после прохождения пучка через алюминиевые пластины разной толщины для формирования оптимального распределения дозы. Показано, что использование ограниченного набора пластин толщиной 0,5 – 9,5 мм позволяет повысить равномерность радиационной обработки до 95 % при облучении электронами с энергией 5 МэВ – 10 МэВ для объектов с массовой толщиной до 8 г/см².

Ключевые слова: радиационная обработка, однородность распределения поглощенной дозы, пучок ускоренных электронов, алюминиевые пластины

При радиационной обработке важно обеспечить равномерность распределения поглощенной дозы по объему облучаемого объекта. Критерием однородности облучения выступает коэффициент K , рассчитываемый как отношение минимального значения поглощенной дозы в объекте D_{min} к максимальной дозе D_{max} [1]. Для многих категорий облучаемых объектов, таких как биоимпланты, фармацевтические препараты и продукты питания, требуется обеспечить равномерность облучения не менее 80% [2-4]. Поэтому достижение однородности облучения более 80% для объектов с массовой толщиной более 2 г/см² является сложной технологической задачей.

Ранее в работе [5] был предложен метод увеличения однородности облучения с использованием алюминиевых пластин толщиной до 5 мм. При прохождении электронного излучения через пластины энергетический спектр пучка смещается в сторону меньших энергий, что приводит к смещению максимума поглощенной дозы ближе к поверхности объекта. Но при этом уменьшается максимальный размер объектов, для которых может быть достигнута высокая однородность обработки.

В данной работе предлагается модификация описанного метода, заключающаяся в комбинации облучения без пластин и с попеременным размещением на пути пучка алюминиевых пластин разной толщины. Такой подход позволит получить более однородную суперпозицию распределений поглощенной дозы. Схемы подобного рода применяются в протонной терапии для получения модифицированного пика Брэгга [6].

С математической точки зрения задача состоит в расчёте весовых коэффициентов, для которых осуществляется минимизация функционала (1):

$$\sum_{i=1}^N (\sum_{j=1}^M \omega_j D_{ij} - const)^2 \rightarrow Min, (1)$$

где $\sum_{j=1}^M D_{ij}$ – поглощенная доза, создаваемая пучком электронов в точке r_j объекта заданной массовой толщины при прохождении алюминиевой пластины толщиной d_i . Суммирование ведется по i от 1 до N , где N – число различных толщин алюминиевых пластин и по j от 1 до M , где M – число точек в объекте, в которых определяется поглощенная доза.

Целью исследования является нахождение комбинации алюминиевых пластин различной толщины для повышения однородности обработки ускоренными электронами с энергией от 5 МэВ до 10 МэВ объектов в форме параллелепипеда с массовой толщиной в диапазоне от 1 г/см² до 8 г/см².

Для получения значений D_{ij} проводились компьютерные расчеты с использованием инструментария Geant4 [7], в основе которого лежит метод Монте-Карло. Моделировалось облучение водного фантома в форме параллелепипеда 200 x 200 x 200 мм моноэнергетическими пучками электронов с энергией от 5 МэВ до 10 МэВ с шагом 0.5 МэВ с размещением между пучком и фантомом алюминиевых пластин толщиной от 0.5 мм до 9.5 мм с шагом 0.5 мм, а также облучение фантома без пластин. Фантом разбивался на 200 слоёв толщиной 1 мм, в каждом из которых фиксировалась величина поглощенной дозы.

Поиск весовых коэффициентов для рассчитанных дозовых распределений осуществлялся путём минимизации функционала (1) методом неотрицательных наименьших квадратов [8]. Затем рассчитывалась суперпозиция дозовых распределений и оценивалась её однородность.

На рисунке 1 представлены распределения поглощённой дозы при одностороннем облучении фантома электронами с энергией 10 МэВ в присутствии на пути пучка пластин разной толщины и без пластин.

Из рисунка 1 видно, что размещение пластин на пути пучка позволяет увеличить однородность обработки на глубинах, меньших L_{opt} [1]. При этом для объектов массовой толщиной 5.5 г/см^2 и больше достичь однородность, отличную от нуля, в рамках

одностороннего облучения электронами с энергией до 10 МэВ принципиально невозможно. Одним из вариантов увеличения толщины обрабатываемых объектов является использование двустороннего облучения.

На рисунке 2 представлены значения коэффициента K для водных фантомов массовой толщиной от 1 г/см^2 до 8 г/см^2 при двустороннем облучении электронами с энергией 5 МэВ – 10 МэВ с размещением комбинации пластин и без них.

Из рисунка 2 видно, что применение разработанного метода в рамках двустороннего облучения позволяет достигать однородность облучения не ниже 95% для фантомов с размерами до $2 L_{opt}$ для каждой энергии электронов.

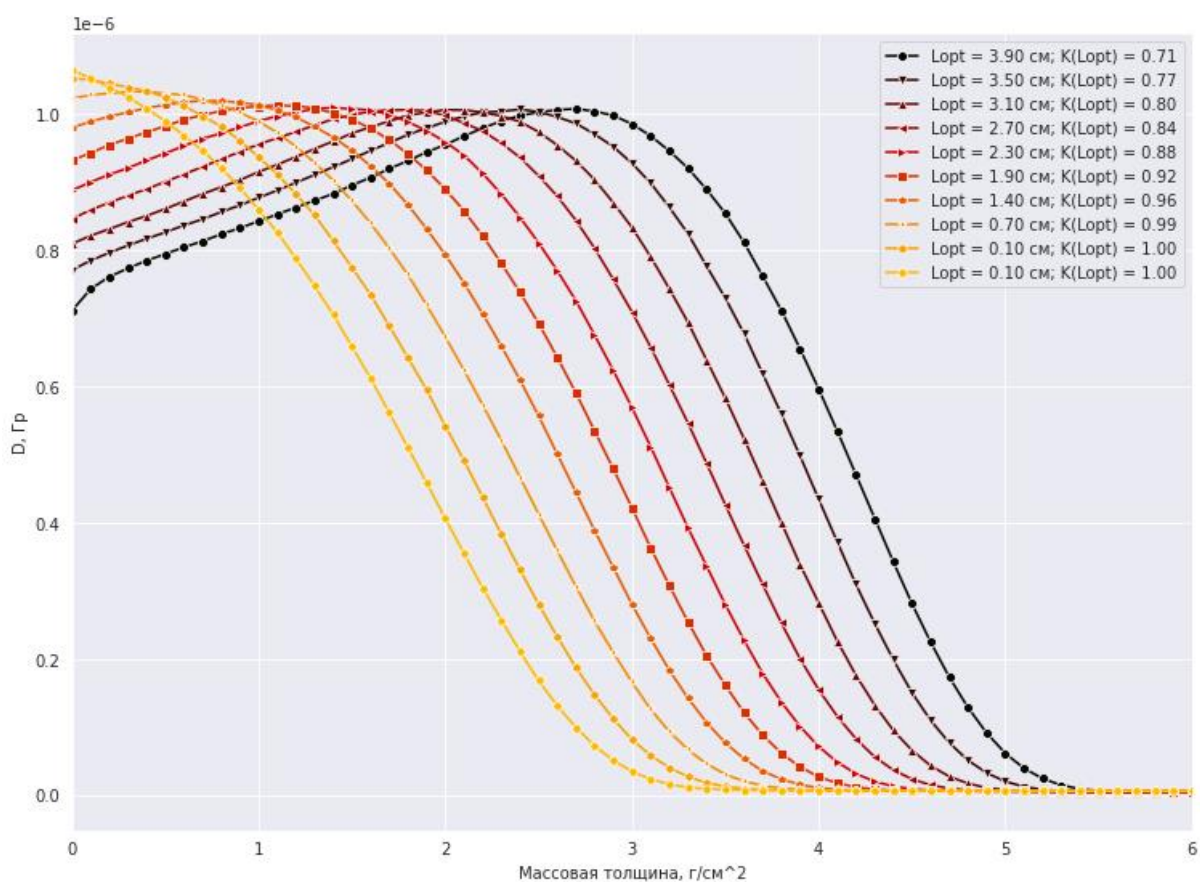


Рисунок 1. Распределение поглощённой дозы по глубине фантома при облучении электронами с энергией 10 МэВ

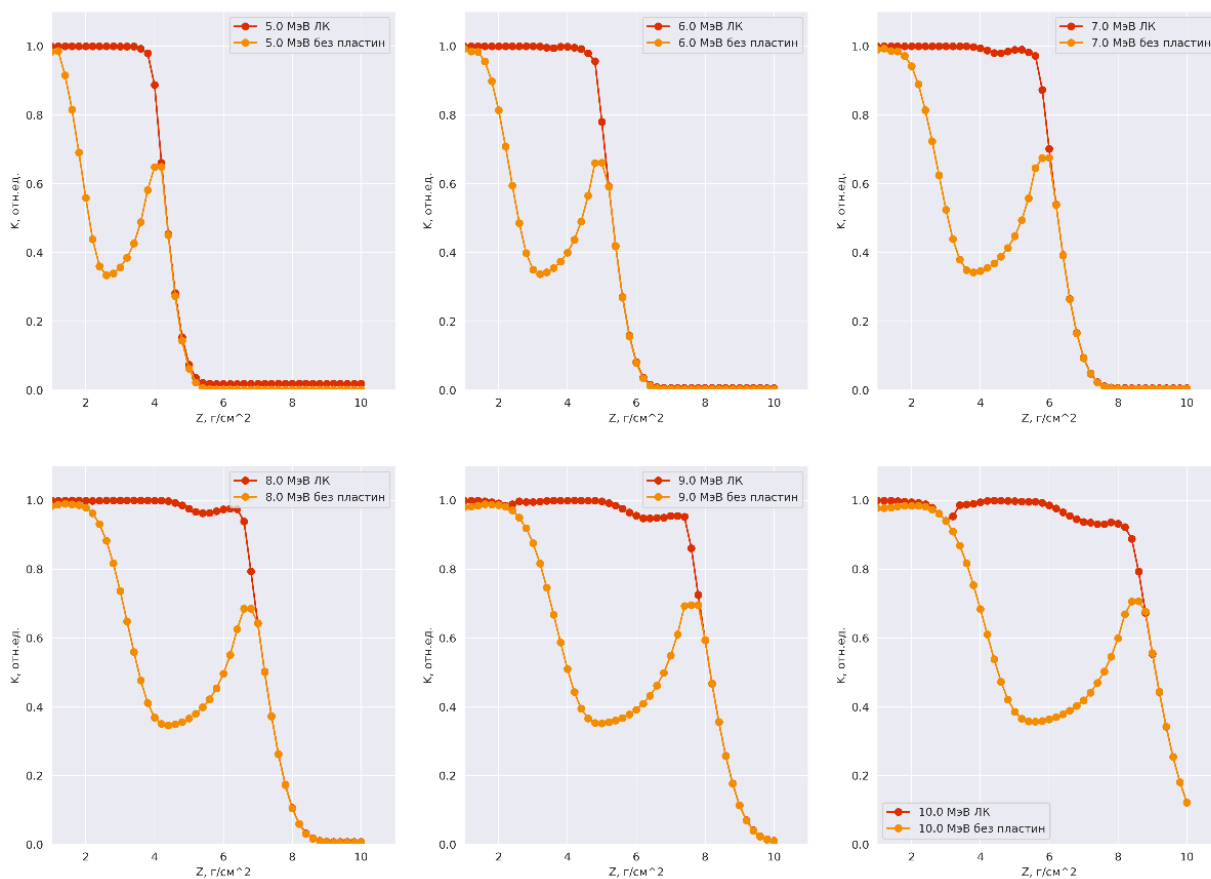


Рисунок 2. Значения коэффициента К для фантомов разной толщины при двустороннем облучении электронами 5 МэВ – 10 МэВ без пластин и с размещением комбинации пластин

При облучении без пластин выражена общая тенденция спада однородности, её последующего роста с выходом на локальный максимум (значение которого не превышает 0.7), и быстрый спад до нуля после максимума. Этот эффект вызван наложением пиков максимума дозы при определенных размерах фантома (рис.3), приводящему к переоблучению центральной части объекта.

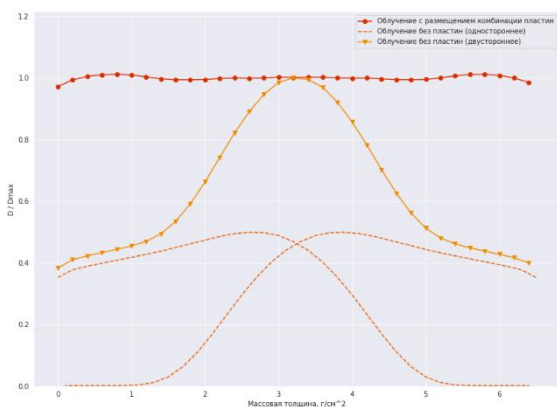


Рисунок 3. Распределение поглощённой дозы по глубине фантома массовой толщиной 6.5 г/см² при двустороннем облучении с комбинацией пластин и без пластин

При дальнейшем увеличении массовой толщины облучаемого объекта пики перестают перекрывать друг друга, из-за чего однородность быстро спадает до нуля.

Таким образом, оптимизация метода модификации пучка электронов, заключающаяся в комбинации облучения объектов без пластин и размещении на пути пучка пластин различной толщины с рассчитанными весовыми коэффициентами, позволяет проводить радиационную обработку объектов с массовой толщиной от 1 г/см² до 8 г/см², обеспечивая равномерность распределения поглощённой дозы 95% и выше.

Исследование выполнено при поддержке междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы

1. Bliznyuk U.A., Studenikin F.R., Borshchegovskaya P.Y. et al. Characteristics of dose distributions of electron beams used in the radiation processing of food products // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85, no. 10. P. 1097–1101.

2. Trends in radiation sterilization of health care products / Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.

3. Близнюк У.А., Авдюхина В. М., Борщеговская П.Ю. и др. Определение микробиологических и химических показателей мясной продукции после обработки электронным излучением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2021. т. 87, № 6. с. 5–13. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-5-13.

4. Cleland M.R. Industrial applications of electron accelerators // CERN Accelerator School: small accelerators, 2006. p. 383-416. DOI 10.5170/CERN-2006-012.383.

5. Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyaev A.P. et al. Impact of Aluminum Plates on Uniformity of Depth Dose Distribution in Object during Electron Processing // Moscow Univ. Phys. 76 (Suppl 1), S1–S7 (2021). DOI: 10.3103/S0027134922010106

6. Хорошков В.С., Бреев В.М., Золотов В.А. и др. Спиральный гребенчатый фильтр // Медицинская радиология, 1987, т.32 №8, с.76-80.

7. «Introduction to Geant4». [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/IntroductionToGeant4/html/>, свободный. – (дата обращения: 19.09.2022).

8. Lawson C., Hanson R.J., (1987) Solving Least Squares Problems, SIAMS

CALCULATION OF ALUMINIUM PLATES COMBINATION WITH DIFFERENT THICKNESS TO INCREASE RADIATION TREATMENT UNIFORMITY WITH ACCELERATED ELECTRONS

Zolotov S.A.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Studenikin F.R.^{1,2}, Krusanov G.A.³, Krechetov N.D.¹, Sokolov S.A.¹

¹ Moscow State University named by M.V. Lomonosov, Physics Department, department of accelerators' physics and radiation medicine, Moscow, Russian Federation

² Scientific Institute of Nuclear Physics by D.V. Skobeltsyn, Moscow, Russian Federation

³ Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

A method of radiation treatment uniformity increasing with accelerated electrons is proposed. The developed method is based on the calculation of weight coefficients for the depth dose distributions from electrons after the beam passes through aluminum plates of different thicknesses to form an optimal dose distribution, is proposed. It is shown that the use of a limited set of 0.5 mm – 9.5 mm thick plates can increase the uniformity of radiation treatment up to 95% during irradiation by electrons with energy of 5 MeV – 10 MeV for objects with mass thickness up to 8 g/cm².

Keywords: radiation treatment, uniformity of absorbed dose distribution, accelerated electron beam, aluminum plates

УДК 539.1.06

ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В МЯСЕ КУРИЦЫ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ НЕДЕЛЬ ХРАНЕНИЯ

Ипатова В.С.^{1,a}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Болотник Т.А.³, Родин И.А.^{3,4}, Хмелевский О.Ю.², Черняв А.П.^{1,2}, Юров Д.С.¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Российская Федерация.

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Российская Федерация.

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Российская Федерация.

⁴ ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), кафедра эпидемиологии и доказательной медицины, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: ^a ipatova.vs15@physics.msu.ru

Проведено исследование содержания летучих органических веществ в охлажденном мясе курицы после ее облучения ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 0.25 кГр до 20 кГр в течение двух недель хранения. Во всех образцах продукции были идентифицированы альдегиды гексаналь, гептаналь и пентаналь, ответственные за образование специфических запахов в охлажденном мясе птицы после радиационной обработки. Установлено, что концентрация альдегидов в контрольных образцах и образцах, облученных в дозе 0.25 кГр, снижалась со временем хранения; концентрация альдегидов в образцах, облученных в дозах 0.5-10 кГр, увеличивалась в первые пять суток наблюдения, а затем уменьшалась в течение последующих 10 суток.

Ключевые слова: радиационная обработка, курица, ускоренные электроны, летучие органические соединения, альдегиды

Все более широкое применение находит радиационный метод обработки биообъектов органического происхождения, в том числе в области пищевой и сельскохозяйственной продукции, с использованием ускорителей электронов [1-3]. При соблюдении технологических параметров обработки и физико-химических свойств самого продукта метод способен уменьшить потери продукции на этапах хранения и транспортировки, а также продлить сроки годности и обеспечить ее санитарно-эпидемиологическую безопасность.

На сегодняшний день ведутся многочисленные исследования по влиянию различных физико-технических параметров радиационной обработки на сельскохозяйственную и пищевую продукцию [4-9]. Особенно важным является поиск эффективного диапазона доз для конкретного типа продукции, при котором происходит достаточное ингибирование болезнетворной микрофлоры, но еще не происходят существенные нарушения биохимических и органолептических показателей [4,5].

Использование высокочувствительного метода газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) позволяет выявить закономерности биохимических изменений, происходящих в пищевой продукции в течение хранения, основанные на анализе поведения летучих органических соединений [6-9].

В данном исследовании был проведен мониторинг концентраций летучих соединений в мясе птицы после воздействия ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 0.25 кГр до 20 кГр в течение двух недель хранения.

В качестве объекта исследования были выбраны охлажденные тушки курицы, хранившиеся в холодильной камере при температуре 2 °С в течение суток с момента выработки. Образцы курицы массой (0.5 ± 0.1) г помещались в пластиковые микроцентрифужные пробирки объемом 2 мл типа эппендорф.

Проводилось одностороннее облучение образцов на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с максимальной энергией 1 МэВ, ток пучка варьировался от 0.1 мА до 3 мА, температура окружающей среды составляла 20 °С. Для контроля поглощенной дозы использовались дозиметрические пленки СО-ПД(Э)1/10 и СО-ПД(Ф)Р5/50,

которые выкладывались на дюралюминиевую подложку вместе с образцами курицы. После облучения, определяли изменения оптической плотности облученных пленок с помощью спектрофотометра UV-3600, далее происходил пересчет в поглощенную дозу. Исследуемые образцы курицы облучались в дозах 0.25 кГр, 0.5 кГр, 1 кГр, 2 кГр, 5 кГр, 10 кГр и 20 кГр.

Анализ концентраций летучих соединений в облученных и контрольных образцах, хранившихся в холодильной камере при температуре (3 ± 1) °С, проводился методом ГХ-МС на 0-ые, 1-ые, 4-ые, 6-ые, 8-ые, 11-ые и 13-ые сутки после проведения радиационной обработки.

По результатам химического исследования мяса курицы получено, что концентрации всех идентифицированных соединений (альдегиды – пентаналь, гексаналь, гептаналь; спирты – пентанол-1, гексанол-1; кетоны – ацетон, бутанон-2, пентанон-2; сульфиды – демитилсульфид) имеют нелинейные зависимости как от дозы облучения, так и от времени хранения. При этом для альдегидов, роль которых в формировании специфического запаха мясной продукции после радиационной обработки обсуждается в исследованиях других авторов [8,9], наблюдаются схожие тенденции зависимости концентрации от дозы облучения и от времени хранения (рис. 1).

Как видно из рис. 1, наблюдался спад концентрации для контрольных необлученных образцов курицы и для облученных в дозе 0.25 кГр, с увеличением времени хранения. При облучении мяса курицы в диапазоне доз от 0.5 кГр до 20 кГр происходило увеличение концентрации альдегидов на 1-5 сутки наблюдения, в течение оставшихся 10 суток наблюдался спад их концентраций. При этом установлено, что максимальное значение концентрации большинства альдегидов в облученных образцах наблюдалось на 4-ые сутки хранения, что является предельно допустимым сроком годности охлажденной куриной продукции, согласно рекомендациям ГОСТ 31962-2013. Также можно отметить, что для всех облученных образцов концентрация альдегидов лежала выше контрольных значений на протяжении всего времени хранения.

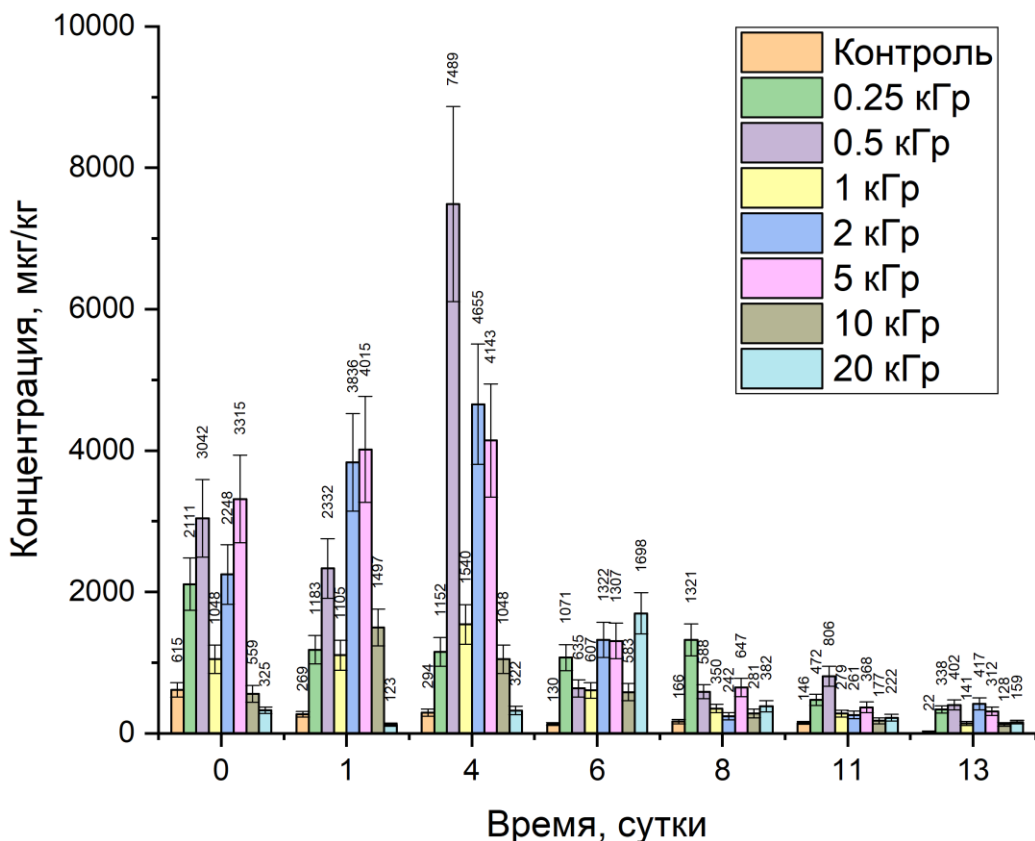


Рисунок 1. Зависимость суммарной концентрации альдегидов, идентифицированных в контрольных и облученных в дозах 0.25–20 кГр образцах мяса курицы, от времени хранения

Исходя из полученных результатов, можно рассматривать идентифицируемые альдегиды в качестве потенциальных маркеров радиационной обработки охлажденного мяса курицы в течение первых 4 суток после ее обработки в дозах свыше 0.5 кГр.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Черняев А.П. и др. // ЯФ. 2019. Т. 82. № 5. С. 425–439.
2. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В. и др. // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 26–28 сентября 2018 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 32–35.

3. Statement Summarizing the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. European Food Safety Authority. EFSA Journal. 2011. Vol. 9. № 4(2107). 57 p.

4. Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегирев А.С. и др. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 4. С. 40–50.

5. Bliznyuk U., Avdyukhina V., Borshchegovskaya P. et al. // Scientific reports. 2022. Vol. 12. № 1. P. 750.

6. Guo H., Feng T., Qi W. et al. // J. Food Sci. 2021. Vol. 86(1). P. 184–193.

7. Zheng Q., Wang H., Yue L. et al. // Radiation Physics and Chemistry 2022. Vol. 191. P. 109851.

8. Bak K.H., Rankin S., Richards M.P. // International Journal of Food Science & Technology. 2020.

9. Feng X., Moon S.H., Lee H.Y., Ahn D.U. // Radiation Physics and Chemistry. 2017. Vol. 130. P. 40–46.

INFLUENCE OF ACCELERATED ELECTRONS ON THE CONTENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN CHICKEN MEAT DURING TWO WEEKS OF STORAGE

Ipatova V.S.^{1a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Bolotnik T.A.³, Rodin I.A.^{3,4}, Khmelevsky O.Yu.², Chernyaev A.P.^{1,2}, Yurov D.C.¹

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³ Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, Russian Federation

⁴ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, Moscow, Russian Federation

The amount of volatile organic compounds in chilled chicken meat was examined after two weeks of storage after 1 MeV electron irradiation at a UELR-1-25-T-001 accelerator in the dose range of 0.25 kGy to 20 kGy. Volatile organic compounds, such as aldehydes hexanal, heptanal, and pentanal, which are responsible for the formation of specific odors in chilled poultry meat after irradiation, were identified in all product samples. It was found that the concentration of aldehydes in control samples and the samples irradiated with 0.25 kGy declines with the storage time; the aldehyde concentrations in 0.5-10 kGy increased during the first five days of monitoring and then decreased over the next 10 days.

Keywords: radiation treatment, chicken, accelerated electrons, volatile organic compounds, aldehydes

УДК 619:616-001.28/29

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ АНТИТЕЛЬНОГО ВАРИАНТА ДИАГНОСТИКУМА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ БЕНТОНИТА

Камалова З.Р., Нефедова Р.В., Гайнуллин Р.Р., Низамов Р.Н.

ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности»

г. Казань, Научный городок-2, Российская Федерация

e-mail: vnivi@mail.ru

В данной статье показан способ усовершенствования технологии получения бентонитового диагностикума с целью индикации радиоиндуцированных продуктов радиолиты в организме облученных животных. Был получен экспериментальный вариант диагностикума на основе высокодисперсных частиц бентонита Хакасского происхождения, который обеспечивал обнаружение титров радиотоксина, достигая максимума – 10,0 log₂.

Ключевые слова: диагностикум, конструирование, высокодисперсные частицы, параметры сенсibilизации, реакция бентонитовой флокуляции (РБФ)

Введение

Известно, что проведение любого высокочувствительного иммунохимического анализа (иммунолюминисцентного, иммуноферментного, серологического и других) предполагает наличие высокоспецифических диагностикумов, изготовление которых сопряжено значительными технологическими трудностями [1 – 5].

Одним из наиболее серьезных препятствий при этом является трудность получения высокоспецифичных антител и антигенов, изолирование и получение

которых требует высокой очистки с использованием многоступенчатых технологических стадий и этапов, дефицитных реактивов и материальных затрат. С целью преодоления перечисленных технологических трудностей при изготовлении вышеназванных диагностикумов нами предпринята попытка усовершенствования методов индикации хиноидных радиотоксинов в организме облученных животных.

Сегодня во всем мире нанотехнологии признаны закономерным этапом научно-технического прогресса, движущей силой науки и техники XXI века [6, 7].

Важнейшей составной частью нанотехнологии являются наноматериалы – материалы, разработанные на основе наночастиц размером от 1 до 100 нм, обладающие уникальными характеристиками.

Технология получения бентонитового диагностикума предполагает выполнение 3 стадий: 1) сенсibilизация частиц бентонита (иммуносорбента); 2) получение комплекса «иммуносорбент – иммуноглобулин (сенситин)»; мечение комплекса «сенсibilизированные микрочастицы бентонита – специфический иммуноглобулин».

Одним из наиболее значимых факторов влияния на чувствительность РБФ является соотношение компонентов в разрабатываемом диагностикуме, при котором происходит наиболее полное взаимодействие иммуносорбента (частиц бентонита) и сенситина (специфических глобулинов) [8].

Вторым важным фактором, влияющим на активность и чувствительность комплекса сенситин – иммуносорбент (диагностикум), является температура сенсibilизации [9– 11].

Третьим важнейшим параметром эффективной сенсibilизации является фактор времени сенсibilизации иммуносорбента и сенситина [12].

Следовательно, существует множество факторов (концентрация сенситина, температура среды контактирования компонентов, длительность контакта сенситина и иммуносорбента), обеспечивающих оптимальное взаимодействие сенситина и иммуносорбента.

Целью работы являлось повышение чувствительности иммунохимической реакции путём отработки технологии конструирования бентонитового диагностикума.

Материалы и методы

В качестве потенциальных иммуносорбентов при конструировании бентонитового диагностикума использовали активированные образцы бентонитов [13] Хакасского происхождения («Десятый хутор») размерами частиц 75–85 нм.

Для конструирования вариантов бентонитовых диагностикумов нами были использованы отработанные ранее методические приемы и параметры (режимы) сенсibilизации микрочастиц (концентрация, температура, время, соотношение компонентов «бентонит-сенситин», объем индикатора реакции – метиленовой сини). Готовили водную суспензию дисперсных частиц бентонита с различной концентрацией, различные соотношения «бентонит-глобулин», выдерживали в термостате при разных температурах и в течение разного времени и различные концентрации метиленовой сини. Проводили сенсibilизацию (нагружение) иммуносорбента (активированных частиц бентонита) (компонент I) сенситином (специфическими антирадиотоксическими иммуноглобулинами, полученными из антирадиотоксической сыворотки овец, гипериммунизированных радиоантигеном – хиноидным радиотоксином) (компонент II).

Определение оптимальной концентрации метки (метиленовой сини) и оптимального объема индикаторного компонента осуществляли визуально путем постановки экспериментальных реакций бентонитовой флокуляции, при которых наблюдались максимальный титр антигена.

Суспензию бентонита (иммуносорбент – компонент I) смешивали с компонентом II – антителами (глобулинами) гипериммунной антирадиотоксической сыворотки (сенситин – компонент II) в соотношении 3:7 (3 мл бентонитовой суспензии и 7 мл специфических глобулинов) и проводили сенсibilизацию в термостате при температуре 30 °С в течение 30 мин. По истечении указанной экспозиции смесь «бентонит (иммуносорбент) – сенситин (специфические иммуноглобулины)» центрифугировали при 3000 об/мин в течение 7 мин, затем супернатант (надосадочную жидкость) декантировали. Полученный осадок (центрифугат) дважды отмывали в 10 мл дистиллированной воды центрифугированием в вышеуказанных режимах, декантируя супернатант. Полученный осадок сенсibilизированных частиц бентонита ресуспендировали в 3,5 мл дистиллированной воды.

В последующем проводили мечение иммунологического комплекса «бентонит – глобулин» с целью максимальной визуализации в РБФ. В качестве метки использовали специальный индикаторный краситель – метиленовую синь.

Результаты исследований

Установленные ранее проведенными исследованиями (с использованием микрочастиц бентонита) параметры (оптимальное соотношение сенситина и иммуносорбента 0,3:0,7, температура сенсibilизации – 30 °С, время сенсibilизации – 30 мин) и использованные при изготовлении экспериментального варианта бентонитового диагностикума аналогично обеспечивали обнаружение титров радиотоксина, достигая максимума – $10,0 \log_2$, тогда как использование в диагностикуме микрочастиц бентонита обеспечивает обнаружение максимального титра радиотоксинов – $8,0 \log_2$.

Оптимальной концентрацией индикаторного компонента – метиленовой сини в комплексе «иммуносорбент – сенситин» является 0,1%-ный раствор метиленовой сини, которая обеспечивает нормальное восприятие РБФ и позволяет объективно оценивать результаты постановки тест-системы, четко демонстрируя начало и конец результата реакции и свидетельствуя о наличии или отсутствии искомого агента – радиотоксина в исследуемой пробе. Параллельное определение оптимального объема индикаторного компонента – раствора метиленовой сини показало, что внесение в металлоглобулиновый комплекс (бентонит – иммуноглобулины) индикатора в количестве 0,7 мл обеспечивает максимальный титр радиотоксина ($8,0 \log_2$).

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований нами получен экспериментальный образец антительного диагностикума на основе высокодисперсных частиц для индикации радиоиндуцированных токсических продуктов радиолитиза в организме облученных животных с помощью РФФ.

Сконструированный вариант диагностикума в дальнейшем будет испытан на иммунологическую активность и специфичность в РФФ и в случае положительного результата будет заявлен в качестве экспресс-теста для обнаружения радиоиндуцированных токсических продуктов радиолитиза в организме больных острой лучевой болезнью животных, а также отслеживания за динамикой изменения концентраций токсических соединений на всех этапах развития болезни и в конечном счёте получения важнейшей информации о начале, развитии и завершении лучевого поражения, т.е. проведения иммуномониторинга радиационного поражения.

Полученные нами результаты свидетельствуют о перспективности использования в технологии получения диагностического препарата высокодисперсных частиц алюмосиликата. В то же время считаем необходимым проведение дальнейших научных исследований, направленных на изучение и технологических параметров его изготовления. Считаем, что изменение параметров позволит получить диагностические титры, превышающие $10 \log_2$.

Список литературы

1. Лещук С. И., Зарубин М. В., Власенко Е. В. Модификация эритроцитарной диагностической системы для оценки популяционного иммунитета к вирусу гепатита В // Актуальные проблемы права, экономики и управления. 2015. Вып. XI. С. 300–302.
2. Курбангалеев Я. М., Низамов Р. Н., Конюхов Г. В. и др. Использование радиационных технологий для удлинения сроков хранения продуктов и кормов // Ветеринарный врач. 2016. № 3. С. 9–14.
3. Волкова Екатерина Владимировна Создание диагностических тест-систем с использованием полимерных микросфер // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. Москва. 2014. 27 стр.
4. Кретенчук О. Ф. Отечественные средства диагностики особо опасных инфекций на основе

моноклональных антител // Проблемы особо опасных инфекций. 2021. 4. С. 35–45.

5. Агаева Э. М., Зейналова Ш. К., Нариманов В. А. Инновационные методы молекулярной диагностики в медицине // Биомедицина. 2015. № 2. С. 16–19.

6. Юданова Л. А., Дубков Д. А. Генезис инновационной мысли и роль инноваций в развитии хозяйствующего субъекта и общества // Конкурентоспособность регионов. Новая геоэкономическая реальность. Сборник статей II Международной научно-практической конференции. Псков. 2016. С. 264–271.

7. Губанов С. С. Неоиндустриальная парадигма развития: основы и значение новая индустриализация России: стратегические приоритеты страны и возможности Урала. Екатеринбург. 2018. С. 27–61.

8. Вафин Ф. Р., Гайнуллин Р. Р., Калимуллин Ф. Х. и др. Индикация продуктов радиолитиза в облучённом зерне с помощью реакции бентонитовой флокуляции // Ветеринарный врач. 2021. № 2. С. 12–15.

9. Shubin G. G., Larionova L. V., Karbyshev G. I. et al. Design and Trials of an Antigenic Polymeric Diagnostic Kit for Listoriosis Detection // Biotechnology in Russia. 2009. No.3. pp. 116–122. Translated from Biotechnology, 2009, no. 3, pp 91–95.

10. Наркевич А. Н., Шелохович А. И., Терентьев А. Н. и др. Способ конструирования полимерного иммуноглобулинового диагностикума для выявления Legionella Pneumophila 1,3 и 6 серогрупп (варианты) // Патент на изобретение RU 2505819 С1. 2014.

11. Жарникова И. В., Кошкидько А. Г., Курчева С. А. и др. Способ приготовления эритроцитарного диагностикума иммуноглобулинового туляремийного патента на изобретение. Номер патента: RU 2747420 С1. 2021.

12. Жарникова И. В., Жданова Е. В., Жарникова Т. В. и др. Сравнительная характеристика биотехнологии получения эритроцитарных и латексных диагностикумов для выявления возбудителя туляремии // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. ю.а. овчинникова. 2019. Т.15. № 4. С. 27–31.

13. Гайнуллин Р. Р., Хантимеров С. М., Низамов Р. Н. и др. Получение наноразмерного бентонита и перспектива его использования с целью конструирования диагностикума для индикации радиоиндуцированных токсических соединений // Сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции «Нанотехнологии: Образование, наука, инновации». 2020. Курск. С. 40–41.

STUDY OF CONSTRUCTING TECHNOLOGY AN ANTIBODY VARIANT OF A DIAGNOSTICUM BASED ON HIGHLY DISPERSED PARTICLES OF BENTONITE

Kamalova Z.R., Nefedova R.V., Gainullin R.R., Nizamov R.N.

This article shows a method for improving the technology for obtaining bentonite diagnosticum in order to indicate radiolysis products in the body of irradiated animals. An experimental version of the diagnosticum was obtained based on finely dispersed particles of bentonite of Khakas origin, which ensured the detection of radiotoxin titers, reaching a maximum of $10.0 \log_2$.

Keywords: *diagnosticum, constructing, highly dispersed particles, sensitization parameters, bentonite flocculation reaction (RBF)*

Introduction. It is known that the conduct of any highly sensitive immunochemical analysis (immunoluminescent, enzyme immunoassay, serological, and others) implies the presence of highly specific diagnostics, the manufacture of which is associated with significant technological difficulties.

Today, all over the world, nanotechnologies are recognized as a natural stage of scientific and technological progress, the driving force behind science and technology in the 21st century.

There are many factors (sensitin concentration, temperature of the contact medium of the components, duration of contact between sensitin and immunosorbent) that ensure optimal interaction between sensitin and immunosorbent.

The aim of the work was to increase the sensitivity of the immunochemical reaction by developing the technology for constructing a bentonite diagnosticum.

Materials and methods. To constructing variants of bentonite diagnosticums, we used previously worked out methodological techniques and parameters (modes) of microparticle sensitization (concentration, temperature, time, ratio of bentonite-sensitin

components, the volume of the reaction indicator - methylene blue).

A suspension of bentonite (immunosorbent - component I) was mixed with component II - antibodies (globulins) of hyperimmune antiradiotoxic serum (sensitin - component II) in a ratio of 3:7 (3 ml of bentonite suspension and 7 ml of specific globulins) and sensitization was carried out in a thermostat at a temperature of 30°C for 30 min.

Research results. The parameters established by earlier studies (using bentonite microparticles) (optimal ratio of sensitin and immunosorbent 0.3:0.7, sensitization temperature - 30°C , sensitization time - 30 min) and used in the manufacture of an experimental version of the bentonite diagnosticum similarly ensured the detection of radiotoxin titers, reaching a maximum of $10.0 \log_2$, while the use of bentonite microparticles in the diagnosticum ensures the detection of the maximum titer of radiotoxins - $8.0 \log_2$.

Conclusion. As a result of the research, we obtained an experimental sample of an antibody diagnosticum based on highly dispersed particles for the indication of radioinduced toxic radiolysis products in the body of irradiated animals using RBF.

УДК 539.1.04

ПОЛУЧЕНИЕ ЗАСУХОУСТОЙЧИВОГО СОРТА КУЛЬТУРЫ РИСА В РЕЗУЛЬТАТЕ МУТАГЕНЕЗА, ИНДУЦИРОВАННОГО НЕЙТРОНАМИ, СГЕНЕРИРОВАННЫМИ НА УСТАНОВКЕ ЭГ-5 В ОИЯИ

Кругляк А.И.¹, Алексеёнок Ю.В.¹, Дорошкевич А.С.¹, Аппазов Н.О.², Бакирулы К.Б.³, Мезенцева Ж.В.¹, Ильина М.Н.^{1,4}

¹Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория нейтронной физики им. Франка, Дубна, Российская Федерация

²Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Республика Казахстан

³Казахский научно-исследовательский институт риса им. И. Жахаева, Кызылорда, Республика Казахстан

⁴Дубненский университет, Дубна, Россия

e-mail: Anastasiya.Kruglyak@nfjinr.ru, beataa@gmail.com

Рис (*Oryza sativa* L.) является основной продовольственной культурой для половины населения земного шара, которое в ближайшие 30 лет может увеличиться еще на 3 миллиарда [1]. Использование радиационно-индуцированного мутагенеза позволяет решить одновременно проблемы засухи, засоления почвы и возрастания спроса, помогая выводить новые сорта растений с необходимыми свойствами. Механизмы воздействия нейтронов на биологические объекты изучены слабо, поэтому данная работа направлена на исследование воздействия

нейтронного облучения на семена риса с целью в дальнейшем получить новые сорта популярной сельскохозяйственной культуры с заданными параметрами.

Ключевые слова: мутагенез, рис, радиационно-индуцированный мутагенез, нейтронное воздействие, засухоустойчивость, селекция риса

Благодаря относительной простоте генома [2], рис представляет собой ключевую модель для изучения геномики агроэкосистем. Таким образом, основываясь на фундаментальных знаниях о геноме риса, можно в будущем производить достаточное количество продовольствия, что удовлетворит запросы возрастающего населения планеты.

Важно учитывать, что одного увеличения продукции недостаточно, требуется дополнительно подумать и о сохранении текущего положения дел в возрастающем влиянии неблагоприятных условий. По прогнозу, ежегодно приблизительно 10 млн га сельскохозяйственных угодий будут теряться вследствие засоления [3], которое связано с постепенным подъемом уровня моря [4].

Одной из стратегий генетического улучшения риса является использование радиационно-индуцированного мутагенеза для поиска образцов, пригодных для произрастания в неблагоприятных условиях, таких как засуха и засоление [5].

При этом, создавая устойчивый к вышеуказанным неблагоприятным факторам образец, одновременно создается объединение генов, повышающих общую приспособляемость растения [6].

Механизмы воздействия нейтронов на биологические объекты слабо изучены, но, согласно [2], могут быть использованы для создания новых сортов, поскольку в ряде исследований были изменены гены, отвечающие за агрономически важные признаки.

Первая стадия нашего исследования состояла в облучении семян риса нескольких сортов нейтронами с энергией 4.1 МэВ, доза составила 50 Гр. Облучение проводилось с помощью электростатического генератора ЭГ-5 в ЛНФ ОИЯИ, образцы риса переданы Казахским НИИ рисоводства им. И. Жахаева.

Климат Кызылординской области резко континентальный, засушливый, засоление хлоридно-сульфатное [7]. Место проведения исследований – экспериментальный участок ТОО «Казахский НИИ рисоводства им. И. Жахаева» в Республике Казахстан.

На рис. 1 отображена часть полученных после облучения образцов, которые являются мутантными. В дальнейшем в данной серии исследований дополнительно планируется реализация наблюдения результата мутагенеза *in vitro*, что согласно исследованию [8] уменьшает количество химер и позволяет сократить время на отбор желаемых признаков.



Рисунок 1. Мутантные образцы на испытательном участке после облучения нейтронами в дозе 50 Гр, полученными на установке ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ г. Дубна, где рис. а отображает пустозерность – зеленые рисовые зерна не содержат семян риса, а рис. б – отставание в сроках созревания (сверху сорт Сыр-Сылуы контроль, снизу облученные образцы).

Acknowledgments. The study was performed in the scope of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan project number BR10765056 and within the framework Poland-JINR cooperation Projects PPPB/168-26/1128/2021, PPPB/120-25/1128/2022, PPPB/120-26/1128/2022, Serbia - JINR cooperation Projects № 178 2021 items 7 and 8.

Список литературы

1. Wing R.A., Purugganan M.D., Zhang Q. The rice genome revolution: from an ancient grain to Green Super Rice // *Nat Rev Genet.* 2018. № 19. P. 505-517.

2. Viana V.E., Pegoraro C., Busanello C., Costa de Oliveira A. Mutagenesis in Rice: The Basis for Breeding a New Super Plant // *Frontiers in Plant Science.* 2019. № 10.1326.

3. Grattan S.R., Zeng L., Shannon M.C., Roberts S.R. Rice is more sensitive to salinity than previously thought // *Cal. Agric.* 2002. V. 56: P. 189–195.

4. Ren Z.H., Gao J.P., Li L.G. et al. A rice quantitative trait locus for salt tolerance encodes a sodium transporter // *Nature Genet.* 2005. V. 37: P. 1141–1146.

5. Abdelnour-Esquivel A., Perez J., Rojas M. et al. Use of Gamma Radiation to Induce Mutations in Rice (*Oryza sativa* L.) and the selection of lines with tolerance to salinity and drought // *In Vitro Cell. Dev. Biol.* 2020. № 56. P. 88-97.

6. Kharitonov E. M., Goncharov Y. K., Maliuchenko E. A. The genetics of the traits determining adaptability to abiotic stress in rice (*Oryza sativa* L.) // *Environmental genetics.* 2015. V.13: P. 37-54.

7. Tokhetova L. A. Promising samples of barley and oats for cultivation on saline soils of the Kyzylorda area // *Molodoj uchenyj.* 2014. № 1.2 (60.2). P. 31-34.

8. Hernandez Soto Perez A. J., Fait Zuniga R., Rojas Vasquez R. et al. Temporary Immersion System Improves Regeneration of In Vitro Irradiated Recalcitrant Indica Rice (*Oryza Sativa* L.) Embryogenic Calli // *Plants (Basel).* 2022. V. 11 (3): P. 375.

OBTAINING A DROUGH-RESISTANT RICE VARIETY AS A RESULT OF MUTAGENESIS INDUCED BY NEUTRONS GENERATED AT THE EG-5 FACILITY IN JINR

Kruglyak A.I.¹, Aleksiyenak Yu. V.¹, Doroshkevich A.S.¹, Appazov N.O.², Bakiruly K.B.³

¹ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

² Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

³ Kazakh Research Institute of Rice named after I. Zhakhaev, Kyzylorda, Kazakhstan

⁴ Dubna University, Dubna, Russian Federation

Rice (*Oryza sativa* L.) is the main food crop for half of the world's population, which could increase by another 3 billion in the next 30 years [1]. Approximately 10 million hectares of agricultural land will be withdrawn from agricultural use each year due to salinization [3] associated with gradual rise of the sea level [4]. One strategy for the genetic improvement of rice is to use radiation-induced mutagenesis to find samples suitable for growing under unfavorable conditions such as drought and salinity [5]. The aim of our research is to find out influence of neutron irradiation on the rice growing. The first stage of our study was to irradiate rice seeds of different varieties with neutrons with E=4.1 MeV to obtain dose of 50 Gy. Irradiation was conducted at the electrostatic generator EG-5 in the FLNP, JINR. Rice was provided by the Zhakhaev Kazakh Rice Research Institute. Preliminary results showed that neutron irradiation leads to the mutant plants with signs of empty grains and delays in maturation. In the future, in this series of studies, it is additionally planned to implement the observation of the result of *in vitro* mutagenesis, which, according to study [8], reduces the number of chimeras and reduces the time for selecting the desired traits.

Keywords: *mutagenesis, rice, radiation-induced mutagenesis, neutron irradiation, drought resistance, rice breeding*

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АЛЬФА-, БЕТА- И ГАММА-ГХЦГ В СОСТАВЕ ПЕСТИЦИДНОГО ПРЕПАРАТА «ГЕКСАХЛОРАН ДУСТ»

Маркова М.В., Мельникова Т.В., Полякова Л.П.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040 Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д.1, Российская Федерация
e-mail: markovamv@oiate.ru

Проведено исследование радиационной устойчивости изомеров ГХЦГ в составе пестицидного препарата «Гексахлоран дуст» в аммиачно-буферном растворе, в виде сухого и обводненного дуста к воздействию электронного облучения в линейке возрастающих доз 10–700 кГр.

Ключевые слова: хлорорганические пестициды, стойкие органические загрязнители, дуст гексахлорана, степень разложения, электронное облучение, радиационная устойчивость, утилизация пестицидов

Анализ экспериментальных данных, полученных в 2019-2021 годах, показал, что для более точного определения концентраций изомеров пестицидов до и после облучения необходимо изменить условия пробподготовки, а именно подобрать новые пропорции для разбавления и расширить диапазон измеряемых концентраций [1]. В связи с этим было принято решение провести повторный анализ полученных ранее экстрактов с учетом новых условий пробподготовки.

Целью настоящей работы являлось исследование радиационно-химической устойчивости альфа-, бета- и гамма-ГХЦГ в составе пестицидного препарата «Гексахлоран дуст».

Объектом исследования являлись α -, β - и γ - изомеры ГХЦГ в составе пестицидного препарата «Гексахлоран дуст», находящегося в виде трех гетерогенных систем – сухого порошка, обводненного дуста и аммиачно-буферной суспензии.

Были исследованы три серии образцов:

Серия А - эксперимент 2019 года [1];

Серия Б – эксперимент 2021 года (приготовленный аналит разбавлялся в 1000 раз);

Серия В – образцы серии Б анализировались с учетом нового разбавления, а именно в 500 раз.

Облучение образцов серии А и серии Б проводилось в Центре обработки продуктов растительного и животного происхождения «Теклеор» на линейном ускорителе электронов УЭЛР 10-15-С с энергией 10 МэВ в линейке возрастающих доз от 10 до 700 кГр.

Анализ приготовленных экстрактов выполнялся газохроматографическим методом на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2», согласно методике [2].

В ходе исследования были определены концентрации изомеров ГХЦГ в аммиачно-буферном суспензии и в сухом порошке пестицидного препарата для серии В, т.е. в условиях нового разбавления экстракта в 500 раз. При определении всех концентраций площади пиков сместились ближе к центру градуировочной прямой.

На приведенных на рисунке 1 графиках, показывающих зависимость степени разложения изомеров ГХЦГ от поглощенной дозы наглядно видно, что для альфа- и бета- изомеров присутствуют заметные, особенно для аммиачно-буферной суспензии, отклонения от предполагаемой динамики непрерывного роста. Предположительно это связано с тем, что в ходе радиолиза альфа- и бета-изомеры ГХЦГ не только разлагаются, но и образуются в реакциях изомеризации альфа- и гамма- ГХЦГ.

В связи с тем, что для гамма-изомера ГХЦГ при увеличении поглощенной дозы облучения наблюдается постоянный рост степени разложения, анализ кинетики радиационного разложения был выполнен только для этого пестицида. По графику зависимости процентной концентрации от времени облучения невозможно точно определить характер зависимости, поэтому были построены графики зависимости логарифма процентной концентрации от времени облучения, приведенные на рисунках 2 и 3.

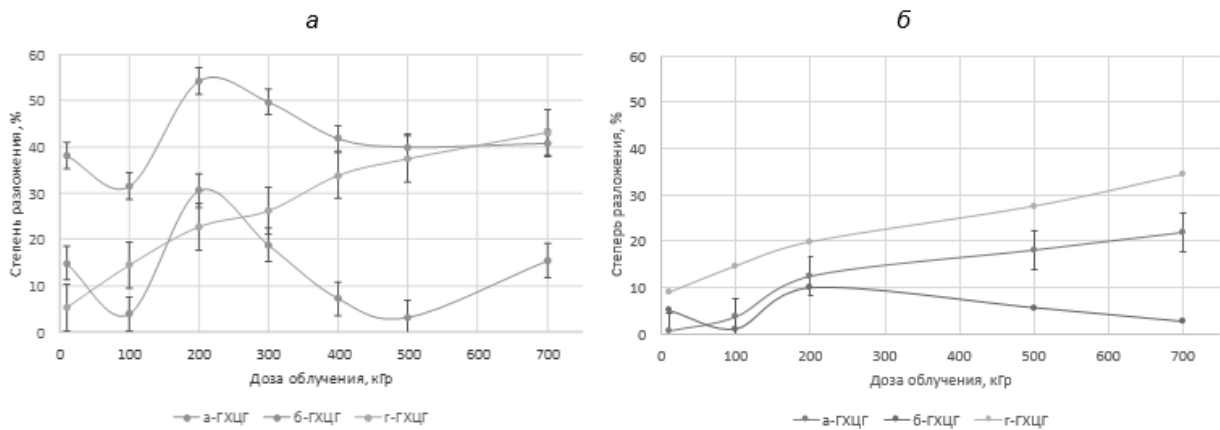


Рисунок 1. Зависимость степени разложения изомеров ГХЦГ в составе аммиачно-буферной суспензии (а) и сухого порошка (б) от дозы облучения для образцов серии В

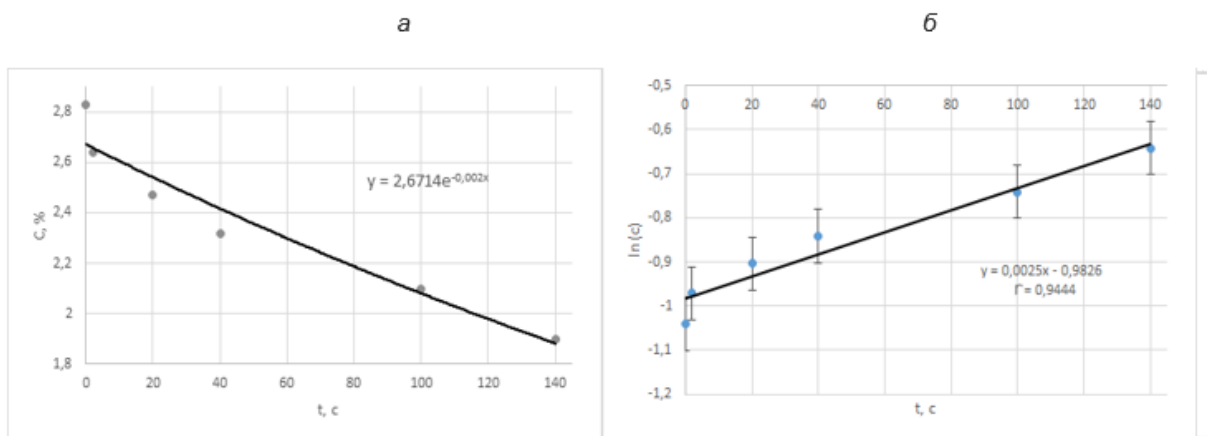


Рисунок 2. Зависимость процентной концентрации γ -ГХЦГ (а) и логарифма концентрации γ -ГХЦГ (б) от времени облучения для сухого дуста серии В

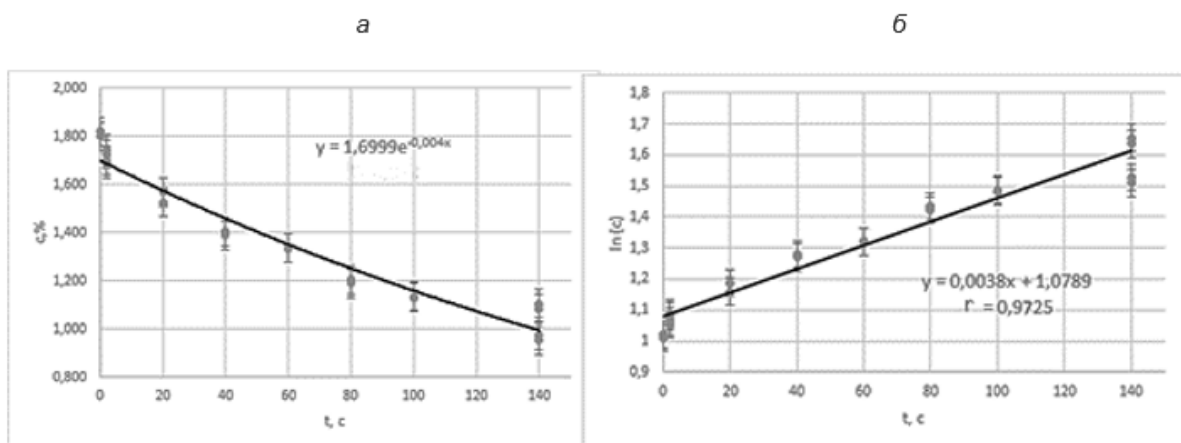


Рисунок 3. Зависимость процентной концентрации γ -ГХЦГ (а) и логарифма концентрации γ -ГХЦГ (б) от времени облучения для аммиачно-буферной суспензии серии В

Полученная зависимость логарифма концентрации от времени облучения является линейной, следовательно, реакция разложения гамма-ГХЦГ может быть описана уравнением реакции первого порядка. Из уравнений, описывающих зависимость логарифма концентрации гамма-ГХЦГ от времени облучения,

были получены константы скорости реакции и время полу разложения для каждого образца.

Используя полученные кинетические параметры, на примере аммиачно-буферной суспензии, была рассчитана доза облучения, необходимая для разложения 90 % гамма-ГХЦГ. Полученное значение в два

раза превышает максимальную поглощенную дозу при данном эксперименте и может быть реализовано в будущем.

Список литературы

1. Мелешко, А.Ю. и др. Влияние электронного и гамма-облучения на деструкцию действующего

вещества препарата «гексахлоран дуст» // Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2019. 2019. № 1. С. 3–5.

2. Методы определения микроколичеств пестицидов в продуктах питания и внешней среде. 2 т. М.: Агропромиздат, 1992.

STUDY OF THE RADIATION-CHEMICAL STABILITY OF ALPHA-, BETA- AND GAMMA-HCCH IN THE COMPOSITION OF THE PESTICIDE PREPARATION "HEXACHLORANE DUST"

Markova M.V., Melnikova T.V., Polyakova L.P.

Obninsk Institute of Atomic Energy (IATE) of the National Research Nuclear University (NRNU) "MEPhI", Russian Federation

Research was made of the radiation stability of HCH isomers in the composition of the pesticide "Hexachlorane dust" in an ammonia buffer solution, in the form of dry and watered dust of hexachlorane, under effect of electron beam in the range of increasing doses of 10-700 kGy.

Keywords: *organochlorinated pesticides, persistent organic pollutants, hexachlorane dust, degradation degree, electron beam, radiation stability, pesticide disposal*

UDC 543.429.22:577.334

INVESTIGATION OF DRIED APPLE SAMPLES FOR IDENTIFICATION OF RADIATION TREATMENT BY EPR METHOD

Medzhidov I.M., Polyakova I.V., Gorbатов S.A., Shishko V.I., Gluchshenko N.V., Tkhorik. O.V., Basyrova D.V., Petrukhina D.I., Kharlamov V.A.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology
249032 Kievskoe shosse 109 km, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation
e-mail: immedzhidov@mail.ru*

Gamma irradiation of dried apple samples leads to the formation of free radicals. The possibility of identifying the fact of irradiation and determining the absorbed dose using a spectrometer based on electron paramagnetic resonance has been revealed. A linear increase in signal intensity is observed within doses from 0 to 5 kGy. Over 5 kGy, a slight increase in signal intensity was registered, which is associated with the "saturation" effect. The attenuation of the signal intensity of all samples over time to the control values was revealed. Identification of the fact of irradiation after 14 months is impossible.

Keywords: *EPR spectrometry, free radicals, absorbed dose, dried apple*

Introduction

Recently, much attention has been paid to using ionizing radiation for disinfection and improving the quality of food storage [1-4]. The safety and control of the radiation treatment process is an integral part of food processing, as overexposure can lead to the unsuitability of the product (CODEX STAN 106–1983, Rev. 1–2003). Direct absorption of radiation energy by food

molecules leads to the formation of free radicals, which can later decay or recombine with other particles, leading to the formation of long-lived radicals.

One method for detecting and monitoring free radicals is electron paramagnetic resonance (EPR) spectrometry. EPR spectrometry is the best method for directly detecting transition metal ions and free radicals. This method is regulated by various Russian (GOST R 52529–2006, GOST 31652–2012, GOST 31672–2012,

etc.) and European (European Standard EN 1787:2000, European Standard EN 13708:2001, etc.) normative documents. The standards define the requirements for sample preparation, measurement conditions and unambiguous identification of irradiated food products.

In previous studies, EPR spectrometry was carried out on black pepper, where an increase in signal intensity was detected when irradiated with a dose of 6 kGy [5]. This work is devoted to identifying the fact of irradiation and the signal decay kinetics of dried apples.

Materials and methods

For the EPR investigations, dried apples from the local supermarket were used. Dried apple samples were packaged in Eppendorf-type polypropylene tubes and irradiated at the GUR-120 gamma installation (Obninsk, RIRAE) with a ^{60}Co source at room temperature in doses from 0.3 to 10 kGy. The dose rate was 3834 Gy/h. The amount of absorbed dose was determined using a universal dosimeter "DKS-101". Non-irradiated samples were used as a control. After irradiation, the samples were kept at room temperature without access to sunlight for 60 minutes, ground using a shredder from the "Kitfort" company, and sent for EPR spectrum registration. Repeat spectrometry was performed 14 months

later. All this time, the tubes with samples were stored in a closed dark room.

EPR spectra were recorded using an ESR70-03 XD/2 spectrometer (Minsk, Belarus) on the microwave band X, equivalent to a microwave frequency of 9.5 GHz. 100 mg of the substance was taken from each sample and placed in a unique quartz tube (\varnothing : 4 mm) designed for spectrometry.

The EPR spectrometer settings during measurements were as follows:

- middle of the field – 3350 Oe;
- field range – 1000 Oe;
- modulation frequency – 100 kHz;
- modulation – 5 Oe;
- microwave power – 20 mW;
- gain factor – 10;
- spectrum registration time – 100 sec;
- number of re-registrations – 5.

Results and discussion

The study was conducted by recording EPR spectra of dried apple samples irradiated at doses from 0.3 to 10 kGy. Spectrometry was performed 1 hour after irradiation. The results are shown in Figure 1.

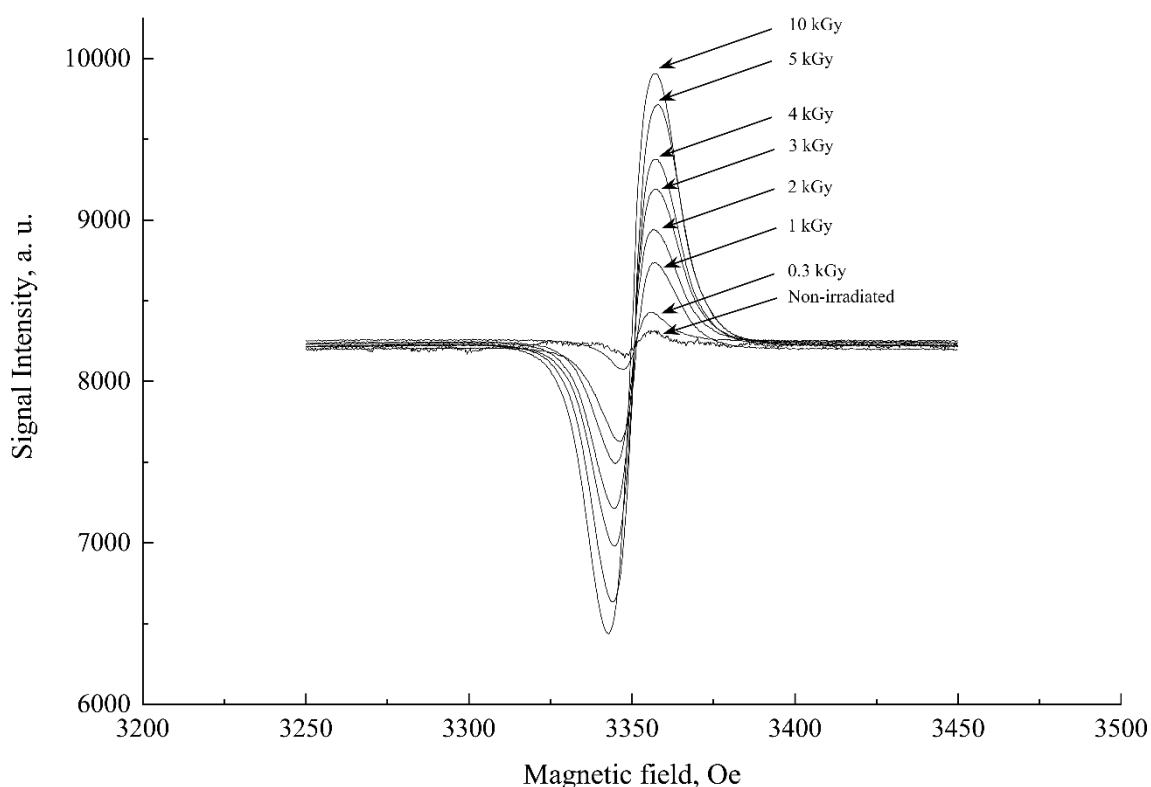


Fig. 1. EPR spectra of dried apple samples irradiated at doses from 0.3 to 10 kGy

As can be seen from the presented data, there is an increase in signal intensity with an increase in the radiation dose, which directly makes it possible to identify the irradiation fact of food products. The most

relevant is determining the radiation dose, which is also possible using an EPR spectrometer. To implement this task, we need to have a database of calibration data for each product. However, it is worth noting that

over time, free radicals decay, complicating the task of determining the absorbed dose. Therefore, it is essential to study the kinetics of the decay of free radicals over time. Such studies should be carried out individually for each product since the decay time depends on the product's chemical composition, absorbed dose, storage conditions, etc.

After re-registration after 14 months, a decrease in the signal of all samples to control value was recorded. The EPR spectra of a sample with an irradiation dose of 10 kGy are shown in Figure 2.

Based on the results obtained, the Dose/Intensity dependencies were plotted (Fig. 3).

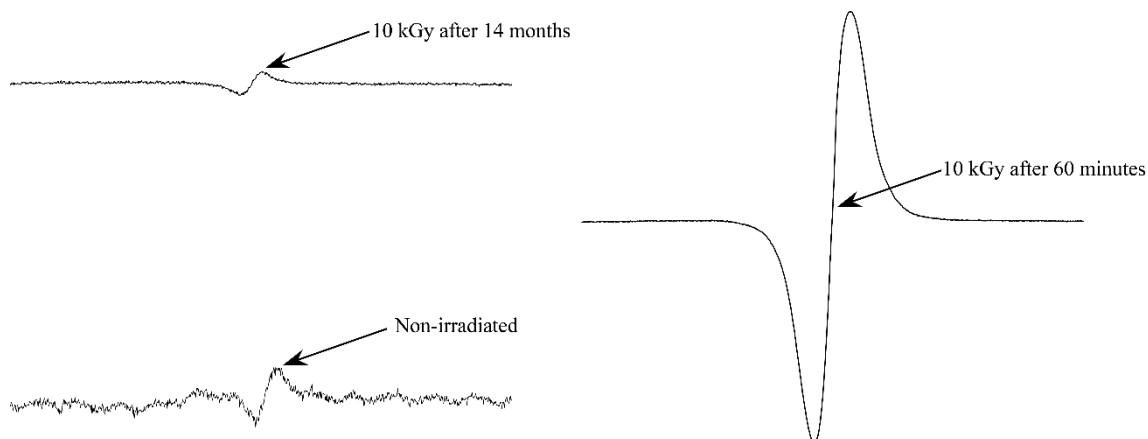


Fig. 2. EPR spectrum of a sample with an irradiation dose of 10 kGy after 60 minutes and 14 months

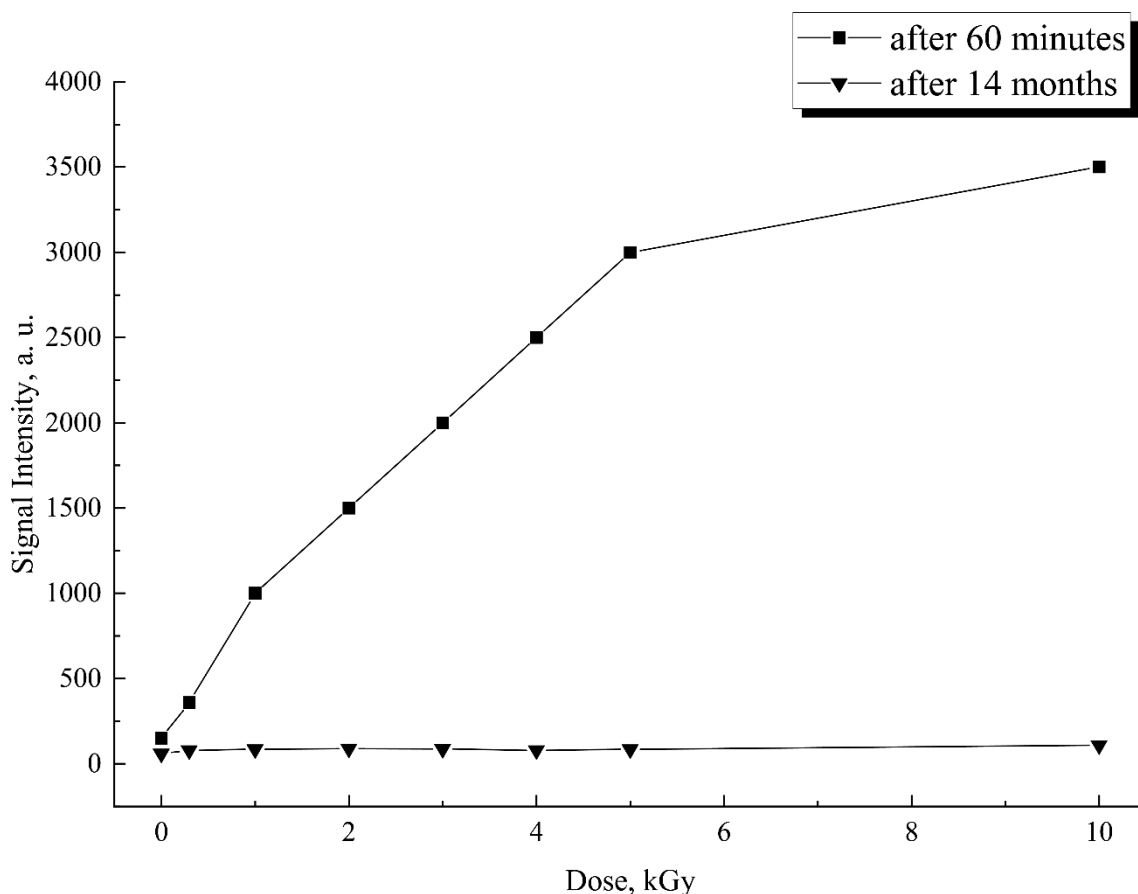


Fig. 3. Dependence of the signal intensity on the absorbed dose

Within doses from 0 to 5 kGy, a linear increase in the intensity of the EPR signal is observed. When the dose is increased to 10 kGy, a slight increase in signal

intensity is observed. This phenomenon is assumed to be associated with the sample's "saturation" effect. After 14 months, the signal intensity decreased to control

values. The decrease in the signal is caused by the decay of free radicals. Dosimetry of dried apple samples 14 months after irradiation is not possible.

Conclusion

This work is devoted to studying the formation of free radicals during the irradiation of dried apple samples by EPR spectrometry. An increase in signal intensity was recorded with an increase in the absorbed dose. Within doses from 0 to 5 kGy, a linear increase in signal intensity is observed. Over 5 kGy, a slight increase in signal intensity was registered, which is associated with the "saturation" effect. After 14 months, the signal intensity decreased to control values. Thus, a dried apple is excellent for identifying the fact of exposure in the first few months. After 14 months, it is impossible to identify the fact of exposure.

References

1. *Follett P.A., Weinert E.D.* Phytosanitary irradiation of fresh tropical commodities in Hawaii: Generic treatments, commercial adoption, and current issues // *Radiat. Phys. Chem.* 2012. Vol. 81. P. 1064–1067.

2. *Handayani M., Permawati H.* Gamma irradiation technology to preservation of foodstuffs as an effort to maintain quality and acquaint the significant role of nuclear on food production to Indonesia society: A Review // *Energy Procedia.* 2017. Vol. 127. P. 302–309.

3. *Ravindran R., Jaiswal A.K.* Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food Chem.* 2019. Vol. 285. P. 363–368.

4. *Feliciano C.P.* High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects // *Radiat. Phys. Chem.* 2018. Vol. 144. P. 34–36.

5. *Меджидов И.М., Харламов В.А., Полякова И.В.* ЭПР-сигнал черного молотого перца, радиационно-обработанного в дозе 6 кГр // V Международная научная конференция "Техногенные системы и экологический риск", Обнинск, 2022. С. 116–118.

УДК 539.1.04

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПОСЕВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЯЧМЕНЯ В ФАЗУ КОЛОШЕНИЯ

Московская К.А., Лой Н.Н., Сулова О.В., Шубина С.И.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: mimiti.po@mail.ru

Изучено влияние различных доз и режимов предпосевного электронного облучения на морфометрические показатели 60-суточных растений ярового ячменя в условиях полевого эксперимента. При воздействии облучения на семена во II режиме наблюдаются достоверные изменения процента влаги в растениях в фазу колошения: при дозе 2 кГр установлено уменьшение данного показателя, при дозах 1 кГр и 4 кГр – увеличение содержания влаги.

Ключевые слова: морфометрические показатели, предпосевное электронное облучение, яровой ячмень, полевой эксперимент, фаза колошения, содержание влаги в растениях

Предпосевное облучение представляет собой процесс, в котором семена растений, с целью улучшения их качества, подвергаются воздействию ионизирующего излучения.

Механизмы формирования ответной реакции на предпосевную обработку различными видами излучения изучены не до конца. Множество исследований было проведено для доказательства стимулирующего действия определенных доз γ -излучения на рост и развитие семян различных культур. На сегодняшний день ядерные технологии позволяют широко использовать не только γ -излучение, но и нейтронные пучки с различными энергиями, а современные ускорители делают возможным получение

различных лучей, которые состоят из электронов, протонов, нейтронов, осколков ядер тяжелых атомов, π -мезонов и др. [1].

В связи с этим целью исследований являлось изучение влияния предпосевного электронного облучения на морфометрические показатели роста и развития ярового ячменя в фазу колошения.

В качестве объекта исследований выбран яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир. Ячмень является главным сырьем как для животноводческой, так и птицеводческой отрасли производства и важным продуктом в питании человека.

Облучение проведено в ИСЭ СО РАН (г. Томск) с помощью электронного ускорителя «Дуэт» с

сетчатым плазменным катодом и выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу [2]. На семена воздействовали дозами 1, 2, 3, 4 и 5,0 кГр в двух режимах - режим I: U=100 кВ, режим II: U=130 кВ, мощность излучения в обоих режимах составляла 100 Гр/имп. Суммарная введенная доза набиралась путем многократного воздействия на зерно электронным пучком.

Семена изучаемого сорта ячменя в количестве 150 шт. на один вариант (дозу) приклеивали между

двух полосок скотча толщиной 50 мкм, что позволяло уложить их в один слой на расстоянии 20 мм от выводящего окна ускорителя. При наборе дозы образец обязательно переворачивали на другую сторону с целью ее выравнивания в каждом семени. Контроль – семена, не подвергшиеся облучению.

Исследование проводили на опытном поле ФГБНУ ВНИИРАЭ в трехкратной повторности на делянках площадью 2 м². Опытные делянки располагали рендомизированным способом (рисунок 1).

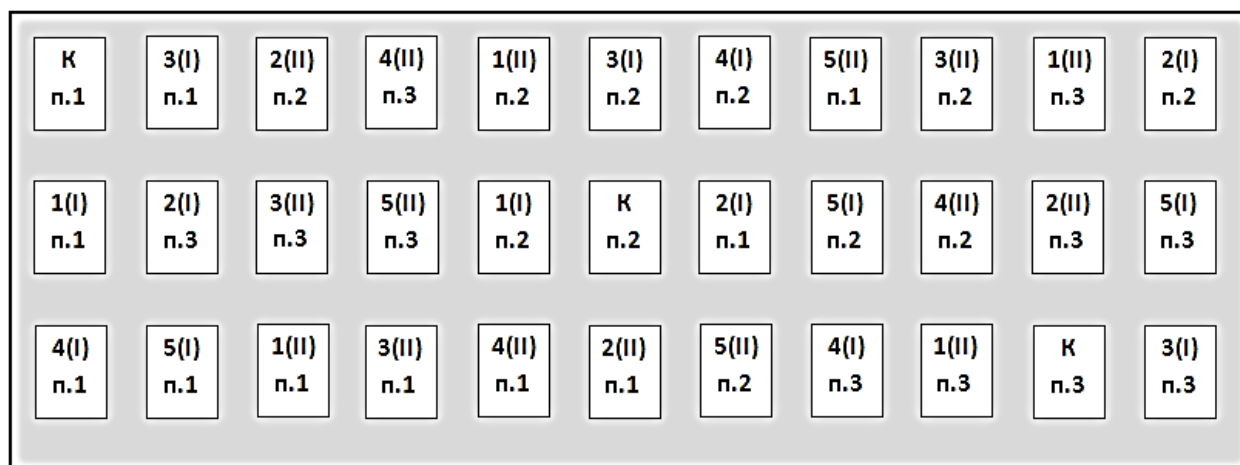


Рисунок 1. Расположение делянок на опытном участке ФГБНУ ВНИИРАЭ

Сеяли семена ячменя сорта Владимир в заранее подготовленные бороздки, имеющие глубину 5-6 см на расстоянии 15 см друг от друга. Раз в 1-2 недели с целью избавления от сорняков проводилась ручная прополка. Отбор растений для определения морфометрических показателей был совершен в фазу колошения (60 суток после посева). Фаза онтогенеза считалась наступившей, если в этой фазе находилось не менее 75 % растений.

В лабораторных условиях оценивали следующие параметры: высоту растений, площадь листьев главного стебля, площадь листьев в подгонах, сухой и сырой вес и содержание влаги в расчете на одно растение.

Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы MS Excel.

На рисунках 2-3 представлены результаты проведенного исследования.

Анализ полученных характеристик 60-суточных растений показал, что режим и доза предпосевого облучения не оказали статистически значимого влияния на площадь листьев главного стебля и побегов.

Установлено, что в фазу колошения облучение семян в дозе 2 кГр в I режиме оказало угнетающее действие на содержание влаги (рисунок 3). При этом процент влаги уменьшился в 1,16 раз в сравнении с контролем. Во II режиме наблюдается положительное действие ионизирующего излучения на содержание влаги в 60-суточных растениях. При дозах 1 и 4 кГр показатель статистически значимо увеличился в 1,1 раза относительно необлученного ячменя. Предпосевное облучение не влияло на высоту растений в фазу колошения.

Таким образом, оценено и проанализировано влияние различных доз и режимов предпосевого электронного облучения на морфометрические показатели ярового ячменя в фазу колошения. Выявлено статистически значимое увеличение содержания влаги в растениях во II режиме при дозах 1 и 4 кГр. В I режиме при облучении семян ячменя дозой 2 кГр наблюдается достоверное уменьшение процента влаги в сравнении с контролем.

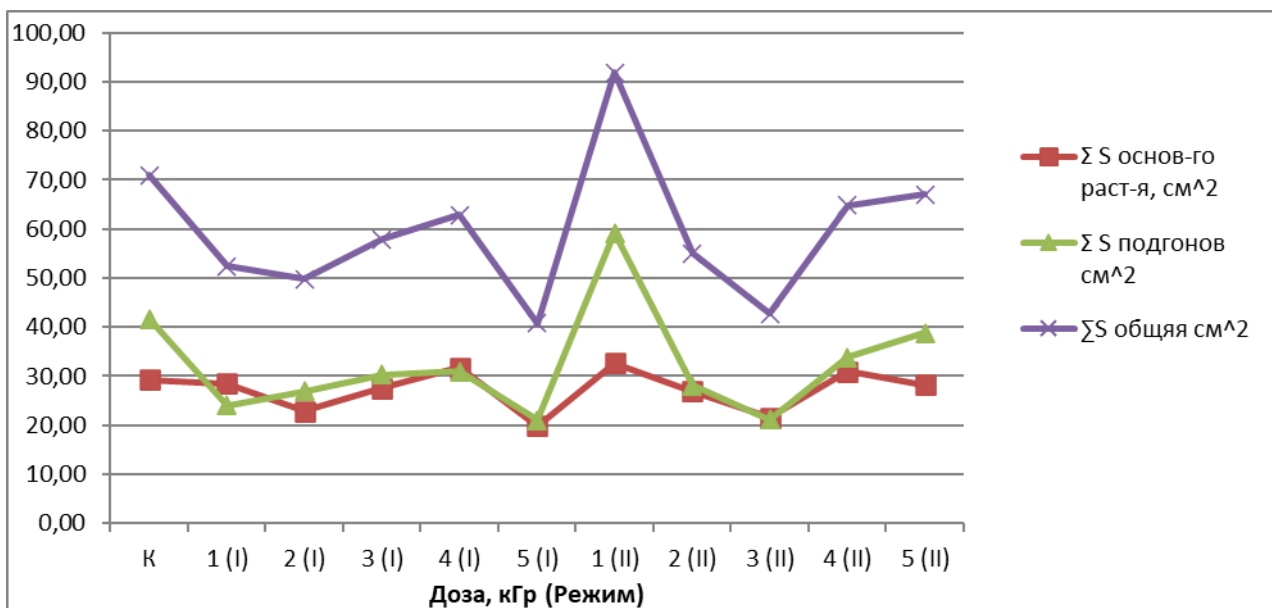


Рисунок 2. Влияние предпосевного облучения семян на площадь листьев ячменя в фазу колошения

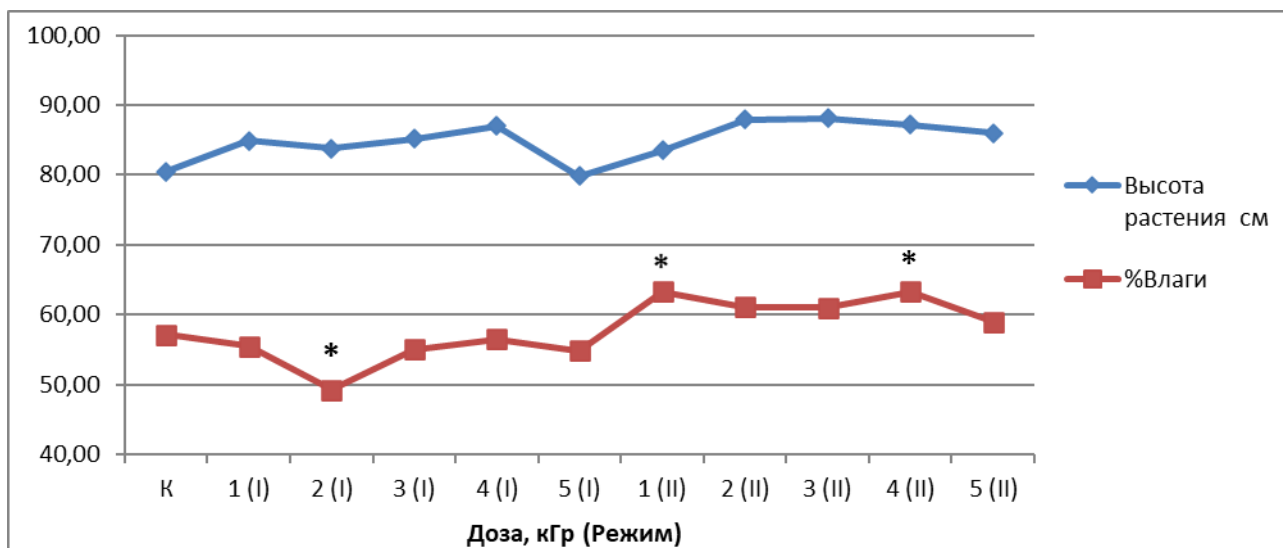


Рисунок 3. Результаты определения морфометрических показателей 60-суточных растений ячменя сорта Владимир

*- статистически значимые отличия от контроля при $p < 0,05$

Список литературы

1. Сафронова В.Ю. Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005. – 312 с.

2. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere // Instrum. Exp. Tech. 2015. 58. No. 5. P. 687–695.

ASSESSMENT OF THE EFFECT OF PRE-SOWING ELECTRONIC IRRADIATION ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF BARLEY IN THE EARING PHASE

Moskovskaya K.A., Loi N.N., Suslova O.V., Shubina S.I.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The effect of various doses and modes of presowing electron irradiation on the morphometric parameters of 60-day-old spring barley plants under field experiment conditions was evaluated and analyzed. Under the influence of irradiation on seeds in mode II, significant changes in the percentage of moisture in plants in the earing phase are observed: at a dose of 2 kGy, a decrease in this indicator was found, at doses of 1 kGy and 4 kGy, an increase in moisture content.

Keywords: *morphometric indicators, presowing irradiation, spring barley, field experiment, heading phase, percentage of plant moisture*

УДК: 619: 616-001.28/29

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАЗОВАНИЯ РТ В ОБЛУЧЕННОМ ОРГАНИЗМЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ КАК ДЛЯ ИНДИКАЦИИ, ТАК И ЭЛИМИНАЦИИ ИХ ИЗ ОРГАНИЗМА ЖИВОТНЫХ

Нефедова Р.В., Камалова З.Р., Гайнуллин Р.Р., Калимуллин Ф.Х., Вафин Ф.Р.

*Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности
420075, Россия, Республика Татарстан, Казань, Научный городок-2
e-mail: vnivi@vnivi.ru*

Статья посвящена теоретическому объяснению, обоснованию принципов образования в макроорганизме радиотоксинов с формированием в нем постлучевой токсемии (острой лучевой болезни) с дальнейшими тенденциями научно-исследовательской коррекции её применяя новые перспективные разработки Центра, как то, радиовакцина, противолучевой лечебный глобулин-идиотоп и бифункциональные тест – системы ИФА, РНГА, И РБФ с диагностической и лечебной целью.

Ключевые слова: *радиотоксины, диагностические тест-систем, бентонит, РБФ, РНГА, ИФА*

Введение

Энергетические программы многих развитых стран, в том числе и России на длительную перспективу предусматривают строительство различных предприятий ядерной энергетики: АЭС, атомных теплоэлектроцентралей (АТЭЦ), атомных станций теплоснабжения (АСТ) особенно в густонаселенных районах страны. При всей тщательности мер по обеспечению безопасной и безаварийной работы реакторов число «незапланированных» утечек продуктов ядерного деления в атмосферу, происшествий и аварий всё ещё велико. Необходимо всестороннее исследование проблемы радиоактивной безопасности населения и поиск доступных для применения средств профилактики лучевых поражений. [1, 2].

Обсуждение

Для определения общих принципов профилактики и терапии лучевых поражений, напомним основные механизмы поражающего действия ионизирующей радиации.

Радиотоксины (лат. *radius* луч + *токсины*) – низкомолекулярные биологически активные вещества различной природы, образующиеся в организме, пищевых продуктах, питательных средах, под воздействием ионизирующей радиации, обладающие

свойством имитировать и усиливать радиобиологические эффекты в организме, напрямую участвующие в формировании лучевых поражений.

Радиотоксины играют существенную роль в патогенезе лучевой болезни. Они могут тормозить и искажать синтез ДНК, угнетать митозы, вызывать хромосомные aberrации, интерфазную гибель клеток, изменять проницаемость биологических мембран, останавливать рост тканей, а в высоких концентрациях – вызывать лейкопению, задерживать развитие организма и вызывать появление уродств в потомстве. [3, 4].

Так что же такое радиотоксины и откуда они берутся?

Возникновение любого радиобиологического эффекта имеет своей первопричиной поглощение энергии ионизирующих излучений веществами клетки и окружающей её среды.

Адсорбция энергии происходит на атомном уровне и приводит к образованию большого числа активированных молекул, очень неравномерно расположенных по длине трека ионизирующей частицы или кванта. Благодаря большой энергии рассматриваемых излучений молекулы на пути трека переходят в возбуждение (переход электрона с одной орбиты на другую) или ионизацию (потеря или приобретение электрона). Образуются очень неустойчивые

продукты – это первичные предшественники всех событий, выявляемых на химическом и биологическом уровнях. Современными методами исследований (импульсный радиолит, эмиссионные спектры, быстрое смешивание и др.) было установлено время их «жизни» - от 10^{-16} до 10^{-4} с.

Для клетки животных тканей 70–85 % всей поглощенной энергии приходится на воду, 10–20 % - на белки, 1–7 % - на углеводы, 0,4–2 % - на низкомолекулярные метаболиты и 2–4 % - на минеральные вещества. Эффективность ионизации в значительной степени определяется содержанием водорода в облучаемой системе, который особенно легко образует протоны отдачи.

Чем больше доза облучения, тем больше первичных продуктов будет возникать в облученной клетке. При облучении клетки в дозах 1–10 Гр (видимый ионизирующий эффект) в клетке возникнет от 800 тыс. до 8 млн. первично активированных молекул во всех структурах клетки. В течение нескольких пикосекунд возбужденные и ионизированные молекулы образуют новые виды высокорективных продуктов.

Итак, в момент облучения происходят множественные «попадания» высокоэнергетических квантов и частиц в молекулы всех клеточных структур, что вызывает возникновение в них первично активированных молекул в состоянии возбуждения, ионизации или свободных радикалов, в этом состоянии окажутся молекулы воды (радиолит воды), низкомолекулярные метаболиты, углеводы, липиды, белки и нуклеиновые кислоты. Поскольку это состояние крайне неустойчиво, немедленно начинается второй этап радиационного повреждения клетки: окисление. Свободные радикалы, взаимодействуя с кислородом, дают начало радиационно-химическим процессам окисления, приводящим к появлению в облученной клетке первичных радиотоксинов (РТ) хиноидной и перекисной структуры. Время жизни этих окислителей на несколько порядков выше времени жизни продуктов радиолиты воды (OH^{\cdot} , e_{aq}^{-} , H^{\cdot}), что делает возможным их проникновение и взаимодействие с уникальными структурами ядра, плазматическими, митохондриальными, липосомальными мембранами в короткие сроки пострадиационного периода.

Различают первичные радиотоксины – липидные и хиноны, образующиеся в клетках облученных организмов сразу же или в ближайшие часы после облучения, и множество вторичных радиотоксинов, появляющихся на поздних стадиях лучевого поражения. Одним из ведущих первичных токсических веществ, образующихся в облученном организме, являются О-хиноны в семихиноидной форме [11, 12].

Ниже представленная схема цепи дальнейших событий в облученном организме на молекулярном и субклеточном уровнях впервые была представлена А.М. Кузиным в 1966 г. [5].

Схема отражает существенный факт, что первично образующиеся РТ способны изменить скорость и специфичность ферментативного окисления предшественников РТ и тем самым вызвать вторую волну

нарастания РТ в тканях, экспериментально фиксируемую через 2, 4, 6 и 24 ч после облучения. Именно эта волна принимает участие в клинически наблюдаемой первичной общей реакции. В схеме 1. также отражена возможность появления ряда метаболических и цитологических сдвигов в облученном организме как под влиянием прямого действия радиации на уникальные структуры клеточного ядра, так и под действием биологически высокоактивных РТ [9, 10].

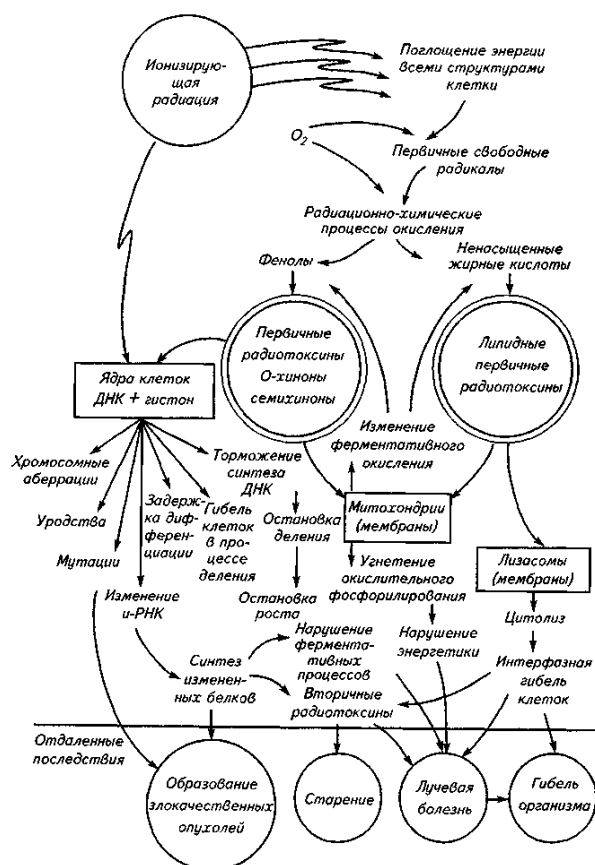


Рисунок 1. Схема участия первичных радиотоксинов в лучевом поражении организма (Кузин А.М., 1983)

Результаты и заключение

Основные процессы окисления свободных радикалов, ведущие к образованию первичных радиотоксинов, осуществляются уже во время облучения и тотчас после его окончания, предупреждение этих процессов возможно только путем профилактических мер защиты организма от происходящих в процессе облучения радиационно-химических реакций окисления.

В отделении радиобиологии был создан противолучевой регламентированный препарат, имеющий в своем составе РТ в нанограммах. Введенный животным за 30 сут. до тотального облучения в летальной дозе, он имеет противолучевую эффективность до 60 % при 100% летальном исходе в контроле. РТ введенный в организм в ничтожно малых количествах в составе иммуномодулирующей композиции,

стимулирует гемопоэз, антителогенез и иммунологическую память живого организма, не нанося организму необратимого окисления пиримидиновых оснований в ДНК, уменьшая тем самым прямое радиационное поражение уникальных молекул, но и резко снижает вторичные реакции радиолитического разложения, ведущие к образованию перекисей, гидропироксидов, хинонов и других РТ. В результате мы имеем противолучевой иммунитет и радиовакцину.

С практической точки зрения крайне важно уже в пострadiационный период предотвратить вторую волну возрастания РТ, наступающую вследствие ферментативных и спонтанных процессов через 2-4 ч после облучения и длящаяся в основном в течение первых суток. В классической иммунологии известно, что получить иммунный ответ можно только на соединенные имеющую молекулярную массу 40-60 кД. РТ – гаптен с радиомиметическими свойствами и молекулярной массой 6000 Д. Для получения иммунного ответа в нашем отделе был создан лечебный специфический препарат на основе белкового идиотопа с радиомиметическими свойствами и эффективностью более 75 %.

Кроме того, существует второй возможный путь нейтрализации образования токсических перекисей и хинонов – это введение в организм вскоре после его облучения низкомолекулярных антиоксидантов, предупреждающих развертывание процессов перекисидации в мембранах облученного организма. Сконструированные в отделении радиобиологии иммунохимические тест-системы РНГА, ИФА, РБФ имеют в своем составе диагностическую антивидовую противолучевую сыворотку на основе фитогенных антигенов с высокой реактивностью – как носитель специфических антител во всех тестах и + низкомолекулярные, наночастичные метки: эритроциты барана – как метгемоглобинообразователи; пероксидазу хрена – как низкомолекулярный антиоксидант и наночастичную фракцию монтморрилонитового бентонита – адсорбента-перехватчика радикалов и окислителей адсорбирующих и нейтрализующих на своей поверхности токсины, а также ингибирующий ферменты, участвующие в образовании РТ, тем самым предупреждая развертывание процессов перекисидации в мембранах облученного организма.

Пилотные инициативные эксперименты проведенные в отделении радиобиологии Центра по введению ингибиторов свободнорадикальных реакций белым мышам после облучения их в ЛД₁₀₀ увеличивало процент выживших животных и среднее время их жизни. Исследование влияния времени введения препаратов диагностических тест - систем (АТБД, АТЭД, ИФК) п/к показало, что их терапевтическое действие начинало проявляться через 2-4 ч после облучения, достигало максимума к 8-10 ч и затем уменьшалось. Если мы примем во внимание, что именно в этот период происходит ферментативное

образование перекисных и хиноидных радиотоксинов, идущее через стадии свободнорадикальных продуктов (семихиноны, свободные радикалы ненасыщенных жирных кислот), то полученные в экспериментах данные найдут своё естественное объяснение.

Исследования в этом направлении продолжаются.

Список литературы

1. Белов А.Д. и др. Влияние рентгеновского излучения на отдельные факторы иммунитета цыплят-бройлеров // Тез. докл. 3-ей Всесоюзной конф. по с.-х. радиологии. Обнинск, 1990. Т.2 С. 135–136.
2. Василенко И.Я. Токсикология продуктов ядерного деления. М.: Медицина, 1999. 238 с.
3. Гончаренко Е. Н., Кудряшов Ю. Б. Гипотеза эндогенного фона радиорезистентности, М., 1980. – 230 с.
4. Кузин А.М., Копылов В.А. Радиотоксины. М.: Наука, 1983. 174 с.
5. Нефедова Р.В. и др. Гемпротекторное действие пектинсодержащего препарата на облученных животных // В сб.: Актуальные проблемы ветеринарной медицины. Мат. докл. научно-практич. конф. посвящ. 90 - летию со дня рожд. проф. В.А. Киршина – Казань, 2018. С. 83–87.
6. Нефедова Р.В. Индикация токсических продуктов радиолитического разложения кормов и пищевых продуктов, подвергнутых радиационной стерилизации // В сб.: Актуальные проблемы ветеринарной медицины. Мат. докл. научно-практич. конф. посвящ. 90 - летию со дня рожд. проф. В.А. Киршина – Казань, 2018. С. 87–90.
7. Нефедова Р.В. и др. Индикация продуктов радиолитического разложения в облученном зерне с помощью реакции бентонитовой флокуляции // Ветеринарный врач – Казань, 2021. № 2 - С. 12–15.
8. Современные проблемы радиобиологии, под ред. А. М. Кузина, т. 4, с. 191, М., 1975.
9. Kurbangaleev Y., Vagin K., Gaynutdinov T. et al. Agricultural products decontamination from natural flora by gamma-irradiation // Linguistica antverpiensia. 2021. Issue-2. P. 981–992.
10. Sharifullina D.T., R.R. Gainullin, Shakurov M.M. et al. Study of desensitizing effect of the product based on phyto-genic and microbial substances // Linguistica antverpiensia. 2021. Issue-2. P. 1277–1290.
11. Musin L., Nigmatullina L., Laikov A. et al. Study of the molecular-structural composition of alcoholic extracts of radio-induced potato tubers by mass spectrometry and EPR // J. Food chemistry. July 2022. 133665. P. 1-9.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR RT FORMATION IN THE IRRADIATED ORGANISM AND DIRECTIONS OF CREATING BIFUNCTIONAL DRUGS FOR BOTH INDICATION AND ELIMINATING THEM FROM THE ANIMAL BODY

Nefedova R.V., Kamalova Z.R., Gainullin R.R., Kalimullin F.Kh., Vafin F.R.

Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russian Federation

The article is devoted to a theoretical explanation, substantiation of the principles of formation of radiotoxins in the macroorganism with the formation of post-radiation toxemia (acute radiation sickness) in it with further trends in its research correction using new promising developments of the Center, such as radiovaccine, anti-radiation therapeutic globulin-idiotope and bifunctional test - ELISA, RNGA, and RBF systems for diagnostic and therapeutic purposes.

Keywords: radiotoxins, diagnostic test systems, bentonite, RBF, RNHA, ELISA

УДК 621.384:631.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕТЕРМАЛЬНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ НА СТРУКТУРУ УРОЖАЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

Петрухина Д.И., Шишко В.И., Харламов В.А., Горбатов С.А., Меджидов И.М., Тхорик О.В., Басырова Д.В., Глущенко Н.В., Иванов И.А., Тихонов В.Н., Тихонов А.В.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: petrukhina.dari@yandex.ru; valentine585@yandex.ru

Приводятся результаты вегетационных опытов по однократному воздействию нетермальной аргоновой плазмы атмосферного давления на растения ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир на разных этапах его органогенеза. Представлены данные по морфофизиологическим показателям и структуре урожая ячменя.

Ключевые слова: нетермальная плазма, структура урожая, морфофизиологические показатели, органогенез, ячмень

Введение

Нетермальная плазма является одной из инновационных и перспективных технологий в сельскохозяйственном секторе; это важная современная эколого-сельскохозяйственная технология, которая, как известно, стимулирует рост растений.

Обработка нетермальной плазмой [1] улучшает качество семян и урожайность быстрым, экономичным и экологически чистым способом [3]; инактивирует бактерии, загрязняющие пищевые продукты и упаковочные материалы, с помощью заряженных, высокореактивных газообразных молекул и частиц. В последние десятилетия, применение нетермальной плазмы расширилось до пищевой промышленности, в качестве мощного инструмента для нетермической обработки пищевых продуктов с различными областями применения. Данный метод играет важную роль в нескольких процессах развития и физиологии растений, в том числе в снижении бактериальной

обсеменности семян, повышении всхожести семян, а также стимулировании роста проростков.

Цель данной работы состояла в изучении влияния на структуру урожая ярового ячменя однократного воздействия нетермальной аргоновой плазмой при атмосферном давлении. Воздействие плазмой производили в различные этапы органогенеза ячменя.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлся ячмень (*Hordeum vulgare* L.) ярового сорта Владимир. Растения выращивали в условиях вегетационного эксперимента в теплице в сосудах, содержащих 4,5 кг воздушно-сухой дерново-подзолистой почвы. В каждом сосуде выращивалось по 10 растений. Воздействие на растения проводили в следующие фазы органогенеза: 3-й лист, кущение и трубкование [4, 5]. В качестве источника нетермальной плазмы выступала установка, в которой генерируется микроволновый разряд

коаксиальной конфигурации в струе аргона при атмосферном давлении [7]. Расход аргона составлял 5 л/мин. Длительность экспозиции – 1, 5, 15 и 30 мин. Эффект от воздействия плазмой оценивали в конце вегетации по морфофизиологическим показателям и структуре урожая в фазах 3-й лист, кущение и выход в трубку. Растения выращивали до полной спелости. Для оценки влияния на структуру урожая ярового ячменя однократного воздействия нетермальной аргоновой плазмой при атмосферном давлении рассматривались следующие параметры: высота стебля, длина колоса, число колосков в колосе главного стебля, число зерен в колосе главного стебля, масса зерна с главного стебля, число зерен с бокового стебля, масса зерен с бокового стебля, масса зерна (общая), масса 1000 зёрен, масса соломы с сосуда. Статистическую обработку данных проводили методом попарного сравнения различных вариантов опыта относительно контроля по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты исследования и обсуждения

В результате исследований был проведен статистический анализ структуры урожайности ячменя, собранного в фазу полной спелости. Наблюдаются различия достоверной вероятностью 0,99 и с достоверной вероятностью 0,95.

Высота стебля ячменя после воздействия плазмой в фазу 3-й лист длительностью 1 мин была

снижена на 9,12 % ($p \geq 0,01$) относительно контрольных растений. После 5 мин воздействия наблюдали снижение на 8,44 % ($p \geq 0,05$); после 15 мин - на 4,35 %, а после 30 мин экспозиции снижение составило 5,76 % ($p \geq 0,05$) относительно контроля.

Длина колоса ячменя после воздействия плазмой в фазу 3-й лист длительностью 1 мин снизилась на 5,65 %; после 5 мин - на 5,38 %, после 15 мин - на 5,39 % ($p \geq 0,05$), а после 30 мин воздействия на 3,58 % относительно контроля.

Число колосков в колосе главного стебля после воздействия плазмой в фазу кущения после 15 и 30 мин увеличилась на 13,47 % ($p \geq 0,01$) и на 8,54 % ($p \geq 0,01$) соответственно относительно контроля.

Число зерен в колоске главного стебля после воздействия в фазу 3-й лист значительно не изменялась относительно контрольных растений независимо от длительности экспозиции. Число зерен в колоске главного стебля после воздействия плазмой в фазу кущения после 1 и 5 мин экспозиции снизилась на 6,45 % ($p \geq 0,05$) и на 7,60 % ($p \geq 0,05$) относительно контроля. После 15 и 30 мин экспозиции не наблюдали изменений параметра относительно контрольных растений. Число зерен в колоске главного стебля после воздействия плазмой в фазу трубку статистически значимо не изменялась относительно контрольных растений независимо от длительности экспозиции (рис. 1).

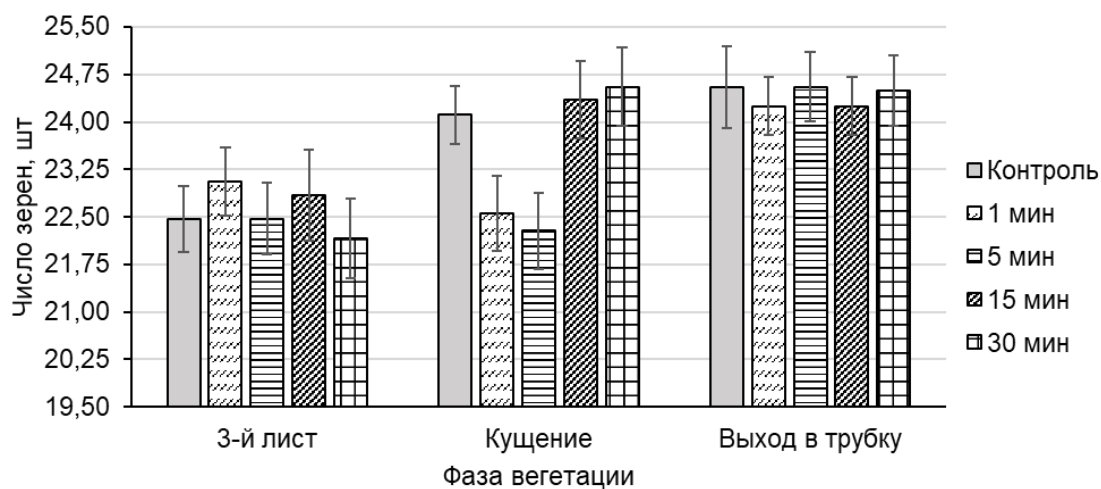


Рисунок 1. Число зерен в колоске главного стебля

Масса зерна с главного стебля после воздействия плазмой в фазу кущения снизилась на 1,77 % и 7,98 % относительно контроля после 1 и 5 мин экспозиции, и увеличилась на 4,20 % и на 2,35 % после 15 и 30 мин экспозиции соответственно. Масса зерна с главного стебля после воздействия плазмой в фазу трубку снизилась на 7,94 %, на 5,34 %, на 8,09 % и на 6,25 % относительно контроля после 1, 5, 15 и 30 мин экспозиции соответственно.

Число зерен с бокового стебля после воздействия в фазу 3-й лист увеличилась на 7,75 % и

снизилась на 9,69 % относительно контрольных растений после 15 и 30 мин экспозиции, при этом их масса снизилась на 40,70 %, на 48,68 % соответственно. Число зерен с бокового стебля после воздействия плазмой в фазу кущения увеличилась на 43,85 % и на 63,85 % относительно контрольных растений после 15 и 30 мин экспозиции, а их масса увеличилась на 8,13 % и на 11,82 % соответственно. Число зерен с бокового стебля после воздействия плазмой в фазу трубку после 15 и 30 мин экспозиции увеличилась на 26,97 % и на 15,79 %

относительно контрольных растений, в то же время масса снизилась на 23,48 % и на 26,34 % соответственно.

Масса зерна (общая) после воздействия в фазу 3-й лист увеличилась после 1, 5, 15 и 30 мин экспозиции на 5,38 % ($p \geq 0,05$), на 4,75 % ($p \geq 0,05$), на 6,29 % ($p \geq 0,01$) и на 0,60 % соответственно, относительно контроля. Масса зерна (общая) после воздействия плазмой в фазу кущения длительностью 1 и 5 мин снизилась на 6,26 % ($p \geq 0,01$) и на 10,31 % ($p \geq 0,01$) относительно контроля. После экспозиции 15 и 30 мин увеличилась на 5,83 % ($p \geq 0,01$) и на 6,56 % ($p \geq 0,01$) относительно контроля. Масса зерна (общая) после воздействия плазмой в фазу трубкавания длительностью 1 и 5 мин увеличилась на 6,78 % ($p \geq 0,01$) и на 3,44 % относительно контроля. После экспозиции 15 и 30 мин снизилась на 3,39 % ($p \geq 0,05$) и на 2,96 % ($p \geq 0,05$) относительно контроля.

Масса 1000 зёрен после воздействия в фазу 3-й лист статистически значимо не изменялась после воздействия в течение 1, 5 и 15 мин относительно контроля. Параметр увеличился на 4,37 % ($p \geq 0,05$) относительно контроля после 30 мин экспозиции. Масса 1000 зёрен после воздействия плазмой в фазу

кущения увеличилась на 4,86 % ($p \geq 0,01$) относительно контроля после 1 мин воздействия. Более длительное воздействие статистически значимо не изменяла параметр относительно контроля. Масса 1000 зёрен после воздействия плазмой в фазу трубкавания снизилась на 2,91 % ($p \geq 0,01$) и на 4,90 % ($p \geq 0,01$) после 1 и 5 мин воздействия относительно контроля. После 30 мин воздействия наблюдали увеличение на 1,91 % ($p \geq 0,01$) относительно контроля.

Масса соломы с сосуда после воздействия в фазу 3-й лист увеличилась на 12,50 % ($p \geq 0,01$), на 12,50 % ($p \geq 0,01$) после 1 и 5 мин воздействия плазмой. После 15 и 30 мин экспозиции изменений относительно контрольных растений не наблюдали. Масса соломы с сосуда после воздействия плазмой в фазу кущения снизилась на 5,26 % ($p \geq 0,01$) после 1 мин и не изменилась после 5 мин экспозиции. Наблюдали увеличение параметра после 15 и 30 мин воздействия на 15,79 % ($p \geq 0,01$) относительно контрольных растений. Масса соломы с сосуда после воздействия плазмой в фазу трубкавания увеличилась на 12,50 % на 6,25 % ($p \geq 0,01$) на 25 % на 18,75 % ($p \geq 0,01$) относительно контрольных растений (рис. 2).

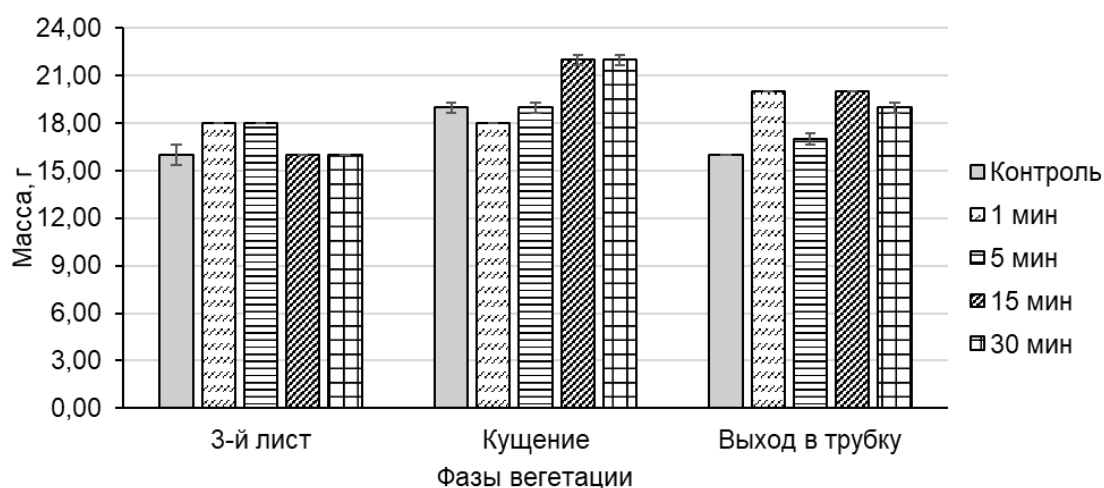


Рисунок 2. Масса соломы с сосуда

Результаты исследований показывают, что при однократном воздействии нетермальной аргоновой плазмой в фазе 3-й лист и времени экспозиции 1, 5, 15 и 30 мин статистически значимых различий, в основном, не наблюдается. При обработке нетермальной плазмой в фазе кущения основные параметры, преимущественно, улучшаются с увеличением времени экспозиции до 15 и 30 мин, при этом наблюдаются значительные негативные эффекты при времени экспозиции 5 мин. При воздействии нетермальной плазмой в фазе выхода в трубку часть параметров улучшается при времени экспозиции 15 и 30 мин (масса 100 зерен, масса соломы с сосуда). Таким образом, оптимальным временем обработки является 15 мин в фазе кущения, поскольку наблюдаются

стимулирующие эффекты в основных рассматриваемых параметрах. Подобный эффект может быть полезен с целью повышения урожайности ячменя.

Список литературы

1. Waskow A., Howling A., Furno I. Mechanisms of plasma-seed treatments as a potential seed processing technology // *Front. Phys.* 2021. Т. 2. С. 3.
2. Adhikari B., Adhikari M., Park G. The effects of plasma on plant growth, development, and sustainability // *Appl. Sci.* 2020. Т. 10. С. 6045.
3. Domonkos M. et al. Applications of Cold Atmospheric Pressure Plasma Technology in Medicine,

Agriculture and Food Industry // Appl. Sci. 2021. T. 11. C. 4809.

4. Song J.-S. et al. Emerging plasma technology that alleviates crop stress during the early growth stages of plants: a review // Front. Plant Sci. 2020. T. 11. C. 988.

5. Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F. A decimal code for the growth stages of cereals // Weed research. 1974. T. 14(6). C. 415–421.

6. Tottman D.R. The decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations // Annals of applied biology. 1987. T. 110(2). C. 441–454.

7. Petrukhina D. I. et al. The effect of seed treatment with non-thermal plasma // RAD Conference Proceedings. 2021. T. 5. C. 75–77.

THE RESEARCH OF THE EFFECT OF NON-THERMAL ARGON PLASMA ON THE STRUCTURE OF THE SPRING BARLEY CROP

Petrukhina D.I., Shishko V.I., Kharlamov V.A., Gorbato V.S.A., Medzhidov I.M., Tkhorik O.V., Basyrova D.V., Glushchenko N.V., Ivanov I.A., Tikhonov V.N., Tikhonov A.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The results of vegetative experiments on single exposure of barley plants (*Hordeum vulgare L.*) cv. Vladimir at different stages of its organogenesis are presented. The data on morphophysiological parameters and structure of barley yield are presented.

Keywords: *non-thermal plasma, crop structure, morphophysiological indicators, organogenesis, barley*

УДК 539.1.06

МЕТОД МОДИФИКАЦИИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОБЪЕКТОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

Студеникин Ф.Р.^{1,2а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Черняев А.П.^{1,2}, Ханкин В.В.², Крусанов Г.А.³, Золотов С.А.¹, Соколов С.А.¹, Кречетов Н.Д.¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины, г. Москва, Российская Федерация*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Российская Федерация*

³ *ФГБУ ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА, г. Москва, Российская Федерация*

e-mail: ^аfstudenikin@gmail.com

Проведены исследования влияния материала и толщины пластин-модификаторов на спектральные характеристики пучков с начальной энергией электронов от 4 МэВ до 10 МэВ и распределения поглощенной дозы в облучаемых объектах, создаваемые модифицированными пучками. Предложены аналитические зависимости, позволяющие рассчитывать оптимальные комбинации начальной энергии пучка электронов и толщины алюминиевой пластины-модификатора, обеспечивающие максимально достижимую однородность радиационной обработки.

Ключевые слова: *спектр пучка, ускоренные электроны, радиационная обработка, равномерность распределения поглощенной дозы, распределение Ландау*

В настоящее время значение радиационных технологий существенно возрастает не только в науке, но и в различных отраслях народного хозяйства и медицинской практике. Радиоизотопы и ускорители заряженных частиц, помимо применения в фундаментальных исследованиях в области атомной и

ядерной физики, радиобиологии и радиохимии [1-3], широко используются в медицине для лучевой терапии и диагностики, стерилизации объектов трансплантологии, фармацевтических препаратов и медицинских изделий; в экологии для очистки сточных вод, твердых отходов и выбросных газов; в

промышленности и сельском хозяйстве для радиационной обработки материалов и пищевых продуктов.

Более чем в 70 странах мира действуют центры промышленной радиационной обработки продуктов питания и медицинских изделий. Для промышленной радиационной обработки все чаще используют ускорители электронов, что во многом связано с более высокой мощностью дозы, получаемой объектом, по сравнению с разрешенными радиоактивными источниками, и, как следствие, меньшим временем обработки [1].

В соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения утверждены международные стандарты ISO [4-6] и определены верхние пределы поглощенной дозы для продуктов питания (до 10 кГр) и медицинских изделий (до 30 кГр). Вместе с тем существует необходимость точного определения эффективного диапазона поглощенной дозы для каждого облучаемого объекта, выход за верхний предел которого приводит к изменению физико-химических свойств, а облучение в дозах, меньших нижней границы диапазона, не решает задачу, стоящую перед радиационной обработкой [7-9].

При обработке ускоренными электронами неизбежна неоднородность облучения объектов, обусловленная характером распределения поглощенной дозы излучения по глубине объекта. Критерием однородности облучения принято считать отношение минимального значения поглощенной дозы D_{\min} к максимальному значению поглощенной дозы D_{\max} в объеме объекта [9]. В то время как для большинства медицинских изделий достаточно однородности облучения порядка 50%, для других категорий облучаемых объектов, таких как биоимплантаты, фармацевтические препараты, пищевая продукция, необходимо обеспечить однородность облучения не менее 80 % [9,10,11]. Достижение степени однородности облучения более 80% для объектов массовой толщиной более 2 г/см² является сложной технологической задачей, при решении которой необходимо учитывать неравномерность заполнения упаковки облучаемых объектов, их геометрию, структуру, химический состав, плотность и другие факторы [11].

Для повышения равномерности распределения дозы по объему обрабатываемых объектов применяется использование нескольких сеансов облучения с варьированием энергии электронов [11]. Однако, повторные облучения объекта увеличивают время радиационной обработки и повышают ее стоимость. Кроме того, для некоторых обрабатываемых объектов не рекомендуется длительное пребывание вне охлаждающих камер.

В связи с вышеперечисленным значимой и актуальной задачей является разработка метода, позволяющего повысить однородность радиационной обработки за один сеанс облучения, чему и посвящены проведенные исследования.

Цель работы заключалась в разработке метода модификации пучка ускоренных электронов для

повышения равномерности радиационной обработки облучаемых объектов.

Объектом исследования являлись пластины-модификаторы для увеличения равномерности радиационной обработки на ускорителях электронов. Предметом исследования являлись закономерности изменений характеристик пучка электронов и параметров распределений поглощенной дозы по объему облучаемых объектов в зависимости от толщины и материала пластин-модификаторов.

Измерения распределений поглощенной дозы проводились с использованием фантома кубической формы из пищевого пластика PETG, изготовленного при помощи станка числовым программным управлением по технологии 3D-печати. Фантом состоял из 25 пластин с пазами для закрепления полимерных пленок, являющихся стандартными образцами поглощенной дозы СО ПД(Ф)Р-5/50 и СО ПД(Э)-1/10. Выбор материала обусловлен тем, что плотность и зарядовое число пластика PETG практически совпадают с составом дозиметрических полимерных пленок, что позволяет, в определенном приближении, рассматривать сборный фантом как однородный объект в котором возможно с погрешностью не более 12 % провести измерения распределений поглощенной дозы.

Проводилось исследование влияния толщин и материала пластин-модификаторов, начальной энергии электронов на следующие характеристики распределения поглощенной дозы в объекте:

L_{\max} – глубина объекта, на которой значение поглощенной дозы максимально;

L_{opt} – оптимальная толщина облучаемого объекта, равная глубине, на которой значение поглощенной дозы совпадает с соответствующим значением поверхностной дозы;

$K = D_{\min}/D_{\max}$ – коэффициент однородности облучения, равный отношению минимального значения поглощенной дозы D_{\min} к максимальному значению поглощенной дозы D_{\max} в объеме объекта, толщина которого равна L_{opt} .

Сравнение параметров распределений поглощенной дозы по объему объектов и спектральных характеристик пучка электронов при дополнительном размещении пластин-модификаторов между выходом пучка и облучаемым объектом и без размещения пластин проводилось путем компьютерного моделирования, основанного на методе Монте-Карло, с использованием инструментария GEANT4 (CERN, Швейцария).

Проверка возможности применения метода повышения однородности облучения ускоренными электронами осуществлялась на линейном ускорителе электронов УЭЛР 10-15-С-60 [12] (производитель НИИЯФ МГУ совместно с АО НПП «ТОРИЙ», г. Москва, Россия) и линейном ускорителе электронов ИЛУ-14 [13] (производитель ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия), используемых для промышленной радиационной обработки.

По результатам полученным в ходе выполнения исследования предложен метод модификации

спектра пучка для радиационной обработки ускоренными электронами с начальной энергией от 4 МэВ до 10 МэВ, основанный на использовании алюминиевых пластин-модификаторов толщиной от 0.5 до 5 мм, позволяющий увеличить до 97 % равномерность распределения поглощенной дозы по объему для облучаемых объектов в форме параллелепипеда массой толщиной до 3.125 г/см².

Для объектов в форме параллелепипеда массой толщиной от 1.025 до 3.125 г/см² определены оптимальные комбинации начальной энергии пучка электронов и толщины алюминиевой пластины-модификатора, обеспечивающие максимально достижимую однородность радиационной обработки.

Установлено, что основной вклад в повышение однородности радиационной обработки объектов вносят первичные электроны, спектр которых после прохождения пластин-модификаторов размывается в сторону меньших энергий. При этом после прохождения пучком электронов с начальной энергией от 4 до 10 МэВ через алюминиевую пластину-модификатор толщиной от 0.5 до 5 мм энергетический спектр пучка электронов может быть описан предложенным модифицированным распределением Ландау и функцией, полученной путем билинейной интерполяции с погрешностью не более 10%.

Получены аналитические зависимости спектра электронов и характеристик распределения поглощенной дозы в объектах при облучении ускоренными электронами с энергией от 1 МэВ до 10 МэВ после прохождения алюминиевых пластин-модификаторов от их толщины и начальной энергии пучка.

Исследование выполнено при поддержке междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина // Москва: Издательство Московского университета, 2019. – 231 с.

2. Черняев А.П. Ускорители в современном мире Медицина, Изд-во Московского университета, 2013. 368 с.

3. Абрамов А.И. История ядерной физики, М.: Ком Книга, 2006. 232 с.

4. ISO 11137-3-2006 Стерилизация медицинской продукции. Облучение. Часть 3. Руководство по вопросам дозиметрии.

5. ISO 14470-2011 Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением.

6. General Standard for Irradiated Foods CODEX STAN 106-1983 (REV.1-2003) / FAO/WHO, Rome, 2003.

7. High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy / Report of a Joint FAO/IAEA/WHO study group, 1999.

8. Chitho P.F. et al. Radiation-treated ready-to-eat (RTE) chicken breast Adobo for immuno-compromised patients // Food Chemistry 163, 2014. – p. 142–146, DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.04.087.

9. Trends in radiation sterilization of health care products / Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.

10. Близняк У.А. и др. Определение микробиологических и химических показателей мясной продукции после обработки электронным излучением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2021. Т. 87, № 6. С. 5–13. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-5-13.

11. Cleland M.R. Industrial applications of electron accelerators // CERN Accelerator School: small accelerators, 2006. p. 383-416. DOI 10.5170/CERN-2006-012.383.

12. Shvedunov V.I. et al. Electron accelerators design and construction at Lomonosov Moscow State University // Radiation Physics and Chemistry, 2019. v. 159. p. 95-100.

13. Брызгин А.А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14 // Приборы и техника эксперимента, 2011. № 3. С. 5–21.

METHOD OF MODIFICATION OF ELECTRON BEAM FOR INCREASING THE UNIFORMITY RADIATION PROCESSING OF OBJECTS AT INDUSTRIAL ACCELERATORS

Studenikin F.R.^{1,2a}, Bliznyuk U.A.¹, Chernyev A.P.^{1,2}, Khankin V.V.², Krusanov G.A.³, Zolotov S.A.¹, Sokolov S.A.¹, Krechetov N.D.¹

¹ Moscow State University named by M.V. Lomonosov, Physics Department, department of accelerators' physics and radiation medicine, Moscow, Russian Federation

² Scientific Institute of Nuclear Physics by D.V. Skobeltsyn, Moscow, Russian Federation

The influence of the material and thickness of modifier plates on the spectral characteristics of beams with an initial electron energy from 4 MeV to 10 MeV and the distribution of the absorbed dose in irradiated objects created by modified beams have been studied. Analytical dependencies are proposed that make it possible to calculate the optimal combinations of the initial energy of the electron beam and the thickness of the aluminum modifier plate, which ensure the maximum achievable uniformity of radiation treatment.

The research was supported by interdisciplinary scientific and educational school of Moscow University "Photonic and Quantum Technologies. Digital Medicine".

Keywords: beam spectrum, accelerated electrons, radiation treatment, uniformity of the absorbed dose distribution, Landau distribution

УДК 614.876:633.16:632.4

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ НА ПОРАЖЕННОСТЬ КОРНЕВЫМИ ГНИЛЯМИ

Сулова О.В., Лой Н.Н., Московская К.А., Шубина С.И.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: belovol-1983@mail.ru

В вегетационных условиях 2022 года на дерново-подзолистой супесчаной почве изучали влияние электронного облучения семян ярового ячменя на пораженность и распространенность гельминтоспориоза на корнях растений. В фазу колошения (60-ти суточные растения) зафиксирована наименьшая распространенность и пораженность ячменя данным заболеванием. В опытных вариантах с облучением в дозах 3-5 кГр прослеживалась динамика снижения указанных показателей.

Ключевые слова: электронное облучение, ячмень яровой, корневые гнили, степень поражения, распространенность болезни

Яровой ячмень является основной зернофуражной культурой в Российской Федерации. Значение ячменя выражается в обеспечении фуражом и зерновой продукцией, использованием для технических целей. В условиях острой нехватки зерна на мировых рынках и высоким спросом внутри государства потребности в данной продукции постоянно увеличиваются.

Основные направления развития научно-технического обеспечения зернового комплекса предполагают создание и внедрение современных технологий производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия [1].

Тормозящим фактором получения гарантированных высоких урожаев ярового ячменя являются корневые гнили. К одним из эффективных способов борьбы с ними относится возделывание устойчивых сортов, проведение фунгицидных обработок семян перед посевом и растений в период вегетации.

К альтернативным методам борьбы с данными фитопатогенами относится применение различных методов физического воздействия на посевной

материал. Одним из таких методов является низкоэнергетическое электронное излучение [2, 3].

В связи с этим актуальным вопросом является изучение биологической эффективности предпосевной обработки семян ячменя электронным излучением на жизнеспособность фитопатогенной микрофлоры.

Целью настоящих исследований явилось изучение влияния предпосевого облучения ярового ячменя низкоэнергетическим электронным излучением в широком диапазоне доз на поражаемость растений возбудителями корневой гнили.

Материалы и методы

Вегетационные исследования проводили в 2022 году на дерново-подзолистой супесчаной почве со следующими характеристиками: рН_(KCl) 4,6±0,01; гумус (1,22±0,01) %, емкость катионного обмена (5,3±0,01) мг-экв/100 г; содержание P₂O₅ – (103,3±1,9); K₂O – (83,7±1,3) мг/100 г почвы. Вегетационный эксперимент проводили по общепринятой методике [4]. В просеянную и увлажненную до 60 %

от полной влагоемкости (ПВ) почву при тщательном перемешивании вносили NPK в виде водных растворов солей NH_4NO_3 , K_2SO_4 и KH_2PO_4 в дозах N – 0,15; P_2O_5 – 0,1 и K_2O – 0,1 г/кг почвы, оптимальных для роста и развития зерновых культур. Почву набивали в полиэтиленовые сосуды объемом 5 л. Облученные семена ячменя ярового сорта Владимир высевали в почву (влажность 60 % от ПВ) в количестве 30 шт./сосуд, оставляя до уборки по 10 растений на сосуд.

Облучение семян проводили за 7 суток до посева в ИСЭ СО РАН (г. Томск) на широко апертурном электронном ускорителе «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом и выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу [5]. Семена ярового ячменя общей массой $m=15$ г были приклеены с обеих сторон скотчем толщиной 50 мкм, что позволяло уложить зерно в один слой на расстоянии 20 мм от выводного окна ускорителя. При наборе половины дозы, величина которой варьировалась в диапазоне 1–5 кГр, образец обязательно переворачивали на другую сторону с целью выравнивания набранной дозы в каждое семя. Зерно облучали в дозах 1, 2, 3, 4 и 5 кГр. Суммарная введенная доза набиралась путем изменения количества импульсов. Мощность дозы излучения – 100 Гр/импульс, энергия электронов – 100 кэВ. При этом глубина поглощения дозы не превышала 300 мкм.

Распространенность и пораженность растений гельминтоспориозом (корневая гниль) (возб. *Bipolaris sorokiniana*, (синоним *Helminthosporium sativum* Paml. King, et Bakke)) учитывали на корнях растений согласно общепринятым методикам [6, 7].

Экспериментальные данные анализировали методами непараметрической статистики с помощью программ MS Excel и STATISTICA. Статистическую

значимость различий оценивали с помощью критерия Стьюдента, а также по НСР (наименьшей существенной разнице) при 95 % - ном уровне значимости.

Результаты и их обсуждение

В течение вегетационного периода учитывали пораженность растений ярового ячменя гельминтоспориозом, а также его распространенность на корнях. В начальные фазы роста данные показатели имели незначительные колебания в опытных вариантах и контрольных значениях.

Развитие корневой гнили в фазу кущения зависело от дозы облучения. При облучении семян в дозе 2,0 кГр пораженность корней гельминтоспориозом была максимальной – 35,8 %, при значении в контроле 22,5 % (таблица 1). В данной дозе распространенность болезни существенно превышала контрольное значение – на 30,0 %.

При дальнейшем росте растений зафиксировано замедление развития гельминтоспориоза на корнях ярового ячменя. В вариантах с дозой облучения 1,0 и 3,0 кГр пораженность корней гельминтоспориозом незначительно снизилась - до уровня 5,8 %, при значении в контроле 9,2 % (таблица 2). Аналогичная закономерность сохранилась и по распространенности данного заболевания.

Наибольшая эффективность по снижению пораженности растений корневой гнилью отмечена в фазу полной спелости (100 суточные растения). При дозе 5,0 кГр отмечено статистически значимое снижение (на 13,3 %) распространенности гельминтоспориоза относительно контроля (таблица 3).

Таблица 1

Развитие гельминтоспориоза на корнях 21 суточных растений

Доза облучения, кГр	Пораженность корней гельминтоспориозом	
	пораженность, %	распространенность, %
0 (К)	22,5	46,7
1,0	29,2	63,3
2,0	35,8	76,7
3,0	21,7	50,0
4,0	22,5	46,7
5,0	21,7	43,3
НСР ₀₅	13,7	25,5

Развитие гелиминтоспориоза на корнях 60-суточных растений

Доза облучения, кГр	Пораженность корней гелиминтоспориозом	
	пораженность, %	распространенность, %
0 (К)	9,2	36,7
1,0	5,8	23,3
2,0	9,2	36,7
3,0	5,8	23,3
4,0	7,9	30,0
5,0	6,7	20,0
НСР ₀₅	5,8	22,5

Таблица 3

Развитие гелиминтоспориоза на корнях 100-суточных растений

Доза облучения, кГр	Пораженность корней гелиминтоспориозом	
	пораженность, %	распространенность, %
0 (К)	63,3	100,0
1,0	65,8	100,0
2,0	69,2	100,0
3,0	69,2	100,0
4,0	67,5	100,0
5,0	59,2	86,7
НСР ₀₅	9,4	8,4

Заключение

В результате проведенных исследований отмечены изменения пораженности корневой системы растений гелиминтоспориозом, а также распространенность болезни под влиянием низкоэнергетического электронного излучения. Пораженность корней имела минимальные значения на 60-суточных растениях: контроль – 9,2 %, доза 1,0 кГр – 5,8 % и 3,0 кГр – 5,8 %. Максимальные значения данного показателя отмечены в период полной спелости растений: контроль – 63,3 %, доза 2,0 кГр – 69,2 % и 3,0 кГр – 69,2 %. Распространенность гелиминтоспориоза на корнях 100 суточных растений достигла 100 % во всех вариантах, кроме дозы 5 кГр.

Список литературы

1. Долгосрочная стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 года. Официальное издание. ФГБНУ Росинформагротех, М., 2020. -111 с.

2. Loy. N.N. et al. Influence of electronic irradiation on the affection of barley by root rot // Journal of Physics: Conference Series, 2019. 1393 012107. doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012107

3. Gryczkaa U. et al. Efficacy of low energy electron beam on microbial decontamination of Spices // Radiation Physics and Chemistry 170 (2020). P. 1–5.

4. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 206 с.

5. Vorobyov M.S., Koval N.N Sulakshin S.A. 2015 Instrum. Exp. Tech. 58 – №5. 687.

6. Болезни зерновых колосовых культур (рекомендации по проведению фитосанитарного мониторинга). Мин-во с/х РФ, М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 138 с.

7. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения качества. Часть 2. Государственные стандарты Союза ССР. ГОСТ 12044-81. Методы определения зараженности болезнями. Москва, 1991. С. 250–251.

INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION OF SPRING BARLEY SEEDS ON AFFECTION WITH ROOT ROTS

Suslova O.V., Loy N.N., Moskovskaya K.A., Shubina S.I.

Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Under the growing conditions of 2022 on soddy-podzolic sandy loamy soil, the effect of electron irradiation of spring barley seeds on the incidence and prevalence of helminthosporiosis on plant roots was studied. In the earing phase (60-day-old plants), the lowest prevalence and susceptibility of barley to this disease was recorded. In experimental variants with irradiation in doses of 3-5 kGy, the dynamics of the decrease in these indicators was traced.

Keywords: *electron irradiation, spring barley, root rot, degree of damage, prevalence of the disease*

Under the conditions of the 2022 vegetation experiment on soddy-podzolic sandy loam soil, the effects of pre-sowing irradiation of spring barley with low-energy electronic radiation in a wide range of doses on the incidence of plant pathogens by root rot were studied.

The grain was irradiated in doses of 1, 2, 3, 4 and 5 kGy. The total administered dose was recruited by changing the number of pulses. The radiation dose rate is 100 Gy /pulse, the electron energy is 100 keV. At the same time, the depth of dose absorption did not exceed 300 µm.

Prevalence and affection of plants with helminthosporiosis (root rot) (ext. *Bipolaris sorokiniana*, (*Helminthosporium sativum* Paml. King, et Bakke)) were taken into account on the roots of plants. Accounts were

carried out in the phenological phases of plant growth: tillering (21 days), earing (60 days), full ripeness 100 (days).

As a result of the studies, changes in the lesion of the root system of plants with helminthosporiosis, as well as the prevalence of the disease under the influence of low-energy electronic radiation, were noted. Root incidence had minimal values on 60 diurnal plants: control – 9,2 %, dose 1,0 kGy – 5,8 % and 3,0 kGy – 5,8%. The maximum values of this indicator were noted during the period of full ripeness of plants: control – 63,3 %, dose 2.0 kGy – 69,2 % and 3.0 kGy – 69,2 %. The prevalence of helminthosporiosis on the roots of 100 diurnal plants reached 100 % in all variants except the dose of 5 kGy.

Секция

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ**

**FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF RADIOECOLOGY
AND AGROECOLOGY**



РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРАСНОЙ ЯПОНСКОЙ СОСНЫ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛИМОРФИЗМА IRAP-МАРКЕРОВ

Бондаренко С.В.¹, Крылова П.С.¹, Смирнова Е.А.², Бондаренко Е.В.³, Бондаренко В.С.³, Гераськин С.А.³

¹ Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Россия

² Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Россия

³ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», г. Обнинск, Российская Федерация

При помощи IRAP-маркеров дана оценка молекулярно-генетического полиморфизма популяций красной японской сосны на радиоактивно загрязненных территориях в районе АЭС Фукусима-1. Наиболее высокий уровень средней гетерозиготности зафиксирован в популяции на самом загрязненном участке. Расположение популяций в дендрограмме, сформированной на основании кластерного анализа генетического разнообразия по методу UPGMA, коррелирует с дозовой нагрузкой на соответствующих участках.

Ключевые слова: сосна красная японская, хроническое облучение, авария на АЭС Фукусима, генетическая изменчивость, ретротранспозоны, IRAP-анализ

Аварии на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) в 1986 г. и на АЭС Фукусима-1 (Fukushima Dai-ichi) в 2011 г. являются крупнейшими в истории атомной энергетики. Попавшие в окружающую среду радионуклиды продолжают оказывать хроническое воздействие на биоту. Таким образом, радиэкологические исследования природных популяций растений в части исследования влияния хронического действия ионизирующего излучения на популяционном, организменном и молекулярном уровнях не утрачивают своей актуальности.

Цель исследования заключается в анализе полиморфизма IRAP-маркеров у красной японской сосны в отдаленный период после аварии на АЭС Фукусима и оценке изменений в генетической структуре хронически облучаемых популяций этого вида.

Объектом исследования является хвоя красной японской сосны (*Pinus densiflora* Siebold et Zucc).

Красная японская или густоцветковая сосна формирует монодоминантные леса в Японии, является радиочувствительным видом ($LD_{50} = 6$ Гр [1]) и показательным объектом для изучения радиационных эффектов.

Образцы хвои для выделения ДНК отбирали с 4 импактных (Ак, Т, S, О) и одного контрольного (F) участков префектуры Фукусима (Япония). Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы на контрольном участке составляет $0,25 \pm 0,05$ мкЗв \cdot ч⁻¹, а на импактных варьирует от $3,4 \pm 0,1$ до $6,4 \pm 0,4$ мкЗв \cdot ч⁻¹, в зависимости от участка (таблица 1) [2, 3]. Хвою без признаков усыхания отбирали на высоте 1,5–2 м с разных сторон дерева, лиофилизировали и в лиофилизированном состоянии пересылали в Россию, где хранили до выделения ДНК.

Таблица 1

Описание экспериментальных участков

Код участка	Описание участка	Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы, мкЗв \cdot ч ⁻¹ [2]	Кол-во деревьев	Возраст деревьев, лет
F	контрольный участок	$0,25 \pm 0,05$	11	5-10
Ак	зброшенное рисовое поле	$3,4 \pm 0,1$	9	6
Т	зброшенное поле	$3,5 \pm 0,3$	9	7
S	бывшая спортивная площадка	$3,7 \pm 0,4$	9	5
О	придорожный участок	$6,4 \pm 0,4$	11	8

Лиофилизированная хвоя гомогенизировалась при помощи TissueLyser II (Eppendorf, США). Выделение ДНК проводилось набором для выделения ДНК Сорб-ГМО-Б (Синтол, Россия) по протоколу производителя. Концентрация и качество полученных образцов ДНК оценивались при помощи спектрофотометра NanoDrop (Thermo Scientific, США).

Для генотипирования исследуемых популяций при помощи молекулярных маркеров использовались IRAP (Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism) праймеры (таблица 2) [4]. При проведении ПЦР отжиг праймеров осуществлялся по методу «touch down» (68 °C 1-ый цикл с понижением температуры в течение 16 циклов на 0,5 °C/цикл до температуры 60 °C, всего 60 циклов). Ампликоны разделяли с помощью электрофореза в 2 % агарозном геле в TAE буфере. Для визуализации ДНК использовался краситель SYBR Green и GelDoc Go Imaging System (BioRad). Использовались маркеры длин производства Евроген (ДНК 100+ bp DNA Ladder и ДНК 50+ bp DNA Ladder). На основе электрофореграмм составляли бинарные матрицы, которые использовались для расчета генетического расстояния (по методике [5]) с применением программы GenAlExv.6.5 [6]. На основе матрицы генетических расстояний в программе MEGA11 [7] с использованием метода UPGMA были построены дендрограммы.

Использованные IRAP маркеры разработаны к длинным концевым повторам дифференциально экспрессируемых ретротранспозонов, выделенных из сосны обыкновенной после воздействия теплового стресса и повреждений насекомыми [4].

Последовательность праймеров для IRAP анализа

Маркер	Последовательность 5' – 3'
IR_1	AACTTGGGGTTGACATACAACAGGCATCGA
IR_3	GTTCAAATCCCTTGTGGCT
IR_4	TTTCCAAAGTTTTGGGGCCAAGTTCGGGTT
IR_5	TTGAAGAAGGGCCAGAACCTAGTTCCTCCG
IR_7	CTGTGTGCGCCTATATTCCA
IR_9	ATCTGGGGCTTCTTTGGACT

Известно, что мобильные элементы составляют около 70–75 % от общего объема генома сосны обыкновенной (Voropova et al., 2011). Предполагается, что активация ретротранспозонов в условиях хронического облучения может привести к увеличению изменчивости популяций красной сосны, произрастающих вблизи Фукусимской АЭС.

Указанные маркеры были впервые использованы для анализа генетического полиморфизма экспериментальных популяций красной японской сосны. Всего было изучено 9 IRAP-маркеров, 6 из которых (таблица 2) оказались наиболее информативны. Суммарно проанализировано 108 ампликонов с длиной фрагментов от 150 до 1500 п.н. Паттерн полученных по 6 IRAP-маркерам ампликонов представлен на рисунке 1.

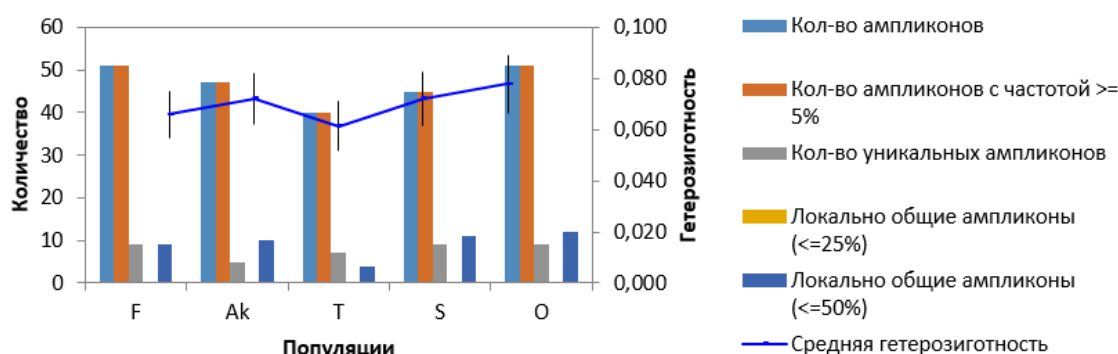


Рисунок 1. Распределение ампликонов, сгенерированных IRAP-праймерами, среди популяций красной японской сосны

Наибольшее количество ампликонов (51), в том числе уникальных (9), наблюдается сразу в двух популяциях: в контрольной F и в наиболее радиоактивно загрязненной популяции O (рисунок 1). По показателю средней гетерозиготности, который положительно коррелирует с уровнем приспособленности организмов, выделяется популяция O

($H_e=0,078 \pm 0,011$ по сравнению с $0,066 \pm 0,009$ в контрольной популяции).

Сравнение степени генетического разнообразия в популяциях по 6 IRAP-маркерам было проведено с использованием кластерного анализа по методу UPGMA (рисунок 2).

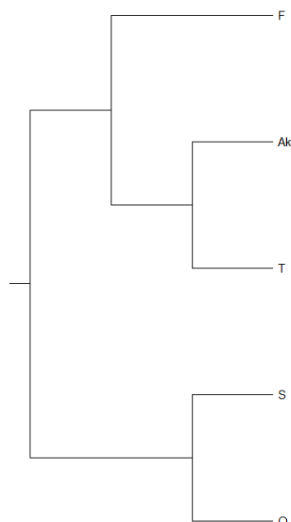


Рисунок 2. Дендрограмма популяций красной сосны по IRAP-маркерам (на основе генетического расстояния Нея)

На дендрограмме наблюдается кластеризация популяций красной сосны в соответствии с уровнем радиоактивного загрязнения. Популяции с двух наиболее загрязненных участков S и O объединены в одну подгруппу (таб. 1, рис. 2). Популяции с импактных участков Ak и T находятся в отдельной подгруппе. Контрольный участок формирует отдельную ветвь в кластере с импактными участками с относительно невысоким уровнем загрязнения (Ak и T).

Возможность адаптации к постоянно меняющимся условиям внешней среды определяется генетическим разнообразием природных популяций растений. Радиационное воздействие, как и другие стрессовые факторы окружающей среды, может изменять генетическую структуру популяций, что отчасти показано нашими результатами изучения полиморфизма IRAP маркеров.

Полиморфизм IRAP маркеров может свидетельствовать об активации ретротранспозонов в условиях хронического облучения. Используемые IRAP маркеры представляются перспективными для оценки генетического разнообразия природных

популяций красной японской сосны, произрастающих в зонах хронического радиационного воздействия.

Первый автор является победителем конкурса «BioSkills 2021: наука как образ жизни» и благодарит руководство ВНИИРАЭ за возможность выполнения исследований на базе ПЦР-лаборатории ВНИИРАЭ.

Список литературы

1. Sparrow A.H., Schwemmer S.S., Bottino P.J. The effects of external gamma radiation from radioactive fallout on plants with special reference to crop production // *Radiation Botany*. 1971. V. 11. P. 85–118.

2. Макаренко Е.С., Гераськин С.А., Йощенко В.И., Лыченкова М.А. Морфологические особенности хвои красной японской сосны в районе аварии Фукусимской АЭС // *Лесоведение*. 2021. №2. С. 123–131. DOI: 10.31857/S0024114821010071

3. Geras'kin S., Yoschenko V., Bitarishvili S. et al. Multifaceted effects of chronic radiation exposure in Japanese red pines from Fukushima prefecture. *Sci Total Environ*. 2021 Apr 1;763:142946. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142946.

4. Voronova A., Rungis D. Development and Characterisation of IRAP Markers from Expressed Retrotransposon-like sequences in *Pinus sylvestris* L. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, vol.67, no.6, 2014, pp.485-492. DOI: 10.2478/prolas-2013-0082.

5. Nei M., Li W.H. Mathematical Model for Studying Genetic Variation in Terms of Restriction Endonucleases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1979, 76, 5269-5273. DOI: 10.1073/pnas.76.10.5269

6. Peakall, R. and Smouse P.E. GenAEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics*, 2012, 28, 2537-2539.

7. Tamura K., Stecher G., Kumar S. MEGA 11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. *Molecular Biology and Evolution*. 2021. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>

RADIOECOLOGICAL ASSESSMENT OF JAPANESE RED PINE USING IRAP-MARKER POLYMORPHISM

Bondarenko S.V.¹, Krylova P.S.¹, Smirnova E.A.², Bondarenko E.V.³, Bondarenko V.S.³, Geras'kin S.A.³

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

²Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of the National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation

³Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The molecular genetic polymorphism of Japanese red pine populations in the radioactively contaminated areas near the Fukushima nuclear power plant was assessed employing IRAP markers, developed to retrotransposons from Scots pine. The highest level of mean heterozygosity was recorded in the red pine population from the most polluted area. The cluster analysis of genetic diversity using the UPGMA method revealed the distribution of the populations according to the level of ambient dose rate.

Keywords: Japanese red pine, chronic exposure, Fukushima accident, IRAP analysis, genetic diversity, retrotransposons

УДК 533.9.072

СВЧ ПЛАЗМОТРОН НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОДНОГО МОСТА

Горбатов С.А., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Тихонов А.В., Меджидов И.М.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail.com: gorbatovsa004@gmail.com

В последние десятилетия в связи с развитием СВЧ-технологий и массовым производством дешевых магнетронных генераторов появилось много публикаций по созданию и использованию СВЧ-плазмотронов атмосферного давления.

Ключевые слова: волноводный мост, СВЧ плазма, нетермальная плазма, циркулятор, плазмотрон

Классический СВЧ-плазмотрон состоит из прямоугольного волновода на волне H_{10} и диэлектрической разрядной трубки, проходящей через середину его широкой стенки. Устройство может быть подключено к СВЧ-генератору как по консольной, так и по проходной схеме [1, 2].

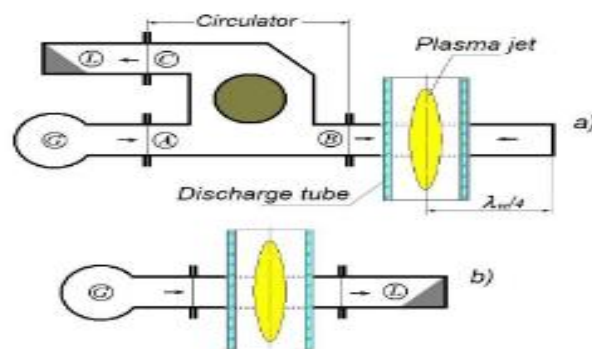
При консольном подключении волновод после газоразрядной трубки должен заканчиваться подвижным или неподвижным короткозамыкателем. Однако в случае отсутствия плазмы здесь необходима эффективная защита магнетрона от отраженных волн. На рисунке 1а микроволновая энергия от магнетронного генератора G питает струю плазмы в разрядной трубке плазмотрона, пройдя через плечи А и В циркулятора. Отраженная и неиспользованная часть энергии возвращается в плечо С циркулятора и поглощается в согласованной нагрузке L.

На рисунке 1б представлена проходная схема – волновод после разрядной трубки нагружен на согласованную нагрузку L и, таким образом, магнетрон G защищен от отражений без использования циркулятора. Однако при этом ухудшаются условия инициирования и поддержания разряда, а та часть энергии СВЧ, которая не поглощается плазмой, теряется в нагрузке.

Основная идея данной публикации состоит в том, чтобы заменить циркулятор, используемый в консольной схеме (рис. 1а), на трехдецибелльный волноводный мост (рис. 2). Такой мост делит мощность, поступающую в его входное плечо А, строго пополам между двумя выходными плечами В и D.

Его уникальное свойство состоит в том, что если оба выходных плеча такого моста нагружены любыми произвольными, но одинаковыми нагрузками,

то вся отраженная от них мощность пойдет в четвертое, развязанное плечо моста С.



Риснок 1. Подключение СВЧ-генератора G к плазмотрону по консольной (а) и проходной (б) схеме

Подключив согласованную нагрузку к развязанному плечу С, мы уберем СВЧ-генератор от перегрузок даже в случае очень значительных отражений (рис.2). На расстоянии четверти длины волны от короткозамкнутых концов этих волноводов, посередине их широких стенок и перпендикулярно им, помещается разрядная трубка. В предположении, что выходные плечи моста В и D будут нагружаться симметрично, отраженная от короткозамкнутых концов при отсутствии разряда или не поглощенная плазменной струей СВЧ-мощность будет возвращаться к развязанному плечу С моста и поглощаться согласованной нагрузкой L.

Основой такого устройства мы выбрали трехдецибелльный волноводный мост со связью по широкой стенке. Для расчета геометрических параметров и их

последующей оптимизации использовалась программа Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) для электродинамического моделирования СВЧ структур [3].

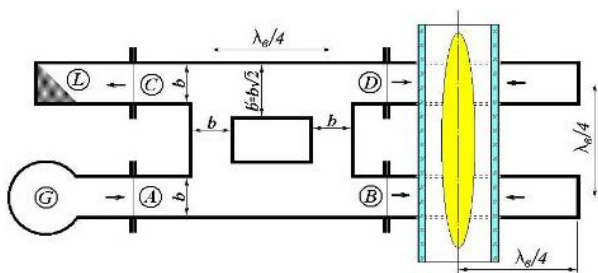


Рисунок 2. Диаграмма, отображающая основную идею данной публикации

В результате расчета геометрических параметров волноводного моста была разработана экспериментальная модель СВЧ-плазматрона.

На рисунке 3 показан рабочий момент огневых испытаний СВЧ-плазматрона на основе трехдецибелного волноводного моста. Рабочий газ – воздух, расход 20 л/мин, мощность СВЧ-генератора 2 кВт. Питающий волновод подключается снизу, а водяная нагрузка крепится к развязанному плечу моста сверху.



Рисунок 3. СВЧ-плазматрон на основе волноводного моста

К отверстиям в волноводах, через которые проходит газоразрядная трубка, приварены отрезки круглых запердельных волноводов. Это делается для подавления СВЧ-излучения при отсутствии плазменного разряда.

Испытания блестяще подтвердили возможность создания недорогого СВЧ-плазматрона на основе трехдецибелного волноводного моста без необходимости в сложном и дорогом циркуляторе для защиты магнетрона от возможных отражений СВЧ-энергии.

Найденное авторами решение проблемы признано изобретением, а авторские права защищены патентом РФ [4].

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 20-08-00894).

Список литературы

1. Moisan M., Pelletier J. (ed.): Microwave Excited Plasmas, Plasma Technology, 4, Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam-London-New York-Tokyo, 1992.
2. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Proceedings of the X International Workshop (MD-10). Zvenigorod, September 3-7, 2018. Moscow: Yanus-K, 2018. 268 p.
3. <http://anlge.umd.edu/HFSSv10UserGuide.pdf>
4. Тихонов В.Н., Тихонов А.В., Иванов И.А. СВЧ плазматрон // Р.Ф. патент № 2718715 от 15.08.2019 г.

PLASMATRON BASED ON A WAVEGUIDE BRIDGE

Gorbatov S.A., Tikhonov V.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V., Medzhidov I.M.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

In recent decades, in connection with the development of microwave technologies and the mass production of cheap magnetron generators, many publications have appeared on the creation and use of atmospheric pressure microwave plasma torches.

Keywords: *waveguide bridge, microwave plasma, non-thermal plasma, circulator, plasma torch*

УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ЦЕЗИЯ-137 В ПОБЕГАХ ТЕКУЩЕГО ГОДА ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ В КРОНЕ ПО ВЫСОТЕ И СТОРОНАМ СВЕТА

Горбунов И.Ю., Карпов А.Д., Поляков Р.К., Пророков А.А., Белов А.А.

ФБУ Всероссийский НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства
141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, 15, Российская Федерация
e-mail: info@roslesrad.ru

В статье изложены результаты исследования содержания цезия-137 в побегах текущего года ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в зависимости от положения в кроне по высоте и сторонам света. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показывают, что факторы положения побегов в кроне по высоте и сторонам света не оказывают существенного влияния на удельную активность Cs-137 в побегах.

Ключевые слова: ель европейская, радиоактивное загрязнение лесов, радиационный мониторинг лесов, Cs-137, распределение радионуклидов

Методика и материалы

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году радиоактивному загрязнению подверглись леса, расположенные на территориях 19 субъектов Российской Федерации. На сегодняшний день в Российской Федерации загрязнено около 1 млн. га земель лесного фонда [1-2].

Цель данной работы: изучить закономерность накопления Cs-137 в побегах текущего года ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в зависимости от их положения в кроне по сторонам света и высоте, провести статистический анализ и дать оценку полученных данных.

Объектом исследования является лесной участок на юго-западе Брянской области в зоне радиоактивного загрязнения чернобыльского происхождения с плотностью загрязнения почвы Cs-137 на момент аварии более 40 Ки/км² (зона отселения населенного пункта Святск), в настоящее время плотность загрязнения почвы составляет около 20 Ки/км² (740 кБк/м²).

Данный участок расположен в 207 квартале Новозыбковского участкового лесничества Злынковского лесничества управления лесами Брянской области. Участок представляет собой лесные культуры смешанного породного состава, созданные в год аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.). Состав насаждения – 3Д3Е2С2Б. Культуры создавались кулисами по 3 ряда основных пород (Дуб, Сосна, Ель), с расстоянием между рядами 3 м.

На пробной площадке были выбраны 4 модельных деревьев ели европейской, близкие по высоте. Под каждым деревом производился отбор почвы для определения плотности загрязнения. С помощью высотного и обычного секатора с каждого дерева производился равномерный отбор побегов по высотам: с 1,3 м, 3,5 м, 7 м, каждый ярус так же позиционировался по сторонам света: южной, восточной и северной,

западная сторона не отбиралась, ввиду сильного отпада из-за близости соседнего ряда. Каждая проба паспортизировалась и складывалась в отдельный пакет, далее высушивалась до воздушно-сухого состояния, взвешивалась, измельчалась для получения однородной счётной пробы.

Измерение содержания Cs-137 в счётных образцах проводилось с использованием гамма-спектрометрического комплекса на основе полупроводникового HPGe детектора с размером чувствительной области 59х65 мм, позволяющим проводить измерения с минимальной измеряемой активностью Cs-137 в пробе от 0,3 Бк. Ошибка измерений Cs-137 в пробах не превышала 10 %.

Статистический анализ неравномерности Cs-137, проводился с помощью программного пакета Statistica v.12.

Результаты и обсуждение

При проведении измерений содержания Cs-137 в каждом модельном дереве были получены, следующие результаты, представленные в таблице 1.

Нами были сформулированы две гипотезы:

- уровень расположения в кроне побегов не влияет на удельную активность в них;
- зависимость стороны света не влияет на удельную активность в побегах

Для проверки данных гипотез, была произведена статистическая обработка полученных данных, с применением метода двухфакторного дисперсионного анализа. Данный метод позволяет определить значимость различий для нескольких независимых факторов. В нашем случае этими факторами выступают уровень расположения побегов к кроне и направленность их по сторонам света.

На рисунке 1 и в таблице 2, представлены результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 1.

Из полученных результатов можно видеть, что значение **F эмпирическое** меньше значения **F критического** (рассчитанного для вероятности 5%), как для фактора уровня расположения побегов в кроне, так и для направленности по сторонам, следовательно, оба

эти фактора не оказывают существенно влияние на удельную активность в побегах.

На рисунках 2, 3, 4 и в таблицах 3, 4, 5 также показаны результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельных деревьев №2, №3, №4 соответственно. Полученные результаты, схожи с результатом по модельному дереву №1, значение **F эмпирическое** меньше значения **F критического** для каждого фактора у всех модельных деревьев.

Таблица 1

Удельная активность Cs-137 в побегах для трех сторон света и разного уровня расположения в кроне в четырёх модельных деревьях (Бк/кг)

№ модели	Восток				Север				Юг			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Нижний ур.	640	330	260	310	610	620	240	370	640	380	500	370
Средний ур.	670	730	280	300	540	310	500	400	660	310	490	520
Верхний ур.	530	370	210	440	900	430	290	360	960	190	300	370

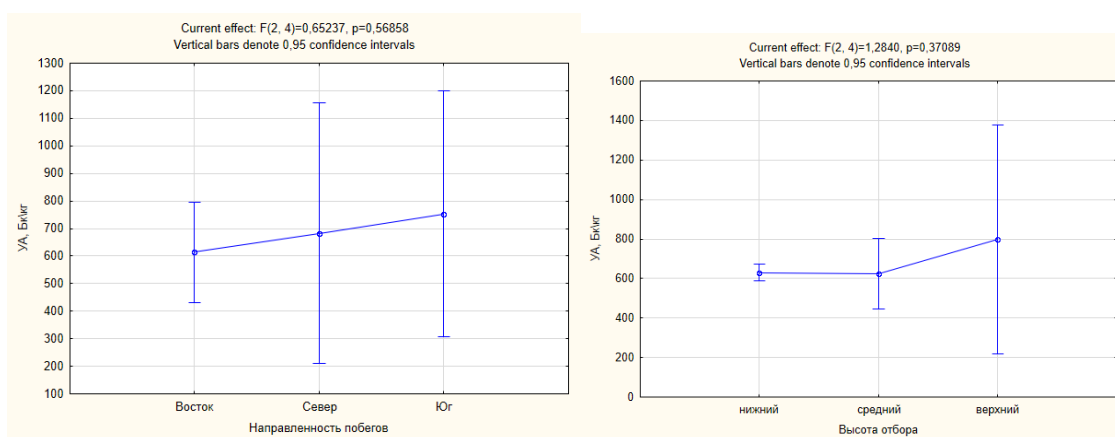


Рисунок 1. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 1

Таблица 2

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 1

Источник вариации	SS	df	MS	F эмпирическое	P -Значение	F критическое
Высота отбора	57866,67	2	28933,3	1,28	0,37	6,94
Направ. побегов	29400	2	14700	0,65	0,57	6,94
Погрешность	90133,33	4	22533,3			
Итого	177400	8				

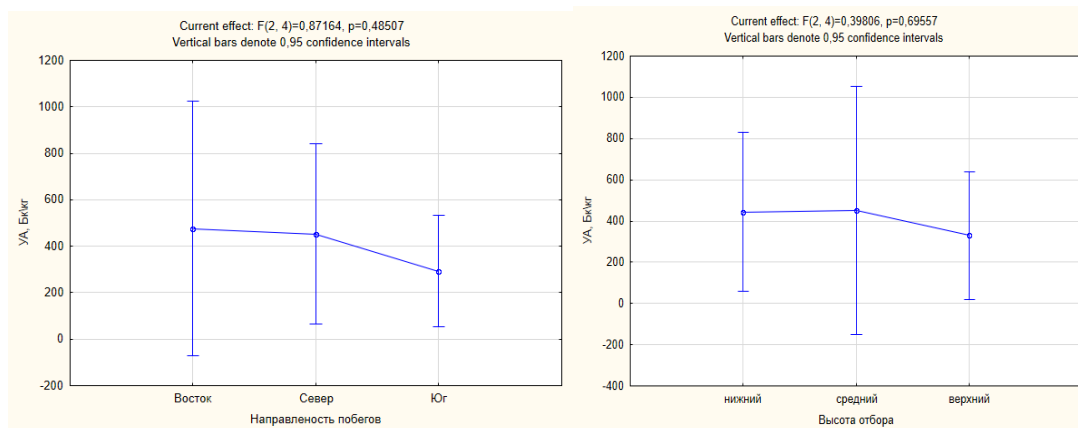


Рисунок 2. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 2

Таблица 3

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 2

Источник вариации	SS	df	MS	F эмпирическое	P -Значение	F критическое
Высота отбора	27288,89	2	13644,44	0,39	0,69	6,944
Направ. побегов	59755,56	2	29877,77	0,87	0,48	6,944
Погрешность	137111,1	4	34277,77			
Итого	224155,6	8				

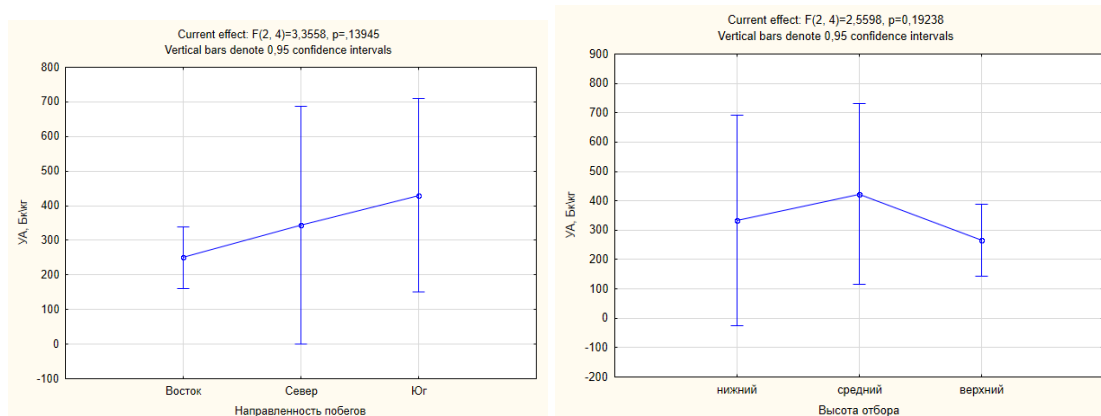


Рисунок 3. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 3

Таблица 4

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 3

Источник вариации	SS	df	MS	F эмпирическое	P -Значение	F критическое
Высота отбора	37088,89	2	18544,44	2,55	0,19	6,944
Направ. побегов	48622,22	2	24311,11	3,355	0,13	6,944
Погрешность	28977,78	4	7244,44			
Итого	114688,9	8				

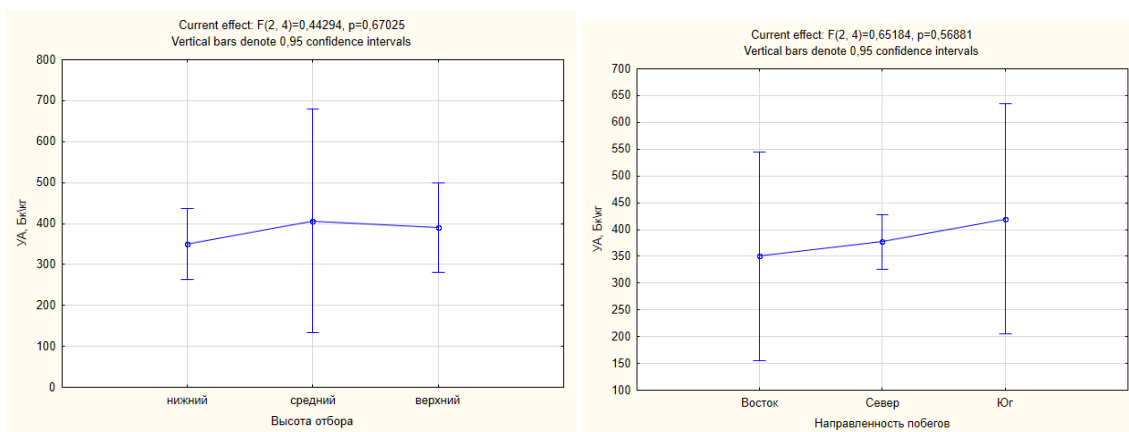


Рисунок 4. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 4

Таблица 5.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для модельного дерева № 4

Источник вариации	SS	df	MS	F эмпирическое	P -Значение	F критическое
Высота отбора	5088,88	2	2544,44	0,44	0,67	6,944
Направ. побегов	7488,88	2	3744,44	0,65	0,56	6,944
Погрешность	22977,78	4	5744,44			
Итого	35555,56	8				

Выводы

В результате проведенного статистического анализа на четырёх модельных деревьях, можно сделать вывод, что гипотезы о том, что уровень расположения побегов в кроне и их направленность по сторонам света не влияет на удельную активность, является верной.

Настоящая работа проведена в качестве подготовительного этапа для проведения серии фенологических наблюдений по изменчивости содержания Cs-137 в побегах ели европейской. Проведенное

исследование показывает, что проводить отбор проб побегов возможно в любой части кроны.

Список литературы

1. *Переволоцкий А.Н.* Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель, 2006. 256 с. ил.
2. *Мамихин С.И., Тихомиров Ф.А., Щеглов А.И.* Динамика содержания ^{137}Cs в лесных биогеоценозах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Экология*. 1994. № 2. С. 43–49.

THE SPECIFIC ACTIVITY OF CAESIUM-137 IN THE SHOOTS OF THE CURRENT YEAR OF THE EUROPEAN SPRUCE (PICEA ABIES (L.) KARST.), DEPENDING ON THE POSITION IN THE CROWN IN HEIGHT AND CARDINAL DIRECTIONS

Gorbunov I.Yu., Karpov, A.D., Polyakov R.K. Prorokov A.A., Belov A.A.

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Pushkino, Moscow Oblast, Russian Federation

The article presents the results of a study of the content of cesium-137 in the shoots of this year's European spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), depending on the position in the crown in height and cardinal directions. The results of two-factor analysis of variance show that the factors of the position of shoots in the crown in height and cardinal directions do not significantly affect the specific activity of Cs-137 in shoots.

Keywords: *European spruce, radioactive contamination of forests, radiation monitoring of forests, Cs-137, distribution of radionuclides*

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СОРТОВОЙ СТРЕССОУСТОЙЧИВОСТИ ЯРОВОГО ДВУРЯДНОГО ЯЧМЕНЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Дикарев А.В., Битаршвили С.В., Казакова Е.А., Гераськин С.А.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: ar.djuna@yandex.ru

На дерново-подзолистой супесчаной почве, в которую вносили кадмий в дозах 50 и 25 мг/кг, проведен вегетационный эксперимент. Для работы использовали 4 сорта ярового ячменя, которые, как было показано ранее, обладают разной устойчивостью к кадмию. Влияние кадмия оценивалось по морфометрическим, физиолого-биохимическим показателям, продуктивности и накоплению Cd^{2+} . Выявлено, что продуктивность и морфометрические показатели были значимо выше у устойчивых к Cd^{2+} сортов. Так же отмечено, что у этих сортов выше активность ряда ферментов, связанных с устойчивостью к стрессу. В целом, хотя и не во всех случаях, чувствительные сорта продемонстрировали падение содержания ростовых гормонов, и усиление синтеза стрессовых. Накопление МДА и пролина не позволило четко дифференцировать сорта по ответу на действие кадмия. Главным образом описанные эффекты выявляются при дозе кадмия 50 мг/кг, но слабо выражены при 25 мг/кг.

Ключевые слова: кадмий, ячмень, контрастные по устойчивости сорта, морфометрические и биохимические параметры, продуктивность

Кадмий, будучи одним из наиболее опасных и распространенных тяжелых металлов (ТМ), способен серьезно ограничивать продуктивность сельского хозяйства, что предопределяет необходимость исследования его воздействия на растительные организмы [1]. Особенно актуальна задача поиска таких сортов основных с/х культур, которые бы обладали повышенной устойчивостью к кадмию; также важно исследование механизмов формирования этой устойчивости. ТМ вызывают токсический стресс посредством разнообразных механизмов, в частности, благодаря развитию окислительного стресса. Необходимость приспособляться к этому стрессу предопределила формирование систем антиоксидантной защиты, в которую вовлечены как низко- так и высокомолекулярные соединения. К первым относят такие соединения, как пролин, ко вторым – различные антиоксидательные ферменты. Наличие ионов ТМ в среде поразному влияет на синтез этих соединений, и, оценивая их активность и содержание, можно судить об уровнях стресса и устойчивости к нему [2]. Кроме того, указанные биохимические параметры определяют процессы роста и развития растений, поэтому оценка морфометрических параметров и продуктивности может также дать ценную информацию об устойчивости растений. В качестве подходящего тест-объекта для подобных исследований удобен ячмень. Данная культура известна с глубокой древности и широко возделывается по всему миру, при этом она хорошо изучена на всех уровнях организации растения.

В связи с вышесказанным была поставлена цель исследования: оценить в условиях вегетационного

опыта на основе физиолого-биохимических и морфометрических показателей воспроизводимость результатов по изучению сортоустойчивости ячменя к кадмию, полученных в лабораторном эксперименте.

Материалы и методы

Вегетационный эксперимент был заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве. Были взяты устойчивые к Cd^{2+} сорта ячменя – Симфония и Местный; и чувствительные – Са 220702 и Malva. Процедура отбора этих сортов подробно описана в работе [3]. Растения выращивали в пластиковых сосудах емкостью 5 кг по общепринятой методике [4]. Дозы $Cd(NO_3)_2$, внесенные в почву, составляли 25 мг/кг и 50 мг/кг. Повторности опыта составили для 50 мг/кг 4-х кратную (также и в контроле), а для 25 мг/кг – 2-х кратную, итого 40 сосудов. В почву вносили NH_4NO_3 и K_2HPO_4 в соотношении $N_{200}P_{25}K_{33}$ [4; 5]. Количество азота корректировалось с учетом его содержания в соли кадмия. Почву с внесенными солями предварительно выдерживали 14 суток при температуре 20-23°C и влажности 60% ПВ. Продолжительность эксперимента составила 90 суток, растения поливали дистиллированной водой до 60% ПВ. На 30-е и 50-е сутки отбирали пробы листьев для биохимических анализов (содержание свободного пролина [6], малонового диальдегида (МДА) [7], фитогормонов [8] и активность ферментов [9]). По 10 растений оставляли до созревания. После достижения товарной спелости оценивали массу соломы, массу зерна и массу 1000 зерен; также определяли накопление кадмия в надземной биомассе. Статистическую обработка

производилась с применением программных пакетов MS Excel 2003 и Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение

В настоящем разделе рассматриваются данные, полученные для дозы кадмия 50 мг/кг, поскольку доза 25 мг/кг не позволила уверенно дифференцировать сорта на устойчивые и чувствительные. Различия между контрольным вариантом и растениями, выращенными на загрязненной кадмием почве, отчетливо выявлялись уже на 30 день опыта. Отмечалось, что чувствительные сорта демонстрировали значимо большее угнетение, чем устойчивые. Площадь листьев и биомасса у устойчивых сортов была существенно больше таковой у чувствительных. Параметр высота растений не позволил выявить межсортных различий.

Исследование содержания МДА не обнаружило различий между группами контрастных по устойчивости к кадмию сортов. Тоже можно сказать и о накоплении пролина, при этом оно в среднем по сравнению с контролем возрастало в 2-7 раз. Отмечено, что у чувствительного сорта Са 220702 содержание пролина было минимальным, при этом у другого чувствительного сорта Malva таковое оказалось максимальным среди всех сортов.

Воздействие кадмия вело к снижению содержания фитогормонов роста в зеленой части растений (ИМК и ИУК – от 10 до 50 % от контроля) в то же время стрессовых вырабатывалось больше (АБК, СК – от 200 до 600% от контроля). Эти процессы отмечались уже на 30 день эксперимента, достигая максимума на 50-й. Выявлены некоторые, хотя и не существенные, сортовые различия в содержании гормонов. Например, на 50 день эксперимента у устойчивого сорта Местный по сравнению с чувствительными сортами уровни АБК и СК были в 2-3 раза ниже, а ИМК накапливался у него в 2-11 раз в больших количествах. Другой устойчивый сорт Симфония демонстрировал сходные с чувствительными сортами уровни АБК и СК, но вот накопление ИМК и ИУК у него было близким к контролю. Это отличало его от чувствительного сорта Malva, у которого содержание ростовых гормонов было крайне низким.

На 30 день опыта отмечался некоторый рост активности всех исследованных ферментов у всех сортов, но на 50 день выявлялись сортовые различия. В то время как у устойчивых сортов уровни активности сохранялись на близких к контрольным уровням или даже превышали таковые, то у чувствительных активность ферментов падала. Следует отметить устойчивый сорт Симфония: уровни активности почти всех энзимов у него превосходили показатели чувствительных сортов в 2-3,5 раз. Отмечено, что у устойчивого сорта Местный активность пероксидазы в 2 раза превышала этот показатель для обоих чувствительных сортов. Уровни активности остальных ферментов у этого сорта также превосходили результаты, полученные для чувствительных сортов.

Оценка структуры урожая наглядно показала, что воздействие кадмия привело к значительному сокращению продуктивности чувствительных сортов, в то время как устойчивые переносили стресс куда легче. Например, устойчивые сорта дали зерна по массе в 2-4 раза больше, чем чувствительные. Масса соломы оказалась не столь наглядным показателем: в то время как сорт Местный значимо опережал чувствительные сорта по этому показателю, то для сорта Симфония получены сходные с чувствительными сортами данные. Масса 1000 зерен не выявила сортовых различий. Уровни накопления кадмия в надземной биомассе были у устойчивых сортов значимо ниже, чем у чувствительных (в 2-4 раза для зерна и в 1,3-2,5 раза для соломы).

Выводы

По итогам выполненной работы можно утверждать, что особенности ответа растений ячменя, выявленные в рамках лабораторного эксперимента, в целом воспроизводились в условиях вегетационного опыта. Наиболее информативные данные получены при дозе кадмия 50 мг/кг, в то время как 25 мг/кг была недостаточна для получения надежных результатов. Морфометрические параметры четко дифференцировали группы контрастных по устойчивости к кадмию сортов. Данные по накоплению МДА и пролина не позволили выявить сортовых различий. Более интересные результаты дала оценка содержания фитогормонов и активности ферментов: в нескольких случаях по этим параметрам устойчивые сорта демонстрировали лучшую сопротивляемость стрессу, чем чувствительные. При этом начинали обнаруживаться эти эффекты на 30 день, но наибольшей манифестации достигали на 50-й. Обнаружено, что чувствительные сорта накапливали кадмий в надземной биомассе в гораздо большей концентрации, чем устойчивые.

Собранные данные улучшают понимание механизмов формирования ответа растительных организмов на воздействие техногенного стресса. Эти результаты имеют ценное фундаментальное и прикладное значение в плане поиска генетических ресурсов для селекционной работы, направленной на выведение таких сортов основных сельскохозяйственных культур, которые бы обладали не только повышенной устойчивостью к ТМ, но и не накапливали их в опасных количествах в своей товарной части. Собранные данные также могут быть полезны для создания методологии оценки состояния природных и аграрных экосистем в условиях все возрастающего загрязнения окружающей среды.

Список литературы

1. Seregin I.V., Shpigun L.K., Ivaniov V.B. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots // Russ. J. Plant Physiol. 2004. V.51. P. 525 – 533.

2. Correa A.X. da R., Rorig L.R., Verdinelli M.A. Cadmium phytotoxicity: quantities sensitivity relationships between classical endpoints and antioxidative enzyme biomarkers // Science of the total environment. 2006. V. 357. P. 120–127.

3. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца // Сельскохозяйственная биология. 2014. №5. С. 78–87.

4. Журбицкий З. И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.

5. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.

6. Bates L.S., Waldern R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant and Soil. 1973. V. 39. №1. P. 205–207.

7. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. V. 125. №1. P. 189–198.

8. Шакирова Ф.М. Неспецифическая устойчивость растений к стрессовым факторам и ее регуляция. Уфа: Гилем, 2001. 160 с.

9. Биссвангер Х. Практическая энзимология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 328 с.

THE RESEARCHING OF THE SPRING BARLEY VARIANTS STRESS-TOLERANCE FORMATION ON THE BASE OF PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS

Dikarev A.V., Bitarichvili S.V., Kazakova E.A., Geras'kin S.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

A vegetative experiment on the sand-loamy podzol soil was completed with the Cd²⁺ 25 and 50 mg/kg added. Four barley variants, which have contrasting reactions to the cadmium stress, were taken for this work. It were assessed such parameters as: plants height, biomass, leaves square; proline, MDA, hormones content and enzyme activity at tissues; straw and grains mass, 1000 grains mass. Also the Cd²⁺ content in the straw and grains was assessed. Cadmium tolerant variants have higher values of the morphometrical parameters and productivity. A connection between MDA and proline content and sensitivity to the Cd²⁺ stress wasn't found. The activity of the antioxidant enzymes in the tissues of the Cd²⁺ tolerant variants was significantly higher. It was noticed, that under the cadmium stress content of the stress hormones is raised, but the content of the growing ones is decreased. Such effects were relevant for Cd²⁺ 50 mg/kg, but the dose of 25 mg/kg wasn't enough for differentiation. The sensitive barley variants have a tendency to Cd²⁺ accumulation in amounts, which are higher, than in the tolerant ones.

Keywords: *cadmium, spring barley, cadmium contrasting variants, morphometric and biochemical parameters, productivity*

УДК 543.53

ВОЗМОЖНОСТИ ФГУП «ВНИИФТРИ» ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ И КАЛИБРОВКЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕР АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ

Дьячкова В.Г., Крайнова М.Д., Лялин В.И.

ФГУП «ВНИИФТРИ», 141570 Московская область, Солнечногорский р-н, п/о Менделеево, Российская Федерация
e-mail: kmd@vniiftri.ru

Обеспечение единства и достоверности измерений активности радионуклидов в объектах окружающей среды является важной задачей, поскольку позволяет существенно уменьшить погрешность средств измерений и предотвратить получение недостоверных результатов измерений. Одним из основных видов деятельности научно-исследовательского отделения метрологии и ионизирующих излучений (НИО-4) Всероссийского научно-

исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений («ВНИИФТРИ») является разработка и изготовление всевозможной радионуклидной продукции, в том числе различных имитантов радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды, ядерных и строительных материалов, продуктов сельского хозяйства. Данные имитанты могут быть получены как в виде монолитных, так и гранулированных объемных образцов с варьируемыми параметрами (радионуклидный состав, дисперсность гранул, насыпная плотность).

Ключевые слова: *ионизирующее излучение, спектрометрия, метрология, имитанты, меры активности*

Указанные имитанты радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды находят широкое применение в целях метрологического обеспечения радиометрических и спектрометрических средств измерений, так как позволяют поверять, калибровать и градуировать измерительную аппаратуру в условиях, наиболее приближенных к реальным, а не путём пересчёта из одной геометрии измерений в другую, что вносит существенную дополнительную погрешность в результаты измерений [1].

Изготовление специальных мер активности радионуклидов (источников специального назначения) осуществляется как под конкретные нужды Заказчика так и в виде средств измерений утвержденного типа - источники радионуклидные фотонного излучения метрологического назначения закрытые ИМН-Г, внесенные в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений под № 44591-10 [2] и выпускаемые по ТУ [3].

Источники ИМН-Г предназначены для использования в качестве эталонных и рабочих мер активности (удельной, объемной активности) при градуировке энергетической шкалы и чувствительности гамма-радиометрических и спектрометрических установок, а также для применения в качестве контрольных мер активности в составе средств измерений.

Изготавливаемые в ФГУП «ВНИИФТРИ» меры активности можно условно разделить на 4 группы, которые и определяют геометрию измерения, т.е. взаимное расположение исследуемого объекта и блока детектирования радиометрического или спектрометрического средства измерений, и представляют собой радиоактивное вещество в определенном конструктивном оформлении. Источники закрытые, конструкция гарантирует отсутствие загрязнения окружающей среды и оборудования при использовании их в предусмотренных условиях эксплуатации.

К 1-й группе относятся точечные источники излучения, активная часть которых выполнена локализованным нанесением аликвоты раствора нуклида известной удельной активности на подложку с последующей герметизацией.

Ко 2-й группе источников относятся поверхностные источники, активная часть которых выполнена равномерным распределением раствора нуклида

известной удельной активности на поверхности подложки с последующей герметизацией.

К 3-й группе источников относятся объемные источники твердотельные, активная часть которых выполнена равномерным распределением раствора нуклида известной удельной активности в объеме источников с последующей герметизацией. Объем источника может быть организован металлическими или органическими формами. Источник также может быть изготовлен при помощи временной формы с последующим ее удалением.

К 4-й группе источников относятся объемные источники насыпные гранулированные, состоящие из герметизированных гранул с равномерно распределенным внутри них радионуклидом или смесью радионуклидов.

При изготовлении специальных мер активности радионуклидов в качестве основы источника, т.е. его матрицы, может быть использован практически любой материал, характеризующий различные объекты природной среды:

- сельскохозяйственная продукция (зерновые и зернобобовые культуры, мука, крупы, семена, сянцы, чай, пряности и т.д.),
- строительный материал (песок, цемент, бетон, щебень и т.д.),
- почва.

При изготовлении специальных мер активности радионуклидов, которые должны быть имитантами проб воды, воздуха, почвы, пищевых продуктов, растений и т.п., основой является эпоксидная смола с известным содержанием активности, а степень эквивалентности реальным пробам определяется плотностью источника:

- для насыпных имитантов плотность может варьироваться в пределах 0,5–2,4 г/см³.
- для твердотельных имитантов, которые размещаются в сосуде заданной формы, плотность может варьироваться в пределах 0,05–2,4 г/см³.

Перечень радионуклидов, на основе которых могут быть изготовлены меры активности представлен в таблице 1.

Приведенный в таблице 1 перечень не является полным.

Метрологические и технические характеристики источников приведены в табл. 2 [1].

Таблица 1

Радионуклид	Период полураспада ($T_{1/2}$)	Радионуклид	Период полураспада ($T_{1/2}$)	Радионуклид	Период полураспада ($T_{1/2}$)
²⁰⁷ Bi	32,9 лет	²³⁹ Pu	2,411·10 ⁴ лет	⁹⁴ Nb	2,03·10 ⁴ лет
¹³³ Ba	10,51 лет	⁵⁴ Mn	291 сут	¹⁵³ Gd	241,6 сут
¹³⁷ Cs	30,17 лет	¹⁰⁹ Cd	461,4 сут	²⁴⁹ Cf	351 лет
⁴⁴ Ti	60,0 лет	⁵⁷ Co	271,74 сут	¹³⁹ Ce	137,641 сут
²² Na	2,6 лет	⁶⁵ Zn	243,66 сут	¹⁴⁴ Ce	284,91 сут
²⁴¹ Am	432,6 лет	⁸⁸ Y	108,1 сут	¹⁰⁶ Ru+ ¹⁰⁶ Rh	373,59 сут
²²⁶ Ra	1600 лет	¹¹³ Sn	115 сут	¹³⁴ Cs	2,0648 лет
²³² Th	1,4·10 ¹⁰ лет	¹⁸⁸ W	69,4 сут	²⁴³ Am	7,37·10 ³ лет
⁴⁰ K	1,248·10 ⁹ лет	⁶⁰ Co	5,2713 лет	²²⁸ Th	1,9116 лет
⁹⁰ Sr	28,79 лет	¹⁵² Eu	13,537 лет	²³⁷ Np	2,144·10 ⁶ лет
³⁶ Cl	3,1·10 ⁵ лет	⁵⁵ Fe	2,737 лет		

Таблица 2

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон энергий фотонного излучения, кэВ	от 4 до 6130
Диапазон воспроизведения активности (ИМН-Г-1, ИМН-Г-2), Бк	от 1 до 1·10 ⁶
Диапазон воспроизведения удельной (объемной) активности (ИМН-Г-3-Т, ИМН-Г-3-Н), Бк/кг (Бк/л)	от 1 до 1·10 ⁶
Диапазон воспроизведения внешнего гамма-излучения с E=6,13 МэВ (ИМН-Г-3-В) в угле 4л ср, с ⁻¹	от 300 до 3000
Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения активности, %	± 5 (ИМН-Г-1) ± 10 (ИМН-Г-2)
Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения удельной (объемной) активности (при доверительной вероятности 0,95), %	± 20
Пределы допускаемой относительной погрешности воспроизведения внешнего гамма-излучения (при доверительной вероятности 0,95), %	± 20
Неравномерность распределения активности по поверхности (по объему), %, не более	5 (ИМН-Г-2) 2 (ИМН-Г-3-Т) 2 (ИМН-Г-3-Н)
Габаритные размеры (диаметр × высота), мм, не более	
ИМН-Г-1, ИМН-Г-2	50 × 3
ИМН-Г-3-В	15 × 30
Масса ИМН-Г-1, ИМН-Г-2, ИМН-Г-3-В, кг, не более	0,1
Средний срок службы после ввода в эксплуатацию, лет	от 5 до 20
Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающего воздуха, °С - относительная влажность при температуре воздуха 30 °С, % - атмосферное давление, кПа	от - 50 до 50 до 95 от 25 до 500

Источники подвергаются приемо-сдаточным и периодическим испытаниям, в ходе которых проверяется соответствие характеристик источников предъявляемым требованиям.

Таким образом, обеспечение современного парка спектрометрических средств измерения ионизирующих излучений объёмными эталонными источниками, которые имитируют реальные пробы окружающей среды, загрязненные радионуклидами, позволяет избежать существенного увеличения погрешности средств измерений и принятия на основании

недостовверных результатов измерений неверных решений при работе с источниками ионизирующего излучения.

Список литературы

1. Саркисов Э.Р. Эталоны единицы активности радионуклидов ВНИИФТРИ и метрологическое обеспечение радиационной экологии. - Сб. научн. трудов ВНИИФТРИ, 2005 г., вып. 52 (144), с. 74.

2. Источники радионуклидные фотонного излучения метрологического назначения закрытые ИМН-Г. [Электронный ресурс] / Сведения об утвержденных типах средств измерений - Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Электрон. текст. дан. Режим доступа:

http://www.fundmetrology.ru /10_tipy_si/11/7list.aspx, свободный.

3. МГФК.412128.001 ТУ. Источники радионуклидные фотонного излучения метрологического назначения закрытые ИМН-Г. Технические условия. – ФГУП «ВНИИФТРИ», 2005.

POSSIBILITIES OF FSUE «VNIIFTRI» FOR THE MANUFACTURE AND CALIBRATION OF SPECIAL MEASURES OF RADIONUCLIDE ACTIVITY FOR METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS OF RADIONUCLIDE ACTIVITY DURING RADIATION MONITORING

Dyachkova V.G., Kraynova M.D., L`yalin V.I.

All-Russian Scientific Research Institute of Physicotechnical and Radio Engineering Measurements, Moscow Region, Mendeleevo, Russian Federation

Measuring the activity of radionuclides is one of the most popular directions in the field of ionizing radiation measurements. The fact that ensuring the unity and reliability of measurements of the activity of radionuclides is the most important task is obvious. Radionuclide sources of ionizing radiation for metrological purposes are necessary for the calibration and graduation of radiometers and spectrometers and are also used as control sources. VNIIFTRI develops and manufactures various types of metrological sources: point sources, surface sources, simulators of radioactively contaminated environmental objects, which, in turn, are divided into solid-state and bulk sources. The use of these sources avoids a significant increase in the error of measuring instruments.

Keywords: *ionizing radiation, spectrometry, metrology, simulators, activity measures*

Ensuring the unity and reliability of measurements of the activity of radionuclides in environmental objects is an important task, since it allows to significantly reduce the error of measuring instruments and prevent obtaining unreliable measurement results. One of the main activities of the Research Department of the Metrology of ionizing radiation of the All-Russian Scientific Research Institute of Physicotechnical and Radio Engineering Measurements (VNIIFTRI) is to develop and produce the certified reference material (CRM)/measure of all kinds of possible radionuclide products, including various simulators of radioactive contamination of environmental objects, nuclear and construction materials, agricultural products. These emitters can be obtained both in the form of monolithic and granular bulk samples with variable parameters (radionuclide composition, granule dispersion, bulk density). These simulators of radioactive contamination of environmental objects are widely used for metrological support of radiometric and spectrometric measuring instruments, as they allow to verify, calibrate and calibrate measuring equipment in conditions closest to real, and not by recalculation from one measurement geometry to another, which introduces a significant additional error in the measurement results [1].

The special activity measures/CRMs for radionuclides (special purpose sources) are prepared both the measure of the approved type - metrological sealed photon radiation sources (MS-G), inscribed in the

Federal Information Fund on Uniformity of Measurements under 44591-10 and produced in accordance to the specifications, and for specific needs of the customer according to particular specifications.

The MS-G sources are intended for use as reference and working measures of activity (specific and volumetric activities) for calibration of energy scale and sensitivity of gamma-radiometric and spectrometric units, and for use as control ones as a part of measuring instruments.

Activity measures manufactured at VNIIFTRI can be conditionally divided into 4 groups, which determine the measurement geometry, i.e. mutual location of the object under study and the detection unit of the radiometric or spectrometric measuring instrument, and represent a radioactive substance in a particular design. Sources are closed, the design ensures that they do not contaminate the environment or equipment when used under the intended operating conditions.

The first group includes point radiation sources, the active part of which is made by localized application of an aliquot of a nuclide solution of known specific activity to a substrate, followed by sealing.

The second group of the sources includes surface sources, the active part of which is made by uniform distribution of a nuclide solution of known specific activity on the surface of the substrate, followed by sealing.

The third group of the sources includes bulk solid-state sources, the active part of which is made by uniform distribution of a nuclide solution of known specific activity in the volume of the sources with subsequent sealing. The source volume may be organized by metal or organic forms. The source can also be made by means of a temporary mold, followed by its removal.

The 4th group of sources includes bulk granular sources consisting of sealed granules with

radionuclides or radionuclide mixtures evenly distributed inside them.

Thus, providing the modern fleet of spectrometric measuring instruments for ionizing radiation with volumetric reference sources that simulate real environmental samples contaminated with radionuclides avoids a significant increase the error of measuring instruments due to matrix affect and making false decisions based on unreliable measurement results.

УДК: 574:2:539.1.04

ВОЛНОВОЙ ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ CS-137 В СТВОЛЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Карпов А.Д., Горбунов И.Ю., Калнин В.В., Раздайводин А.Н., Радин А.И.

ФБУ ВНИИЛМ, Пушкино, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: info@roslesrad.ru

В статье рассмотрено распределение Cs-137 по высоте ствола в коре и древесине двух модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), 36 и 70 лет, отобранных в зонах радиоактивного загрязнения Брянской области, с плотностью загрязнения почвы Cs-137 11 и 20 Ки/км². Установлено, что и в коре, и древесине исследуемых деревьев распределение Cs-137 носит волнообразный характер и может быть представлено как гармонические колебания с периодом около 1 м. Смещение волны в коре второго модельного дерева свидетельствует о том, что волна является не стоячей, а смещается с возрастом дерева. При этом период колебаний остается постоянным. В системе поступления и распределения питательных веществ по стволу сосны Cs-137, вероятнее всего, выступает в роли радиотрейсера других химических элементов.

Ключевые слова: радиоэкология, цезий, распределение радионуклидов, концентрационные волны, сосна обыкновенная

Введение

Настоящая работа является продолжением изучения вопросов вертикального распределения Cs-137 в стволе сосны обыкновенной [1]. Основные направления исследовательских работ в данной области сфокусированы преимущественно на отборе точечных проб в различных структурных частях дерева: ствол, корни, кора, древесина, ветки, листья/хвоя [2-3]. Целью данного исследования является детальное изучение закономерностей распределения Cs-137 как в коре, так и в древесине сосны обыкновенной на примере двух модельных деревьев разных возрастов.

Материалы и методы

Для изучения распределения Cs-137 в стволе сосны обыкновенной первое модельное дерево было отобрано в Злынковском лесничестве Брянской области, возрастом около 36 лет. Плотность загрязнения почвы Cs-137 на лесном участке составила 20 Ки/км². Модельное дерево было поделено на 10-см бруски, после чего каждый из полученных брусков первых 10 метров дерева разделили на 8 частей по

сторонам света, относительно ядра дерева (1-NNE, 2-ENE, 3-ESE, 4-SSE, 5-SSW, 6-WSW, 7-WNW, 8-NNW). С каждого сектора кора вместе с лубом отделялась от древесины. Для изучения распределения Cs-137 в древесине использовались только бруски 4-SSE (юго-восточного направления роста дерева). Каждый брусок разделялся на три равные по годичным кольцам части от внешнего края до центра дерева. Второе модельное модельное дерево, возрастом около 70 лет, растущим в 15 км северо-западнее от первого. Плотность загрязнения почвы Cs-137 – 11 Ки/км².

Измерение содержания Cs-137 в счетных образцах проводилось с использованием гамма-спектрометрического комплекса на основе полупроводникового HPGe детектора с размером чувствительной области 59x65 мм с программным обеспечением SpectraLineBG v.1.6 [4]. Ошибка измерений активности Cs-137 в пробах не превышала 10 %. Результаты измерений обрабатывались с помощью программного пакета Statistica v.13.

Результаты и обсуждения

Результаты измерений удельной активности в коре по секторам 10-см отрезков ствола первого

модельного дерева приведены на Рисунке 1. Изменение концентрации Cs-137 по каждому отдельному сектору оказались близкими по значению. Дисперсионный анализ подтвердил отсутствие влияния фактора принадлежности по секторам. Изменение удельной активности Cs-137 носит ярко выраженный

колебательный характер с общим линейным трендом к увеличению к вершине.

Период колебаний в 1 метр не совпадает с ходом роста модельного дерева (Таблица 1), что говорит о том, что данная характеристика распределения Cs-137 не имеет отношения к годовым периодам физиологических процессов, проходящих в стволе дерева.

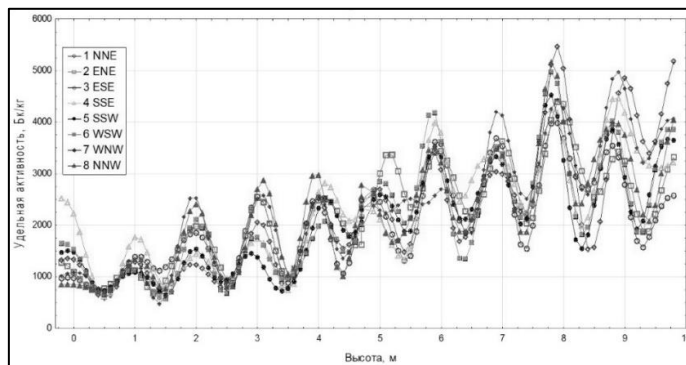


Рисунок 1. Изменение удельной активности Cs-137 в коре 36-летнего модельного дерева сосны обыкновенной по секторам сторон света вдоль ствола

Таблица 1

Соотношение высоты дерева и годовых колец первого модельного дерева сосны

h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.	h, м	Г.к.
0	36	1,0	34	2,0	32	3,0	30	4,0	28	5,0	26	6,0	24	7,0	22
0,1	36	1,1	34	2,1	32	3,1	30	4,1	28	5,1	26	6,1	24	7,1	22
0,2	36	1,2	34	2,2	32	3,2	30	4,2	28	5,2	26	6,2	24	7,2	22
0,3	35	1,3	33	2,3	31	3,3	29	4,3	27	5,3	25	6,3	23	7,3	21
0,4	35	1,4	33	2,4	31	3,4	29	4,4	27	5,4	25	6,4	23	7,4	21
0,5	35	1,5	33	2,5	31	3,5	29	4,5	27	5,5	25	6,5	23	7,5	21
0,6	35	1,6	33	2,6	31	3,6	29	4,6	27	5,6	25	6,6	23	7,6	21
0,7	35	1,7	33	2,7	31	3,7	29	4,7	27	5,7	25	6,7	23	7,7	21
0,8	34	1,8	32	2,8	30	3,8	28	4,7	26	5,8	24	6,8	22	7,8	20
0,9	34	1,9	32	2,9	30	3,9	28	4,9	26	5,9	24	6,9	22	7,9	20

В древесине модельного дерева, как и в коре наблюдается ярко выраженная колебательная характеристика концентрации Cs-137 вдоль ствола дерева, как в центре, так и в его середине, и во внешнем секторе (Рисунок 2). Амплитуда колебаний концентрации Cs-137 в коре полностью совпадает с колебаниями в древесине.

На основе проведенного статистического анализа полученных результатов, можно предположить, что колебания концентрации Cs-137 в коре модельного дерева представляют собой стоячую солитоноподобную волну [5]. С точки зрения физических процессов считается, что в природе пакетный солитон является наиболее энерго-эффективным методом транспорта веществ в природе. В данном случае –

это передача ионных веществ флоэмным транспортом в стволе дерева [6].

Если рассмотреть график изменения концентрации Cs-137 в коре второго модельного дерева, то наблюдается такая же волновая характеристика, с точно таким же периодом колебаний в 1 метр (Рисунок 3). Но явный рост колебаний начинается не с комли, как у первого дерева, а с 6-метрового отрезка. В данном случае можно предположить, что это связано прежде всего с возрастом дерева.

Выборочные измерения Cs-137 в древесине второго модельного дерева также показали волнообразный характер распределения (Рисунок 4). Однако, в отличие от коры, концентрация Cs-137 в древесине прикомлевой части ствола второго дерева имеет такой же порядок значений, как и в его середине.

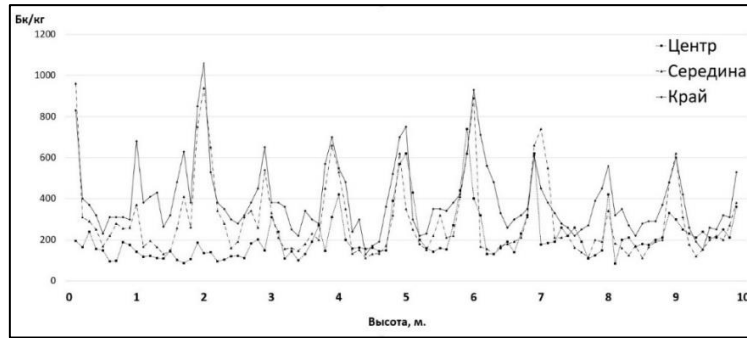


Рисунок 2. Изменения концентрации удельной активности Cs-137 в древесине с юго-восточного сектора 36-летнего модельного дерева сосны обыкновенной вдоль ствола

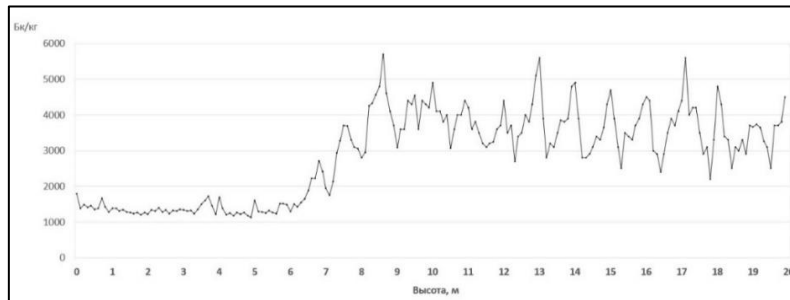


Рисунок 3. Изменение удельной активности Cs-137 в коре 70-летнего модельного дерева сосны обыкновенной вдоль ствола

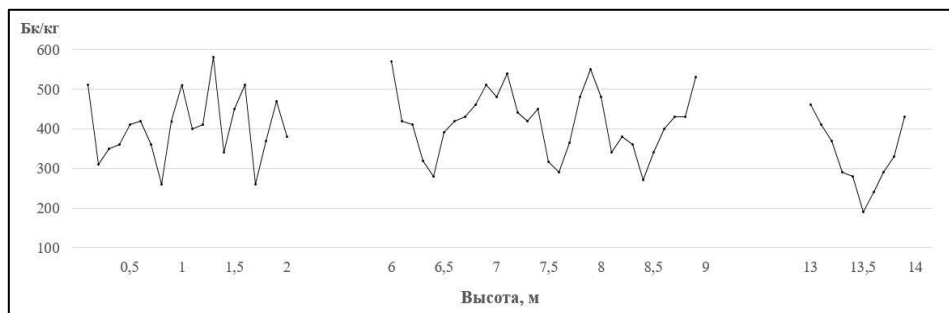


Рисунок 4. Изменение удельной активности Cs-137 в древесине с юго-восточного сектора 70-летнего модельного дерева сосны обыкновенной вдоль ствола

Результаты выполненной работы являются фундаментальными и служат основой для постановки вопроса о необходимости изучить данный вопрос более детально. Вероятнее всего, что в системе поступления и распределения химических элементов по стволу сосны Cs-137 выступает в роли радиотрейсера. Полученная периодичность с шагом в 1 метр, позволяет прорабатывать вопрос о распределении химических элементов не по всему стволу, а только в пределах двух-трех метров. Данная работа будет продолжать развиваться для более широкого понимания распределения химических элементов и анатомических процессов, проходящих в стволе дерева.

Выводы

В данной статье был изучен вопрос о распределении Cs-137 по высотному профилю двух

модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), отобранных в зонах радиоактивного загрязнения в Брянской области с разной плотностью загрязнения Cs-137. Установлено, что в коре исследуемых деревьев распределение Cs-137 носит волнообразный характер и может быть представлено как гармонические колебания с периодом в 1 м. Данная модель распределения в виде гармонической волны повторяется в обоих модельных деревьях. Статистический анализ гармонических колебаний концентрации Cs-137 в коре сосны определил их, как описание пакетного солитона, который в природе является наиболее эффективным способом передачи веществ, и в случае сосны обыкновенной связан с механизмами флоэчного транспорта. Смещение волны во втором модельном дереве свидетельствует о том, что волна является не стоячей, а смещается с

возрастом дерева. При этом период колебаний остается постоянным. Анализ концентрации Cs-137 в древесине первого модельного дерева также показал волнообразное распределение. Вероятнее всего, что не только Cs-137, но и другие химические элементы имеют волнообразное распределение по стволу дерева.

Список литературы

1. Карпов А.Д. и др. Концентрационные волны Cs-137 в коре сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве (к 50-летию со дня образования ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии): сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск, 2020. С. 166–169.

2. Мамухин С.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И. Распределение Cs-137, Sr-90 и их химических аналогов в компонентах надземной части сосны обыкновенной

в квазиравновесном состоянии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 1. С. 72–76.

3. Dmytrii H. et al. Distributions of Cs-137 and Sr-90 activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone / V. Yoschenko, S. Levchuka, V. Kashparov // Journal of Environmental Radioactivity – 2020. Vol.222, 106319.

4. Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectralLine». Свидетельство об аттестации № 43151.4Б207/01.00294-2010 от 28.02.2014 г.

5. Кудряшов Н.А. Нелинейные волны и солитоны // Соровский образовательный журнал. 1997. №2. С.85–91

6. Войтюк Д.Г. и др. К вопросу активизации дальнего транспорта жидкости и волнообразований в проводящих путях высших растений // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2013, № 185-3. С. 67–90.

WAVE CHARACTER OF DISTRIBUTION Cs-137 IN A SCOTS PINE TRUNK

Karpov A.D., Gorbunov I.Yu., Kalnin V.V., Razdaivodin A.N., Radin A.I.

ARRISMF, Pushkina, Moscow region, Russian Federation

The article considers the distribution of Cs-137 along the height of the trunk in the bark and wood of two model trees of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), 36 and 70 years old, selected in zones of radioactive contamination of the Bryansk region, where the density of soil contamination with Cs-137 is 11 and 20 Ci/km². It was found that in the bark and wood of the studied trees, the distribution of Cs-137 is undulating and can be represented as harmonic oscillations with a period of about 1 m. The shift of the wave in the bark of the second model tree indicates that the wave is not standing, but shifts with the age of the tree. In this case, the period of oscillation remains constant. In the system of nutrient intake and distribution along the pine trunk, Cs-137 acts as a radiotracer of other chemical elements.

Keywords: radioecology, radiocesium, distribution of radionuclides, concentration waves, scotch pine

УДК 51-7: 631.438.2

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МИГРАЦИИ ¹³⁷Cs ПО ПРОФИЛЮ ПОЧВЫ КОРМОВЫХ УГОДИЙ ТУЛЬСКОГО НИИСХ

Кречетников В.В., Титов И.Е., Кречетникова Е.О., Спиридонов С.И.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: viktor.krechetnikov@mail.ru

На основе анализа экспериментальных данных по распределению ¹³⁷Cs по профилю почв кормовых угодий тестового хозяйства Тульского НИИСХ разработаны модели вертикальной миграции ¹³⁷Cs в почвах различных агроландшафтов. При разработке модели для плакорных ландшафтов учитывалось стремление к стабилизации распределения ¹³⁷Cs в почвенном профиле черноземных почв с течением времени. Для эрозионных ландшафтов учитывалось “захоранивание” выпавшего на днища балок в 1986 г. ¹³⁷Cs в результате смыва почвы с водораздельных участков и склонов балок.

Ключевые слова: модели, вертикальная миграция, сельскохозяйственные территории, радиоактивное загрязнение

Под миграцией радионуклидов в почве понимают совокупность процессов, приводящих к перемещению радионуклидов в почве или перераспределению между различными ее фазами и состояниями. Скорость миграции радионуклидов определяется комплексом факторов, среди которых можно выделить физико-химические свойства радиоактивных выпадений, погодно-климатические условия, физико-географические особенности региона, свойства почв и характер подстилающей поверхности.

Необходимость изучения вопросов вертикальной миграции радионуклидов в почвах определяется двумя факторами: во-первых, распределение радионуклидов в профиле и удаление из корнеобитаемой зоны определяет размеры накопления их в урожае и, далее, в продукции животноводства; во-вторых, характер распределения радионуклидов в профиле почв влияет на величину экспозиционной дозы.

В разные периоды с 1988 по 2021 гг. после аварии на Чернобыльской АЭС проводился послыйный отбор образцов по профилю почвенного горизонта до глубины 45 см на плакорных целинных участках и склоновых эрозионных агроландшафтах со средне-суглинистыми выщелоченными черноземами разной степени эродированности, находящиеся в сельскохозяйственном обороте в качестве сенокосных и пастбищных угодий Тульского НИИ сельского хозяйства, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

В первые годы после выпадения ^{137}Cs на почвенно-растительный покров происходило активное перераспределение ^{137}Cs в основных компонентах агроэкосистем. В 1988 г. более 90% запаса содержалось в верхнем 5 см слое, через 5 лет в этом слое содержалось только 58,2%, из них 32,8% в слое 0-2 см. Вместе с тем существенно возросло содержание ^{137}Cs в 5-10 см слое, в котором общий запас ^{137}Cs возрос до 28%. Однако суммарное количество ^{137}Cs в слое 0-5 см более чем в 2 раза превышает соответствующие значения в слое 5-10 см.

Следует отметить, что в последующие годы процесс вертикальной миграции ^{137}Cs существенным образом замедлился. С начала 2000-х годов характер распределения этого радионуклида по слоям почвенного профиля плакорных ландшафтов практически не менялся.

Другая картина наблюдается для эрозионных ландшафтов. В результате смыва почвы с водораздельных участков ^{137}Cs перемещается по склонам на дно балки. С течением времени слой почвы, подвергшийся изначальному загрязнению, “захоранивается” за счет дополнительного поступления почвы в результате смыва. Тем самым, “захоранивается” и ^{137}Cs , осевший на дно балки в результате выпадений.

Таким образом, анализ эмпирических данных по распределению ^{137}Cs в профиле почв кормовых угодий тестового сельскохозяйственного предприятия позволяет установить две важные закономерности:

- для плакорных ландшафтов - стремление к стабилизации распределения ^{137}Cs по почвенному профилю с течением времени;

- для эрозионных ландшафтов - “захоранивание” выпавшего на днища балок в 1986 г. ^{137}Cs в результате смыва почвы с водораздельных участков.

При создании модели, описывающей формирование вертикального распределения ^{137}Cs на плакорных участках, было принято, что влияние оказывает только вертикальная миграция по профилю почвы, поскольку плакорный тип местности это плоские и пологоволнистые водораздельные равнины, покрытые черноземами и серыми лесными почвами без заметных признаков эродированности. Саму модель описывает следующее уравнение:

$$Q_{i,j} = (Q_{i,j-1} - kQ_{i,j-1} + kQ_{i-1,j-1})\exp(-0,693/30), \quad (1)$$

где $Q_{i,j}$ – поверхностная активность слоя i в год j , КБк/м²

k - доля активности,мигрирующей в нижележащий слой

$\exp(-0,693/30)$ – естественный радиоактивный распад ^{137}Cs

При этом доля активности, мигрирующей в нижележащий слой (k) зависит от времени (t) и описывается уравнением

$$k = 0,1 * \exp(-0.105 * t), \quad (2)$$

где:

t – время прошедшее с момента выпадения ^{137}Cs (лет).

На рисунке 1 представлен график зависимости доли активности k , мигрирующей в нижележащий слой от времени t с момента выпадения ^{137}Cs .

На рисунке 2 показана доля содержания ^{137}Cs в почве по слоям в разные года после выпадения радионуклида. Полученные при модельных расчетах данные согласуются с полученными ранее экспериментальными данными.

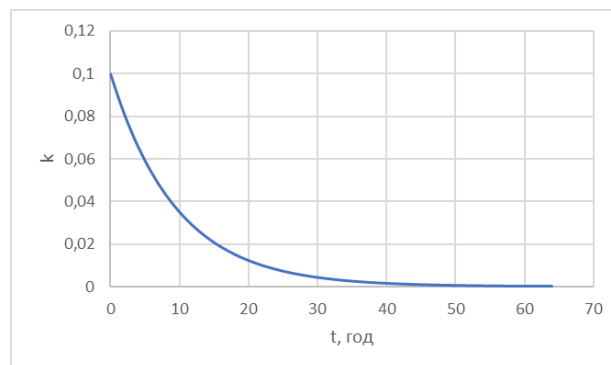


Рисунок 1. Зависимость доли активности k , мигрирующей в нижележащий слой от времени t с момента выпадения ^{137}Cs

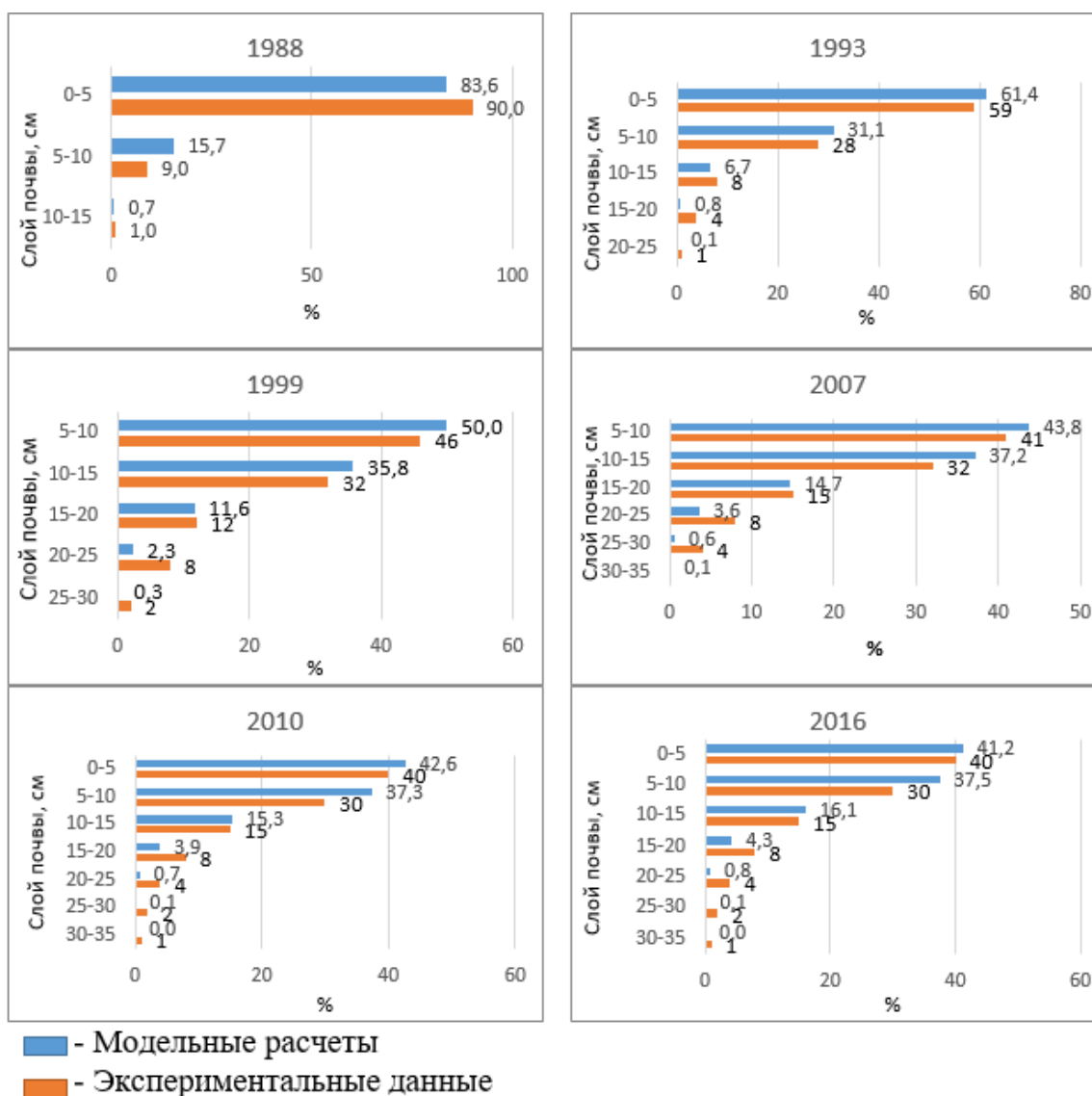


Рисунок 2. Доля содержания ^{137}Cs в почве по слоям в разные года после выпадения радионуклида

При создании модели, описывающей формирование вертикального распределения ^{137}Cs на дне балки было принято, что

- почвенный профиль – это набор слоев одинаковой толщины 5 см
- перенос радионуклида вниз по профилю оценивается, как и на плакорных участках

- в конце года часть верхнего слоя почвы с «вершины» и «склона» перемещается на «дно», в результате чего происходит перезахоронение слоев

Миграция по профилю почвы происходит постоянно и описывается уравнением 1. Смыв с вершины и склонов балки на дно балки и последующее перезахоронение слоев описывается формулами 3, 4.

$$Q_{1,j} = \left((Q_{1,j-1} - kQ_{1,j-1})(1 - q - z) + qQ_{1,j}^B + zQ_{1,j}^C \right) \exp(-0,693/30), \quad (3)$$

где

$Q_{(1,j)}$ – поверхностная активность верхнего слоя (1) в год j "дна" балки, КБк/м²

k – доля активности, мигрирующей в нижележащий слой

q – доля активности, смываемой со слоя 1 вершины балки в слой 1 дна балки

z – доля активности, смываемой со слоя 1 склона балки в слой 1 дна балки

$\exp(-0,693/30)$ – естественный радиоактивный распад

$Q_{(1,j)}^B$ – поверхностная активность слоя 1 вершины балки в год j , КБк/м²

$Q_{(1,j)}^c$ – поверхностная активность слоя 1 склона балки в год j , кБк/м²

$$Q_{i,j} = \left((Q_{i,j-1} - kQ_{i,j-1} + kQ_{i-1,j-1})(1 - q - z) + qQ_{i-1,j} + zQ_{i-1,j} \right) \exp(-0,693/30), \quad (4)$$

где

$Q_{i,j}$ – поверхностная активность слоя i в год j "дна" балки, кБк/м²

k – доля активности, мигрирующей в нижележащий слой

q – доля активности, смываемой со слоя 1 вершины балки в слой 1 дна балки

z – доля активности, смываемой со слоя 1 склона балки в слой 1 дна балки

$\exp(-0,693/30)$ – естественный радиоактивный распад

$Q_{i-1,j}$ – поверхностная активность слоя $i-1$ дна балки в год j , кБк/м²

При расчетах учитывается, что поверхностная активность верхнего слоя складывается из активности, пришедшей с «вершины» ($qQ_{i-1,j}$) и «склонов» ($zQ_{i-1,j}$) и оставшейся на поверхности активности $(Q_{i,j-1} - kQ_{i,j-1} + kQ_{i-1,j-1})(1 - q - z)$.

В результате модельных расчетов для эрозионных ландшафтов (дно балки) было выявлено отличие от характера вертикального распределения ¹³⁷Cs по профилю почвы на плакорных участках. Основное различие заключается в ярко выраженном переизобилии ¹³⁷Cs по вертикальному профилю почвы, наблюдаемому с 1996 года (рисунок 3).

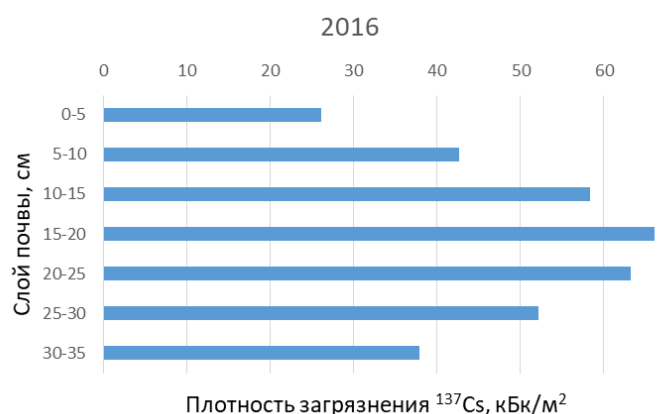
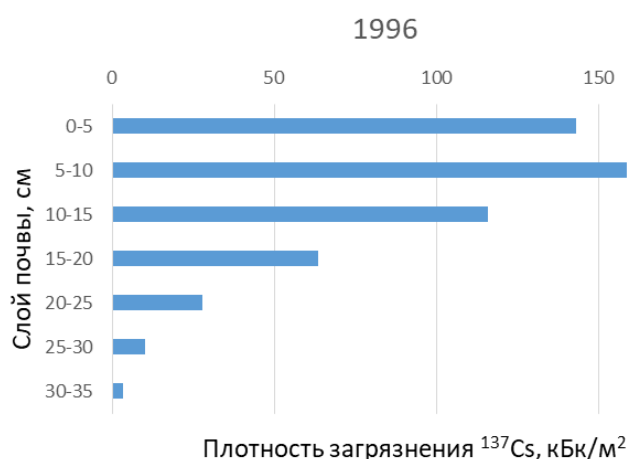
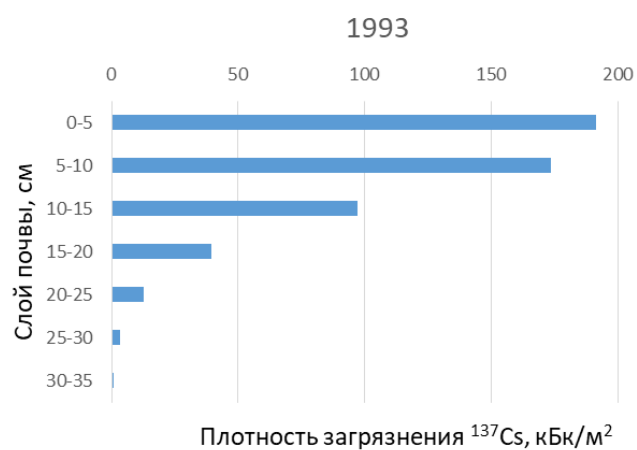


Рисунок 3. Распределение ¹³⁷Cs по профилю почвы для аккумулятивного элемента эрозионного ландшафта (дно балки)

DEVELOPMENT OF MODELS OF ^{137}Cs VERTICAL MIGRATION ACCORDING TO THE SOIL PROFILE FORAGE LANDS OF THE TULA RESEARCH INSTITUTE OF AGRICULTURE

Krechetnikov V.V., Titov I.E., Krechetnikova E.O., Spiridonov S.I.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Based on the analysis of experimental data on the distribution of ^{137}Cs along the soil profile of forage lands of the test farm of the Tula Research Institute of Agriculture, models of vertical migration of ^{137}Cs in soils of various agricultural landscapes were developed. When developing a model for upland landscapes, the desire to stabilize the distribution of ^{137}Cs in the soil profile of chernozem soils over time was taken into account. For erosional landscapes, we took into account the "burial" of ^{137}Cs that fell on the bottoms of the gully in 1986 as a result of soil washout from the watershed areas and the slopes of the gully.

Keywords: models, vertical migration, agricultural areas, radioactive contamination

УДК 004.65

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ «КОМПЛЕКСНЫЙ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОТЧУЖДЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ»

Кречетникова Е.О., Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: viktor.krechetnikov@mail.ru*

Созданная база данных предназначена для обеспечения хранения, систематизации, поиска и анализа информации о обследовании 16 контрольных участков сети комплексного мониторинга, включая радиологические параметры, характеристику почвенного покрова, ландшафтные особенности территории; степень залесения, заочкачивания, заболачивания, фитосанитарной обстановки и др. База данных была создана по результатам анализа собранной в ходе проведения последних туров обследования информации, выполненных в ходе работ по реализации программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, утвержденной постановлением совета министров союзного государства от 29 августа 2019 г. № 8.

Ключевые слова: база данных, мониторинг, сельскохозяйственные территории, выведенные из землепользования, радиоактивное загрязнение

В ходе работ по реализации Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС была сформирована сеть контрольных участков для наблюдения за состоянием бывших сельскохозяйственных земель на отчужденных территориях, а также программа и регламент многолетних наблюдений за динамикой восстановления природных экосистем. Для этого были отобраны участки с различными типами и свойствами почв, уровнями радиоактивного загрязнения и культуртехническим состоянием.

С 2020 года в летний период в Новозыбковском, Клинцовском и Красногорском районах Брянской области проводились ежегодные обследования сети контрольных участков. Собранная в ходе мониторинговых работ информация была объединена в базу данных «Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель».

База данных заполнялась информацией, полученной в результате работ по обследованию 16 контрольных участков сети комплексного мониторинга, включая радиологические параметры, характеристику почвенного покрова, ландшафтные

особенности территории; степень залесения, закаривания, заболачивания, фитосанитарной обстановки и др.

База данных создана с использованием системы управления базами данных (далее - СУБД) Access-2010 и выше. Объектами базы данных являются таблицы для хранения информации, запросы, формы и макросы. СУБД Access-обеспечивает все возможности обработки и управления данными при работе с большими объемами информации.

Основу БД составляют таблицы для хранения информации. При формировании базы данных

«Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель» необходимо учитывать специфику работы с данными в системе Access, в частности избегать дублирования информации. В связи с этим помимо основных таблиц в структуру базы включены вспомогательные, которые позволяют соблюдать необходимые требования и также облегчают ввод информации. В соответствии с разработанной структурой база данных включает в себя 24 таблицы, 15 из которых являются вспомогательными. Связь таблиц осуществляется по ключевым полям (таблица 1, рисунок 1).

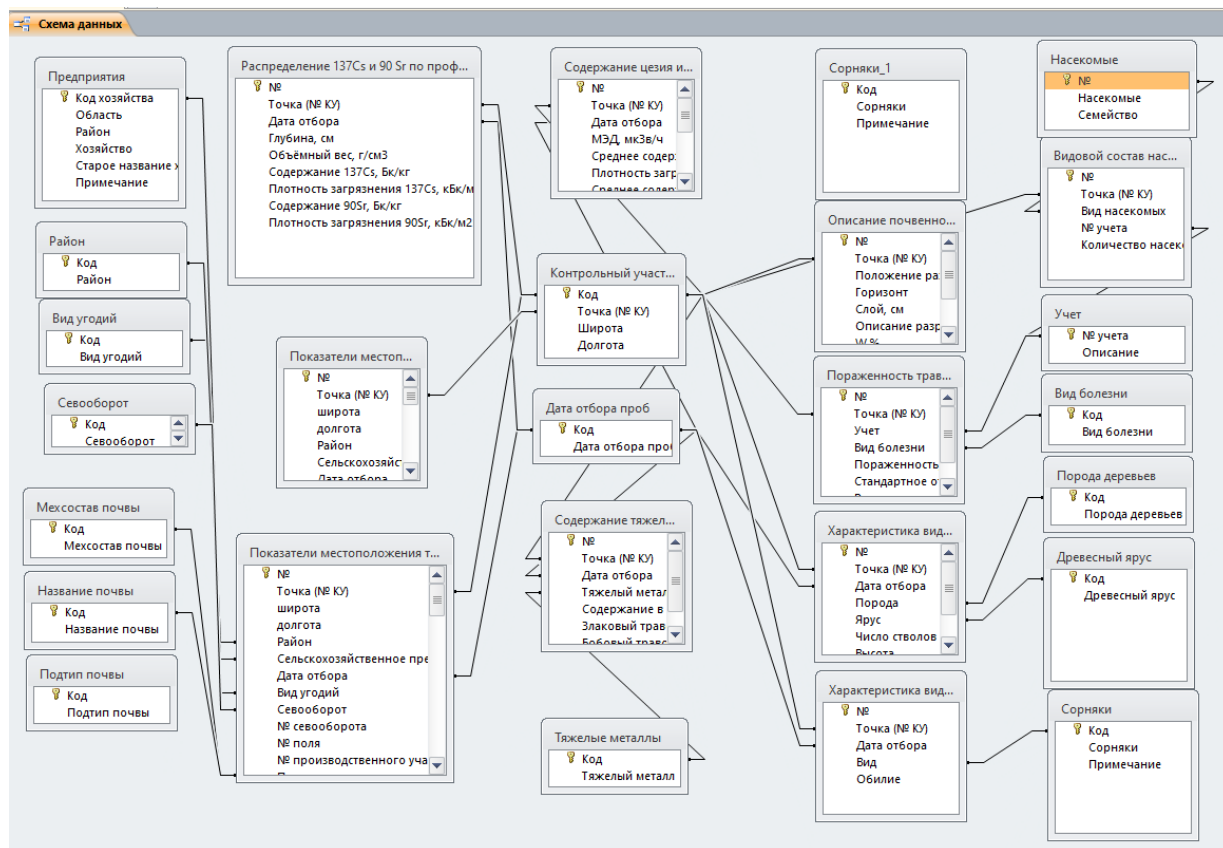


Рисунок 1. Логическая структура базы «Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель»

Таблица 1

Список таблиц, входящих в БД «Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель»

№	Наименование	Тип
1	Вид болезней растений	Вспомогательная
2	Вид угодий	Вспомогательная
3	Видовой состав насекомых на контрольных участках	Основная
4	Дата отбора проб	Вспомогательная
5	Древесный ярус	Вспомогательная
6	Контрольный участок	Вспомогательная
7	Мехсостав почвы	Вспомогательная
8	Название почвы	Вспомогательная

№	Наименование	Тип
9	Насекомые	Вспомогательная
10	Описание почвенного разреза	Основная
11	Показатели местоположения контрольного участка	Основная
12	Пораженность травянистых растений болезнями	Основная
13	Порода деревьев	Вспомогательная
14	Предприятия	Вспомогательная
15	Районы	Вспомогательная
16	Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr по профилю почв	Основная
17	Севооборот	Вспомогательная
18	Содержание тяжелых металлов	Основная
19	Содержание цезия и стронция	Основная
20	Сорняки	Вспомогательная
21	Тяжелые металлы	Вспомогательная
22	Учет	Вспомогательная
23	Характеристика видов древесного яруса	Основная
24	Характеристика видов травяного яруса	Основная

Вспомогательные таблицы базы данных представляют своего рода справочники, информация из которых в формате подстановки вводится в основные таблицы базы данных. Эти таблицы содержат следующую информацию:

- местоположение и основные хозяйственные характеристики контрольных участков;
- даты проведения полевых радиоэкологических обследований и наблюдений за фитосанитарной обстановкой на контрольных участках;
- название почвы;
- мехсостав почвы;
- перечень тяжелых металлов, которые определялись в почве и растениях при обследовании;
- справочная информация об основных породах деревьев, видах травянистой растительности, насекомых, болезнях растений.

В основных таблицах содержится весь объем полученных данных. В таблице «Показатели местоположения контрольного участка» представлена информация о расположении контрольных участков для наблюдения за состоянием бывших сельскохозяйственных земель на отчужденных территориях. В ней также представлена их детальная характеристика, включая ландшафтно-экологическую характеристику контрольного участка, основные агрохимические, биологические, физические показатели почв. Описание заложенных на контрольных участках почвенных разрезов и гидрофизические показатели почв представлены в таблице «Описание почвенного разреза». В таблице «Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr по

профилю почв» содержится информация о распределении ^{137}Cs и ^{90}Sr по профилю почв, а в таблице «Содержание цезия и стронция» информация об их содержании в почвах и растительном покрове. Результаты обследования контрольных участков на содержание тяжелых металлов представлены в таблице «Содержание тяжелых металлов».

Таблицы «Характеристика видов древесного яруса» и «Характеристика видов травяного яруса» предназначены для хранения информации о характеристиках растительного покрова (древесного и травяного ярусов) на контрольных участках. Таблица «Пораженность травянистых растений болезнями» содержит информацию о видах болезней и пораженности травянистых растений. В таблице «Видовой состав насекомых на контрольных участках» представлена информация о количестве и видовом составе насекомых на контрольных участках.

Все таблицы составлены с учетом того, что в дальнейшем база будет пополняться новыми данными. Кроме таблиц в состав банка данных входят формы для просмотра и ввода информации. Это один из основных инструментов при работе по заполнению базы.

На рисунке 2 показана главная форма для работы с базой данных. Через нее проходит навигация по интересующим нас разделам базы данных.

Всего в базу данных внесено 4258 записей. В таблице 2 приведена общая статистика по заполнению результатов обследования 16 контрольных участков сети комплексного мониторинга.

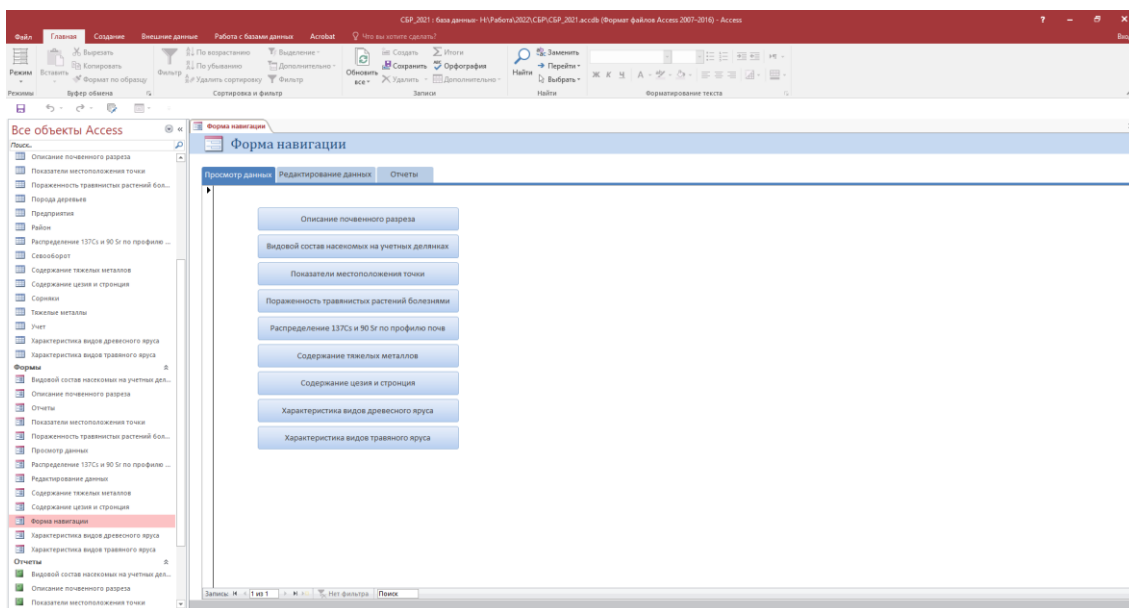


Рисунок 2. Главная форма для работы с базой данных

Таблица 2

Общая статистика по заполнению базы данных «Комплексный радиационно-экологический мониторинг отчужденных сельскохозяйственных земель»

Наименование	Количество записей
Вид болезней растений	6
Вид угодий	6
Видовой состав насекомых на контрольных участках	1492
Дата отбора проб	20
Древесный ярус	3
Контрольный участок	17
Мехсостав почвы	6
Название почвы	13
Насекомые	233
Описание почвенного разреза	108
Показатели местоположения контрольного участка	32
Пораженность травянистых растений болезнями	292
Порода деревьев	10
Предприятия	10
Районы	5
Распределение ¹³⁷ Cs и ⁹⁰ Sr по профилю почв	120
Севооборот	2
Содержание тяжелых металлов	576
Содержание цезия и стронция	32
Сорняки	161
Тяжелые металлы	18
Учет	8
Характеристика видов древесного яруса	72
Характеристика видов травяного яруса	1016
Всего	4258

CREATION OF THE DATABASE "COMPLEX RADIATION AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF ALIENATED AGRICULTURAL LAND"

Krechetnikova E.O., Krechetnikov V.V., Titov I.E., Shubina O.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The created database is designed to provide storage, systematization, search and analysis of information on the survey of 16 control sites of the integrated monitoring network, including radiological parameters, soil cover characteristics, landscape features of the territory; degree of reforestation, overgrowth, swamping, phytosanitary situation, etc. The database was created based on the analysis of the information collected during the last rounds of the survey, carried out in the course of work on the implementation of the program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the union state for the protection of the population and rehabilitation of territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant, approved by the Council of Ministers of the Union State of August 29, 2019 No. 8.

Keywords: *database, monitoring, agricultural areas taken out of land use, radioactive contamination*

ТРИТИЙ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ НА ПЛОЩАДКЕ «САРЫ-УЗЕНЬ» СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Кривицкий П.Е., Ларионова Н.В., Монаенко В.Н., Турченко Д.В.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК
071100 Абайская область, г. Курчатов, улица Бейбіт атом 2Б, Республика Казахстан
e-mail: Krivitskiy@nnc.kz*

В работе представлены результаты исследований содержания и распределения ^3H в растительном покрове на площадке «Сары-Узень» Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Определение ^3H проводилось в органической составляющей растений по сети 1×1 км и около боевых скважин. Отдельно исследовано содержание ^3H в растительном покрове в районе объекта «Лазурит». Измерение ^3H проводилось методом жидкостинтилляционной спектрометрии при помощи спектрометра Sample Quantulus. В результате установлено, что в большинстве случаев содержание ^3H в растениях на площадке «Сары-Узень» преобладает на уровне от 10 до 40 Бк/кг.

Ключевые слова: *Семипалатинский испытательный полигон (СИП), ядерные испытания, растения, ^3H*

С началом проведения ядерных и термоядерных испытаний, в атмосферу Земли было введено количество ^3H более чем в 60–190 раз превысившее его естественный уровень [1]. Значительная доля ^3H была наработана во время проведения ядерных испытаний на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Работы по изучению ^3H на СИП на сегодняшний день охватывают различные объекты окружающей среды. Так, ^3H был исследован как индикатор мест проведения ядерных испытаний [2] и для оценки загрязнения грунтовых вод по его содержанию в растительном покрове [3], отдельные исследования были посвящены содержанию ^3H в воздухе [4], почвах [5–8], растительном покрове [9] и растениеводческой продукции [10]. Целью настоящего исследования стала оценка распределения ^3H в растительном покрове в местах проведения подземных ядерных испытаний. Объектом исследования стала площадка «Сары-Узень» (рис. 1), на которой в основном проводились подземные ядерные

испытания в вертикальных скважинах, на глубинах от 48 до 427 метров.

Для оценки содержания ^3H в растительности проведены работы по изучению картографического материала (космических снимков и топографической основы), на основании которых выделены основные зоны обследования: непосредственно территория площадки «Сары-Узень», включая участки вокруг боевых скважин, и объект «Лазурит».

В качестве основного исследуемого вида растений выбрана полынь (*Artemisia gracilescens*), в случае ее отсутствия отобраны ковыль (*Stipa capillata*), таволга (*Spirea hypericifolia*), карагана (*Caragana frutex*). Всего отобрано 288 проб растений: по сети 1×1 км (204 точки), возле боевых скважин (28 точек) и на объекте «Лазурит» (56 точек). Отбор растений (надземной части) произведен с учетом особенностей ландшафта и проективного покрытия растительности.

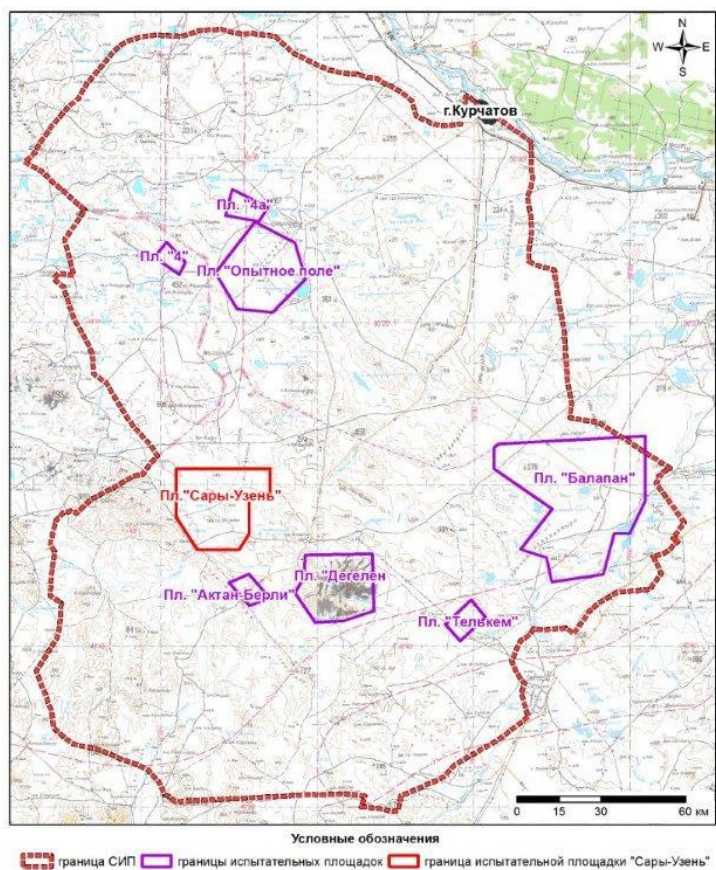


Рисунок 1. Карта СИП

Подготовка проб растений для измерения удельной активности ^3H в их органической составляющей производилась методом сжигания сухого растительного образца на установке «Sample Oxidizer A307» с последующей подготовкой полученной воды для проведения β -спектрометрического измерения удельной активности ^3H . Все отобранные пробы проанализированы методом жидкосцинтилляционной спектрометрии при помощи спектрометра «Quantulus».

По результатам лабораторных анализов определено содержание ^3H . В таблице 1 представлены диапазон изменения содержания ^3H , среднее арифметическое, медиана и коэффициент вариации.

Таблица 1

Содержание ^3H в растениях

Диапазон изменения, Бк/кг	6 ÷ 6800
Среднее значение, Бк/кг	63
Медиана, Бк/кг	20
Коэффициент вариации, %	692

Также анализ полученных данных выполнен посредством построения гистограммы распределения, с указанием усредненных значений (рис. 2Рисунок).

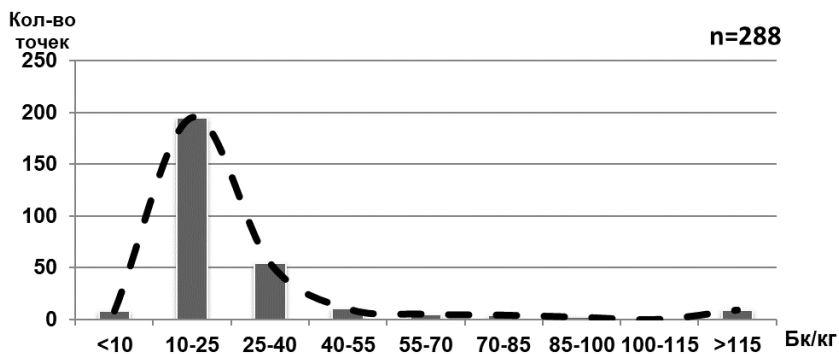


Рисунок 2. Гистограмма распределения ^3H в растениях

Как видно из представленной гистограммы, в большинстве случаев преобладает относительно небольшие содержания ^3H в растениях, на уровне от 10 до 40 Бк/кг.

Список литературы

1. Беловодский, Л. Ф. Тритий / Л. Ф. Беловодский, В. К. Гаевой, В. И. Гришмановский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 247 с.

2. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В., Субботин С.Б. Тритий как индикатор мест проведения ядерных испытаний // Вестник НЯЦ РК. 2011. Вып. 3. С. 125–128.

3. Larionova N.V., Lukashenko S.N., Lyakhova O.N. et al. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site / N.V. Larionova. // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177. P. 218-224. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.06.032.

4. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Тимонова Л.В. и др. Оценка уровня концентрации газообразных соединений трития в местах проведения ядерных испытаний на территории семипалатинского испытательного полигона. // Радиационная биология. Радиоз экология, 2020, том 60, № 6, с. 646–657.

5. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О. Исследование содержания трития в почве в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного

полигона // Радиационная биология. Радиоз экология. 2015. Т. 55, № 6. С. 667–672.

6. Timonova L.V., Lyakhova O.N., Lukashenko S.N. et al. Tritium distribution in soil in the area of “Atomic” Lake near the Semipalatinsk Test Site // Eurasian Soil Sci. 2020. V. 53. P. 355-361.

7. Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Айдарханов А.О., Сержанова З.Б. Тритиевое загрязнение почвы в местах проведения наземных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне. // Радиация и риск. 2020. Том 29. № 4. С. 106–117.

8. Serzhanova Z.B., Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N. et al. Researching of tritium speciation in soils of “Balapan” site // J. Environ. Radioact. 2018. V. 192. P. 621–627.

9. Polivkina, Ye.N. et al. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site // J. Environ. Radioact. 2021. Vol. 237, 06705, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106705.

10. Исследование радиационно-гигиенической опасности техногенного трития при его накоплении растениеводческой продукцией для оценки дозовой нагрузки на население: отчет о НИР (заключительный) / филиал Института радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК; рук. Батырбеков Э.Г.; исполн. Ларионова Н.В. [и др.]. Курчатов, 2021. 55. Библиогр.: с. 29–32. № ГР 0221РК00140

TRITIUM IN THE VEGETATION COVER AT THE SARY-UZEN SITE OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

Krivitskiy P.Ye., Larionova N.V., Monayenko V.N., Turchenko D.V.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents the results of studies of the content and distribution of ^3H in the vegetation cover at the Sary-Uzen site of the Semipalatinsk test site (STS). The determination of ^3H was carried out in the organic component of plants along a network of 1×1 km and near combat wells. Separately, the content of ^3H in the vegetation cover in the area of the Lazurit object was studied. ^3H was measured by liquid scintillation spectrometry using a Sample Quantulus spectrometer. As a result, it was found that in most cases the content of ^3H in plants at the Sary-Uzen site prevails at a level of 10 to 40 Bq/kg.

Keywords: Semipalatinsk test site (STS), nuclear tests, plant, ^3H

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ В ПОЧВУ ВОЗРАСТАЮЩИХ КОЛИЧЕСТВ ЦИНКА НА ПОДВИЖНОСТЬ КАДМИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-ПОЧВЕННЫЙ РАСТВОР-РАСТЕНИЕ

Крыленкин Д.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Саруханов А.В., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Корнеев Ю.Н.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: cornblum@mail.ru

В данной работе рассмотрено взаимоотношение двух тяжелых металлов, являющихся химическими аналогами - тератогенного Cd и Zn который, напротив, способен вызывать тератогенные эффекты в случае его дефицита в организме. Проверена гипотеза о возможности снижения поступления кадмия в ячмень, который может служить источником для поступления его в организм человека, вызывая нарушения в развитии. Приведены результаты исследования перехода тяжелых металлов в почвенный раствор и подвижную форму, а также накопление в растении.

Ключевые слова: тератогены, кадмий, цинк, ячмень, центрифужные почвенные растворы

Кадмий – тяжелый металл способный оказывать тератогенное воздействие, как на растение, так и на человека. После поступление в организм он накапливается в печени и почках в виде комплекса с металлотииоинеином. В эритроцитах и мягких тканях кадмий связывается с α -макроглобулином и альбумином. При связывании кадмия с сульфгидрильными группами белков происходит инактивация ферментов, подавление деятельности митохондрий, и повышение свободно-радикального окисления в клетках. [1] Хроническое отравление характеризуется снижением и потерей обоняния, кадмиевым паркинсонизмом, кадмиевой каймой, астеновегетативными, астеноневротическими нарушениями, гипоталамическими синдромами с вегетативными нарушениями. При дальнейших интоксикациях появляются носовые кровотечения, язвы и перфорации носовой перегородки, хронические обструктивные заболевания легких с развитием пневмосклероза и эмфиземы легких, желудочно-кишечные расстройства, поражение печени, гипохромная анемия или компенсаторный эритроцитоз, увеличение СОЭ до 70 мм/час, остеопороз [1].

К основным механизмам тератогенеза на тканевом уровне относят гибель отдельных клеток и клеточных масс.[2] Кадмий может способствовать течению патологических процессов в период дифференциации клеток и формообразования органов, поскольку угнетают синтез белка и обмен нуклеиновых кислот [3,4], при этом отсутствие специфических защитных механизмов приводит к накоплению токсичных тяжелых металлов в организме плода в течение беременности и дальнейшее поступление кадмия в организм ребенка с молоком увеличивает токсическое воздействие.

Также тератогенное действие оказывает дефицит цинка в организме человека связанное с торможением активности цинкозависимых ферментов синтеза ДНК, в результате чего извращается клеточный цикл и тормозится фаза дробления. Так отмечается, что при содержании цинка в сыворотке крови матери в 18% случаев наступает цинкдефицитная эмбриопатия основными проявлениями которой являются гидроцефалия, расщелина неба, губы и т.д. [5]

Основными источниками поступления кадмия являются промышленные предприятия, в том числе перерабатывающая промышленность, добывающая промышленность и производство пластика [6]. Кадмий способен оставаться в окружающей среде на протяжении десятилетий [7]. Учитывая указанные выше эффекты, имеет смысл рассмотреть возможность снижения поступления кадмия в растения, которые могут стать источником поступления в организм человека, в том числе за счет внесения в почву конкурирующего с ним химического аналога цинка.

Для определения влияния разного количества цинка содержащегося в почве на переход кадмия в почвенный раствор и растение была проведена серия экспериментов с внесением различных концентраций этих тяжелых металлов. В каждом из экспериментов было по пять вариантов с заданной концентрацией Cd и изменяющейся концентрации цинка. В первом эксперименте концентрация внесенного в сосуд с 5 кг дерново-подзолистой почвы кадмия составляла 10 мг/кг во втором 25 мг/кг, в третьем 45 мг/кг. Доза цинка в обоих экспериментах различалась по вариантам – 0, 50, 100 и 150 мг/кг. В качестве контроля использовался вариант без внесения кадмия или цинка (Cd₀Zn₀). В каждый из сосудов было посеяно по 25 проростков ячменя (*Hordeum vulgare*).

L.) сорта Зазерский 85. Для определения подвижности кадмия в почве был проведен анализ его перехода в почвенный раствор стандартным методом и

содержания подвижной формы металлов в почве с помощью ацетатно-аммонийного буферного раствора с рН 4.8 с добавлением ЭДТА.

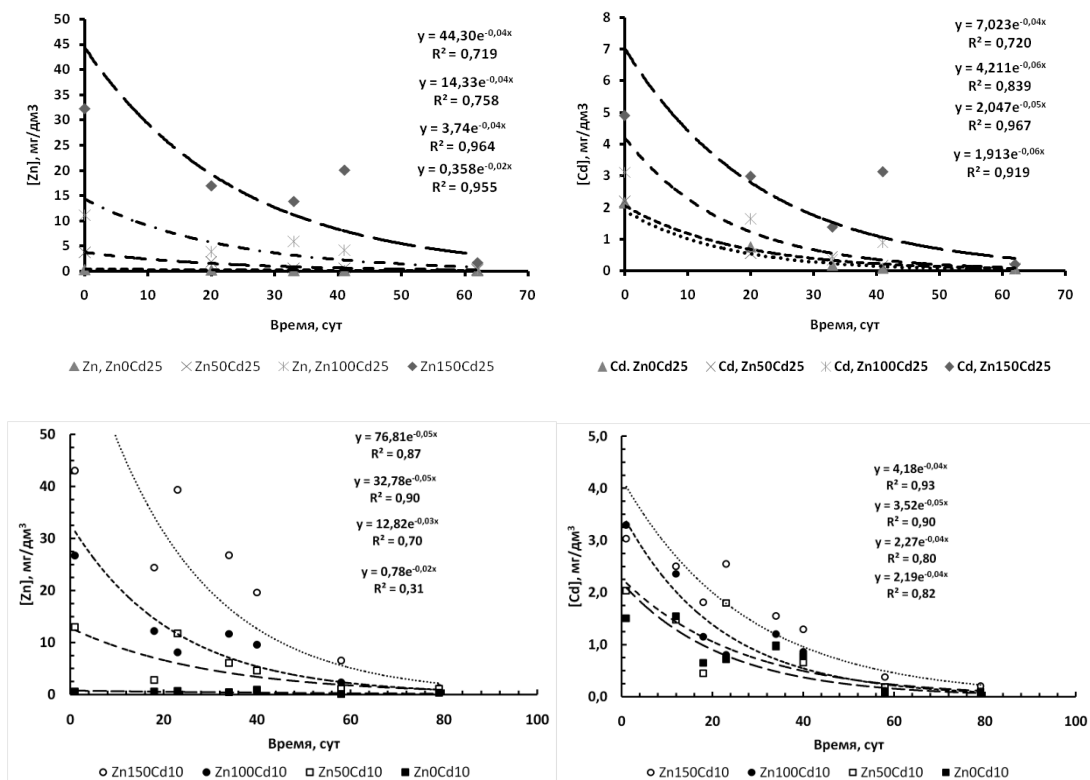


Рисунок 1. Содержание Zn и Cd в почвенных растворах

В течение вегетационного периода из почвенных сосудов извлекали квазиравновесные почвенные растворы методом центрифугирования в установленные периоды времени. Динамика концентрации в почвенных растворах Zn и Cd представлена на рисунке 1. Установлено, что уменьшение концентрации Zn и Cd в почвенном растворе в зависимости от времени можно удовлетворительно описать

экспоненциальными уравнениями, представленными на рисунке 1 для доз Cd₁₀ и Cd₂₅.

После созревания растений было проведено определение содержания тяжелых металлов в соломе (Табл.1) в соответствии с методическими указаниями [7] с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией Квант Z.ЭТА.

Таблица 1

Накопление Cd и Zn в соломе в зависимости от содержания их подвижной формы в почве

Вариант	Подвижная форма (AcONH ₄ , рН 4.8+ЭДТА):		Массовая доля в ячмене, мг/кг	
	Zn	Cd	Солома	
			Zn	Cd
Cd ₀ Zn ₀	10.72±0.43	0.46±0.02	40.2±6.6	0.36±0.06
Cd ₁₀ Zn ₀	7.99±0.12	9.43±0.41	85±14	25.8±1.3
Cd ₁₀ Zn ₅₀	39.08±1.39	9.96±0.58	392±52	27.8±1.2
Cd ₁₀ Zn ₁₀₀	67.36±4.27	9.92±0.42	604±29	25±3
Cd ₁₀ Zn ₁₅₀	105.63±4.69	10.92±0.55	831±178	26.8±3.5
Cd ₀ Zn ₂₅	19.12±2.56	0.24±0.05	38±0.4	1.69±0.07
Cd ₂₅ Zn ₀	7.35±1.41	0.29±0.33	55±2	181±7
Cd ₂₅ Zn ₅₀	14.92±0.76	23.12±1.16	488±20	132±8
Cd ₂₅ Zn ₁₀₀	69.24±11.09	26.85±8.22	648±40	130±11

Вариант	Подвижная форма (AcONH ₄ , pH 4.8+ЭДТА):		Массовая доля в ячмене, мг/кг	
	Zn	Cd	Солома	
			Zn	Cd
Cd ₂₅ Zn ₁₅₀	133.18±16.04	26.85±6.37	948±42	116±9
Cd ₀ Zn ₀	3.14±0.52	0.24±0.06	14.3±2.0	0.81±0.36
Cd ₄₅ Zn ₀	4.47±0.12	35.41±0.68	83.4±9.5	215±14
Cd ₄₅ Zn ₅₀	27.31±0.94	33.86±0.80	320±56	200.3±7.8
Cd ₄₅ Zn ₁₀₀	48.95±1.31	37.35±1.01	-	-
Cd ₄₅ Zn ₁₅₀	62.50±1.02	31.09±0.86	-	-

При увеличении содержания подвижного цинка в почве количество накапливаемого в соломе Cd уменьшалось, а накопление Zn увеличивалось.

До концентраций подвижного кадмия ниже 35 мг/кг и подвижного Zn ниже 100 мг/кг можно проследить признаки линейной зависимости с накоплением соответствующего металла, которая нарушалась при превышении этих значений, возможно в как проявление фитотоксических эффектов ТМ.

Однако, несмотря на прослеживаемые тенденции, статистический анализ не показал наличие прямой достоверной зависимости между увеличением содержания цинка в почве и накоплением кадмия в соломе ячменя после созревания.

Список литературы

1. Арустамян О.М., Ткачишин В.С., Алексейчук А.Ю. Влияние соединений кадмия на организм человека//Медицина неотложных состояний. 2016 г.
2. Теуцкая Е.Е., Гусарук Л.Р. Мониторинг врожденных пороков развития челюстно-лицевой области

в условиях неблагоприятного воздействия окружающей среды//Экология человека.- т.20, №5 – 2013 г.

3. Клиническое руководство по лабораторным тестам/под ред. Нормберта У. Тица:пер.с. англ.под ред. В.В.Меньшикова. М.: Медицина, 1987. 366 с

4. Шашель В.А. и др. Медико-экологический атлас Краснодарского края // Краснодар: Кубанская государственная медицинская академия, Кубанский мединститут, ГУП «Печатный двор Кубани», 2002. 120 с. 72 ил.

5. Авцын А.П., Жаворонков А.А., Пиш М.А. Микроэлементозы человека. М.: медицина, 1991. 495 с.

6. Dong, Q., Fang, J., Huang, F., Cai, K. Silicon Amendment Reduces Soil Cd Availability and Cd Uptake of Two Pennisetum Species. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 1624.

7. Rehman, M.Z.U. et al. Residual effects of frequently available organic amendments on cadmium bioavailability and accumulation in wheat. Chemosphere 2020, 244, 125548.

IMPACT OF INCREASING AMOUNTS OF ZINC CONTENT INTRODUCTION TO SOIL ON CADMIUM MOBILITY IN SOIL-SOIL SOLUTION-PLANT SYSTEM

Krylenkin D.V., Anisimov V.S., Anisimova L.N., Sarukhanov A.V., Sanzharov A.I., Dikarev D.V., Korneev Yu.N.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

This paper considers the relationship of two heavy metals that are chemical analogues - teratogenic Cd and Zn, which, on the contrary, is capable of causing teratogenic effects in case of its deficiency in the body. The hypothesis about the possibility of reducing the intake of cadmium in barley, which can serve as a source for its entry into the human body, causing developmental disorders, has been tested. The results of the study of the transition of heavy metals into the soil solution and mobile form, as well as the accumulation in the plant, are presented.

Keywords: teratogens, cadmium, zinc, barley, centrifuge soil solutions

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ

Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В., Новикова Н.В.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: Kurbakov007@gmail.com

Проведена сравнительная оценка загрязнения тяжелыми металлами снежного покрова в 30-км зонах воздействия ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» и электрометаллургический завод ООО «НЛМК-Калуга». Определен полиэлементный состав твердой и жидкой фракций, представлены значения геохимических и санитарно-гигиенических показателей загрязнения снежного покрова. Приоритетными загрязнителями снежного покрова в твердофазной пылевой форме являются Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd, Co, основным компонентом среди которых является железо. Талые воды по своему анионно-катионному составу не превышают нормативов, установленных для питьевой воды, а по содержанию меди в 1,2-5 раз превосходят ПДК, регламентируемые для воды рыбохозяйственных водоемов. Интенсивность загрязнения снежного покрова зависит от комплекса факторов, определяющими среди которых являются расстояние и направление от источников загрязнения, используемые технологии и объемы выбросов.

Ключевые слова: черная металлургия, снежный покров, выбросы, экология, тяжелые металлы, промышленные предприятия

В центральном федеральном округе РФ почти третья часть (26,2%) объема выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух приходится на Липецкую обл., где основным источником загрязнения является публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО НЛМК) [1]. В состав производственной группы НЛМК входят ПАО «НЛМК» и ООО «НЛМК-Калуга», которые вырабатывают до 21% всей российской стали. Вместе с тем данные предприятия кардинально различаются не только географическим расположением, но и используемыми технологиями, видами и объемами производства.

ПАО «НЛМК» основан в 1934 году имеет производственные мощности, позволяющие ежегодно выпускать 9,5 млн т чугуна, 9,9 млн. т стали и до 7 млн. т горячекатаного и холоднокатаного листового проката. В производстве применяются доменные печи.

ООО «НЛМК-Калуга» электрометаллургический завод нового поколения основан в 2013 году. Проектная мощность предприятия 1,55 млн. т. в год жидкой стали и 1,5 млн. т. в год сортового и фасонного проката. В производстве используется дуговая сталеплавильная печь ДПС-120 [2].

В мониторинге загрязнения атмосферного воздуха использовались, так называемые, природные планшеты, к которым относится снежный покров [3]. Отбор проб снега проводили методом шурфа с площади 50×50 см на всю глубину снежного покрова без захвата тонкого приземного слоя (3-5 см), чтобы исключить попадание в пробу частиц почвы. Таяние

снега только начиналось. [4]. Общий период времени от начала снегостава до дня отбора составил примерно 102 суток. Выделенный снеговой блок перенесли совком в полиэтиленовый мешок емкостью 30 л. Высота снежного покрова составляла в среднем 40 см. Вес пробы составлял около 20 кг, при оттаивании получали 12-15 л воды. Пробоотбор произведен на разном удалении и направлении от предполагаемого факела выброса. Для отбора «фоновых» проб выбирались участки, расположенные на расстоянии 24 км от основного источника загрязнения в Липецкой обл. и 23 км в Калужской обл.

В лаборатории при комнатной температуре создавались условия для медленного таяния проб. Растаявший снег фильтровали через бумажный фильтр «синяя» лента. По результатам взвешивания высушенного при температуре 95 ± 5 °С фильтра, определяли массу твердого осадка и вычисляли концентрацию взвеси в отобранном объеме снега. Отфильтрованные осадки, представляющие собой в основном мелкую металлическую пыль, озоляли в муфельной печи при постепенном подъеме температуры до 450°C и с помощью царской водки (1 часть HNO_3 + 3 части HCl) переводили в растворимое состояние. Определение тяжелых металлов проводили методом атомной спектроскопии в индуктивно-связанной плазме (ICP-OES).

Оценка опасности загрязнения снежного покрова металлами проводилась с использованием ряда геохимических и санитарно-гигиенических показателей: коэффициенты техногенной концентрации (Кс),

пылевой нагрузки (Pn), общей нагрузки загрязнения (Робщ), коэффициента относительного увеличения общей нагрузки элемента (Kp), суммарного показателя загрязнения снежного покрова (Zc) [5].

В результате исследований установлено, что основная доля ТМ, выпадающих с зимними осадками, содержится в форме труднорастворимых соединений. При этом основным компонентом пылевидных выпадений является железо, количество которого в выпадениях ПАО «НЛМК» и ООО «НЛМК-Калуга» достигает 70,2, и 83,6%, соответственно. В количественном отношении тяжелые металлы в пылевидных выпадениях ПАО «НЛМК» составляют последовательность: Fe > Al > Mn > Zn > Pb > Cr = Sr > Ni = Cu > Co = Cd > Mo. Тяжелые металлы в выпадениях ООО «НЛМК-Калуга» составляют ряд: Fe > Mn > Zn > Pb > Al > Cu > Ni > Co > Cd.

Содержание ряда тяжелых металлов, и особенно железа в большинстве случаев, в пылевидных выпадениях ПАО «НЛМК» до 7,8 раза превышает соответствующие значения в выпадениях ООО «НЛМК-Калуга». При этом наибольшие различия в количественном соотношении тяжелых металлов отмечаются в ближних промышленных зонах воздействия металлургического предприятий (табл. 1).

В отличие от труднорастворимых фракций какой-либо четкой закономерности в распределении водорастворимых концентраций тяжелых металлов в выпадениях наблюдаемых металлургических предприятий не наблюдается, однако с приближением к источникам загрязнения на расстоянии 3-4 км количество водорастворимых фракций в выпадениях ПАО «НЛМК» возрастает относительно ООО «НЛМК-Калуга» в 1,6-12,4 раза (табл. 1).

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов во фракциях снежного покрова на разном расстоянии от промышленных предприятий, мг/кг

№	Расстояние, км	Cd	Co	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mn	Fe
Твердая фракция снежного покрова										
1	23*	1,4	4,6	18,8	233	35,3	16,9	22,2	638	9218
	24	1,7	1,3	16,8	207	15,0	12,0	25,0	435	10090
2	15,8	3,9	6,1	58,1	593	68,1	29,9	36,7	537	9163
	13,5	10,9	4,5	43,7	566	139,0	22,0	58,0	1712	66875
3	9,8	4,9	7,4	60,5	639	71,2	33,4	41,3	616	17567
	12,0	8,2	5,2	17,4	545	80,0	23,4	64,0	1896	41205
4	5,8	2,2	5,2	52,1	762	156,1	42,3	113,7	1343	25100
	5,7	13,2	5,3	39,9	956	122,0	65,0	150,0	3550	118326
5	3,0	2,9	5,6	47,8	747	120,2	20,3	101,9	1397	19163
	4,0	13,6	5,7	70,6	3084	255,0	92,0	384,4	2519	150180
Жидкая фракция снежного покрова										
1	23*	0,0003	0,0006	0,0016	0,0017	0,0007	0,0010	0,0012	0,0013	0,0195
	24	0,0003	0,0004	0,0012	0,0013	0,0036	0,0005	0,0012	0,0039	0,0190
2	15,8	0,0003	0,0007	0,0024	0,0016	0,0021	0,0017	0,0023	0,0020	0,0265
	13,5	0,0003	0,0004	0,0015	0,0051	0,0030	0,0014	0,0011	0,0055	0,0260
3	9,8	0,0005	0,0009	0,0017	0,0040	0,0028	0,0022	0,0022	0,0031	0,0219
	12,0	0,0005	0,0010	0,0007	0,0060	0,0032	0,0011	0,0021	0,0024	0,0256
4	5,8	0,0003	0,0010	0,0017	0,0023	0,0010	0,0049	0,0049	0,0024	0,0212
	5,7	0,0006	0,0010	0,0030	0,0062	0,0028	0,0017	0,0020	0,0231	0,0680
5	3,0	0,0003	0,0011	0,0030	0,0072	0,0010	0,0086	0,0023	0,0051	0,0349
	4,0	0,0006	0,0018	0,0050	0,0896	0,0028	0,0353	0,0053	0,0184	0,0720

* - в числителе - ООО «НЛМК-Калуга»; в знаменателе - ПАО «НЛМК»

Для определения зон техногенного загрязнения определялся коэффициент концентрации (Kc). Установлено, что для всех промышленных предприятий характерны закономерности, заключающиеся в возрастании Kc с приближением к источникам загрязнения. По всей совокупности изучаемых тяжелых металлов данные показатели для ближних районов расположения ПАО «НЛМК» в 3,5-7,1 раза выше

относительно ООО «НЛМК-Калуга». Максимальные значения Kc наблюдаются для железа и свинца в непосредственной близости от источников загрязнения – 1,2 км от ООО «НЛМК-Калуга» и 4 км от ПАО «НЛМК».

Наибольшие значения выбросов наблюдались на расстоянии 1-3 км от электрометаллургического комбината и на дистанции 4-7 км ПАО «НЛМК».

Установленные показатели согласуются с данными М.Е. Берлянда [6], в соответствии которыми наибольшие концентрации выбросов создаются в приземном слое атмосферы на расстоянии 10–40 высот трубы (высота трубы «НЛМК-Калуга» – 50 м, «НЛМК» – 250 м).

В районе расположения «НЛМК-Калуга» средний уровень пылевой нагрузки выявлен только в ближней 2-х километровой зоне воздействия, а на остальной

части территории наблюдались низкие значения (рис. 1). В то же время для ПАО «НЛМК» с увеличением расстояния от источника загрязнения до 10-12 км пылевая нагрузка из высокой переходит в среднюю, а далее фиксируется низкая степень пылевой нагрузки. При этом в преобладающих по розе ветров северном и северо-восточном направлениях для «НЛМК-Калуга» и восточном для «НЛМК-Липецк» наблюдались повышенные уровни запыленности.

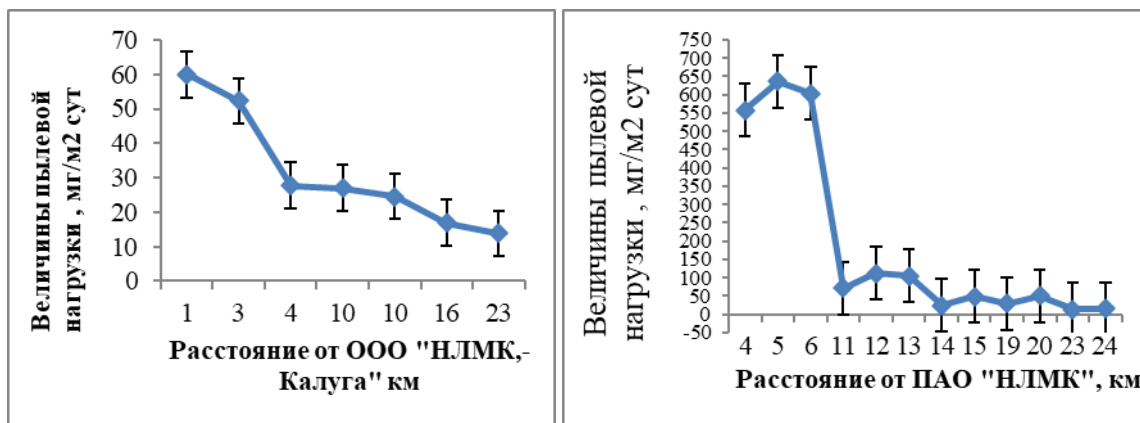


Рисунок 1. Пылевая нагрузка (Pn) на снежный покров на разных расстояниях от ООО «НЛМК-Калуга» и ПАО «НЛМК»

Общий суммарный показатель загрязнения (Zc) снежного покрова тяжелыми металлами в районе расположения ООО «НЛМК-Калуга» находится в диапазоне низких значений. Однако в непосредственной близости от промышленного предприятия установлено превышение концентраций ряда тяжелых металлов относительно фоновых показателей до 6-8-кратных значений.

В ближней промышленно-селитебной и дальней сельскохозяйственной зонах воздействия ПАО «НЛМК» выявлены средние и низкие показатели Zc, а максимально наблюдаемое превышение фоновых показателей тяжелых металлов достигает 16,7 раза.

Ранее проведенные исследования [7-8] показали, что катионный (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) и анионный (SO_4 , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Cl^-) количественный состав талых вод в ближних зонах воздействия ПАО «НЛМК» на порядок выше соответствующих значений района расположения «НЛМК-Калуга». Однако даже с учетом ПДК, установленных для питьевой воды [8], превышений нормативных значений не установлено. В тоже время для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение, установлены более жесткие нормативы по содержанию химических элементов [9], что обуславливает в большинстве случаев превышение допустимых уровней содержания Cu в талых водах районов расположения рассматриваемых металлургических предприятий в 1,2-5 раз. Для промышленно-селитебной зоны ПАО «НЛМК» также выявлено превышение предельных параметров содержания Zn и Ni в талых водах в 9 и 3,5 раза, соответственно.

Заключение

В результате проведенных исследований в районах расположения металлургических предприятий ПАО «НЛМК» и «НЛМК-Калуга» установлено, что приоритетными загрязнителями снежного покрова в твердофазной пылевой форме являются тяжелые металлы - Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd, Co. При этом основным компонентом пылевидных выпадений является железо, количество которого в выпадениях ПАО «НЛМК» и ООО «НЛМК-Калуга» достигает 70,2, и 83,6 %, соответственно.

Интенсивность загрязнения снежного покрова зависит от комплекса факторов: расстояния и направления от источников загрязнения, объемов выбросов, используемых технологий, вида производимой промышленной продукции, погодных условий и характера подстилающей поверхности. При этом для рассматриваемых предприятий характерны закономерности, заключающиеся в возрастании коэффициентов концентрации тяжелых металлов в снежном покрове с приближением к источникам загрязнения, которые для районов расположения ПАО «НЛМК» в среднем в 3,5-7,1 раза выше относительно ООО «НЛМК-Калуга».

Водорастворимые фракции тяжелых металлов находятся в снежном покрове в микроконцентрациях. Талые воды по своему анионно-катионному составу не превышают нормативов, установленных для питьевой воды и в 1,2-5 раз превосходят регламентируемые ПДК рыбохозяйственных водоемов по

меди и в 9 и 3,5 раза по цинку и никелю в промышленно-селитебной зоне ПАО «НЛМК».

Список литературы

1. Гос. доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году". - М.: НПП "Кадастр". 2019. 844 с.

2. НЛМК-Калуга [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kaluga.nlmk.com/> (дата обращения: 10.10.2019).

3. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. - Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 181 с.

4. Информационно-аналитическая система [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 05.03.2019).

5. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных

пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. - М.: ИМГРЭ, 1990. - 9 с.

6. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 272 с.

7. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К. и др. Загрязнение снежного покрова в 30 километровой зоне электрометаллургического завода ООО «НЛМК-Калуга» // Экология и промышленного производства. 2020. №2 (110). С. 51–55.

8. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К. и др. Оценка экологического состояния снежного покрова в 30-километровой зоне Новолипецкого металлургического комбината // Экология промышленного производства. 2021. № 2 (114). С. 34–40.

9. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

INFLUENCE OF DIFFERENT FERROUS METAL INDUSTRY PRODUCTION TECHNOLOGIES ON THE CONTENT OF HEAVY METALS IN SNOW COVER

Kurbakov D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova E.V., Sarukhanov A.V., Dementieva N.V., Novikova N.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

A comparative assessment of heavy metal pollution of the snow cover in 30-km impact zones of Novolipetsk Metallurgical Plant PJSC and NLMK-Kaluga electrometallurgical plant was carried out. The poly-elemental composition of the solid and liquid fractions was determined, and the values of geochemical and sanitary-hygienic indicators of snow cover pollution were presented. The priority pollutants of snow cover in solid-phase dust form are Fe, Mn, Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Cd, and Co, the main component of which is iron. Meltwater in its anionic-cationic composition does not exceed the standards established for drinking water, and in terms of copper content, it is 1.2-5 times higher than the MPC regulated for the water of fishery reservoirs. The intensity of snow cover pollution depends on a set of factors, among which the determining factors are the distance and direction from pollution sources, the technologies used and the emission volumes.

Keywords: ferrous metal industry, snow cover, emissions, ecology, heavy metals, industrial enterprises

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ТРИТИЯ ПО МЕХАНИЗМУ «ВОЗДУХ-РАСТЕНИЕ»

Лукашенко С.Н., Краснопеев С.А., Эдомская М.А., Томсон А.В.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: krasnopeeverser@gmail.com*

Тритий является одним из основных радионуклидов в выбросах атомных станций. В настоящее время объем годовых выбросов трития в мире оценивается величиной $n \cdot 10^{17}$ Бк. Учитывая темпы развития атомно-энергетической промышленности, можно утверждать, что количество трития в окружающей среде будет возрастать. Считается, что лишь незначительное количество воды, а соответственно и тритированных ее форм, поглощаются из воздуха. Соответственно, процессы миграции трития по механизму «воздух-растение» малоизучены. Целью данной работы является исследование поступления трития в растительные объекты данным путем. Для достижения поставленной цели был проведен вегетационный эксперимент, в ходе которого растения выращивались в теплицах с

поддерживаемой и контролируемой тритиевой атмосферой. Для изучения использовались несколько видов растений: огурцы, томаты, свекла, редис, картофель, кукуруза, петрушка, перец, салат, укроп и бобы. В процессе эксперимента отбирались образцы растений. При средней концентрации трития в водяных парах воздуха 810 Бк/л, была определена следующая концентрация трития в свободной воде растений: огурцы – 140-730 Бк/л, томаты – 150-630 Бк/л, свекла – 200-540 Бк/л, редис – 410 Бк/л, картофель – 80-240 Бк/л, кукуруза – 110-310 Бк/л, петрушка – 150-240 Бк/л, перец – 110-560 Бк/л, салат – 180-750 Бк/л, укроп – 170-460 Бк/л, бобы – 540 Бк/л. Следует отметить, что концентрация трития в различных вегетативных органах отличается. У огурцов концентрация трития в листьях и плодах превышает его концентрацию в стеблях в среднем в 1,5-2 раза. Средняя концентрация в листьях огурцов – 380 Бк/л, в плодах – 340 Бк/л, в стеблях – 210 Бк/л. У томатов концентрация в стеблях и плодах практически равна, тогда как концентрация в листьях почти в 2 раза больше. Средняя концентрация в листьях томатов – 530 Бк/л, в плодах – 280 Бк/л, в стеблях – 280 Бк/л. Также было проведено исследование влияние влажности почвы (в диапазоне от 30% до 50% влажности) и ее состава (отличалась доля органического вещества в почве) на поступление трития по механизму «воздух-растение». Результаты показали, что данное влияние отсутствует в обоих случаях. Комплекс полученных результатов позволяет сделать вывод о чрезвычайной важности механизма миграции трития по пути «воздух-растение» и необходимости учета его вклада при оценке радиоэкологической ситуации на потенциально радиационно-опасных объектах.

Ключевые слова: тритий, изотоп водорода, механизм миграции, воздух-растение, радиоэкология

Введение

Тритий – радиоактивный изотоп водорода. С одной стороны, он относительно безопасен, а с другой с каждым годом его образуется все больше. Основными источниками трития являются: ядерные испытания, атомные энергетические станции (годовой выброс ~ $n \cdot 10^{17}$ Бк), предприятия по переработке облученного ядерного топлива, предприятия по производству трития для его использования в научных и технических целях (Т – основной элемент термоядерного заряда, основное топливо будущих термоядерных реакторов) изделия с люминесцентными красками на основе трития и т.д. Учитывая темпы развития атомно-энергетической промышленности, можно утверждать, что количество трития в окружающей среде будет возрастать.

При оценке радиоэкологической ситуации важно определять концентрацию трития во всех природных объектах, важнейшим из которых является растительный покров. Влияние на конечную концентрацию трития в растениях может оказывать ряд факторов, в том числе путь поступления трития в растительный объект [1]. Считается, что практически вся вода и минеральные соли поступают в организм растений через корневую систему и лишь незначительное количество воды, а соответственно и тритированной ее форм, поглощаются из воздуха надземными частями растений [2]. Однако, существуют исследования, которые показывают возможное существование зависимости между содержанием трития в атмосферном воздухе и его содержанием в различных вегетативных органах при кратковременном [3] и длительном [4] воздействии. Но все же, процессы миграции трития по механизму «воздух-растение» малоизучены. В связи с этим, целью данной работы является исследование поступления трития в растительные объекты данным путем.

1. Экспериментальная часть

Для достижения поставленной цели с мая по октябрь 2021 года была проведена серия вегетационных экспериментов. Для исследования использовались такие культуры как: огурцы (*Cucumis sativus*), томаты (*Solanum lycopersicum*), свекла (*Béta vulgaris*), редис (*Raphanus sativus*), картофель (*Solanum tuberosum*), кукуруза (*Zéa máys*), петрушка (*Petroselinum*), перец (*Piper*), салат (*Lactuca*), укроп (*Anéthum*) и бобы (*Fabaceae*). Выращивались они в вегетативных сосудах объемом 5 л в торфогрунте «Жирнозем» постоянного состава и весом сухого грунта 2, 5 кг.

Эксперименты проходили в теплицах, где создавалась и поддерживалась определенная концентрация трития в водяных парах воздуха. Для этого они были загерметизированы, что способствовало затрудненному воздухообмену. Тритированная вода распылялась при помощи двух ультразвуковых распылителей со средней производительностью каждого 250 мл/час, концентрация тритированной воды равнялась 3500 Бк/л. Для поддержания приемлемой для роста и развития растений температуры (выставлялась температура 22°C), использовался мобильный кондиционер с производительностью 2050 Вт и расходом воздуха 350 м³/час. Для поддержания уровня влажности и контроля концентрации трития в водяных парах воздуха теплицы использовались два осушителя воздуха с производительностью до 10 л/сутки, конденсат из которых отбирался на анализ утром и вечером каждый день.

Результаты контроля концентрации трития в водяных парах воздуха теплицы приведены на рисунке 1. Средняя концентрация ночью составила – 930 Бк/л. Средняя концентрация днем составила – 720 Бк/л.

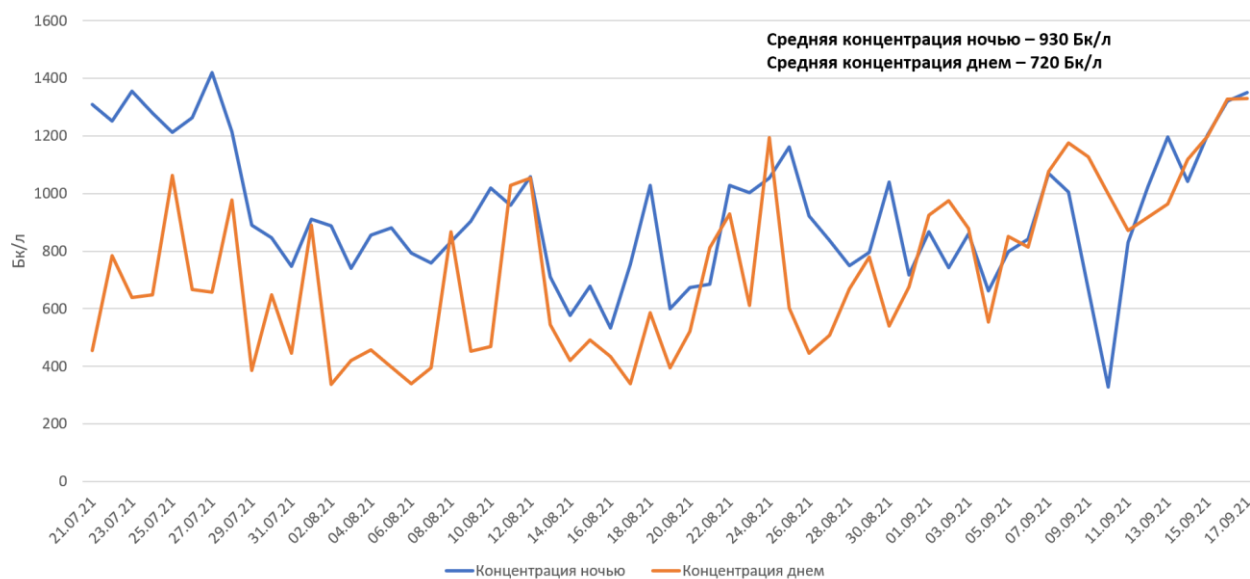


Рисунок 1. Концентрация трития в водяных парах воздуха теплицы

Для исследования динамики изменения концентрации трития в растительных объектах было взято 12 вегетационных сосудов, в которых выращивались томаты. Начиная с 35 дневного возраста растений и по мере набора ими вегетационной массы отбирались для анализа по 1-2 листа с каждого растения в течение всего периода вегетации.

Для исследования распределения концентрации трития по вегетационным органам в вегетационных сосудах выращивались томаты, огурцы и свекла до периода плодоношения, после чего отбирались целые растения и разбирались на вегетативные органы с последующим анализом.

Для исследования влияния состава почвы на конечную концентрацию трития в растительных объектах были взяты по 5 вегетационных сосудов на каждую культуру (томаты и свекла) с разным, но известным соотношением торфогрунта «Жирнозем» и дерново-подзолистой почвы от 1:5 до 5:1.

Для исследования влияния влажности на поступление трития по механизму «воздух-растение» были взяты вегетационные сосуды с почвой разной влажности (в диапазоне от 30% до 50%). Влажность определялась отношением массы воды к сухому грунту (1500 г). Влажность поддерживалась ежедневным доведением до определенной массы сосуда водой.

Из отобранных образцов растительных объектов отжимался сок, от которого фугованием отделялась взвешенный органический остаток. Далее, посредством перегонки сока (иногда двойной) с последующим смешением 7 мл дистиллята с 13 мл сцинтиляционного коктейля Optiphase или UltimaGold готовилась аналитическая проба. Анализ производился при помощи сцинтиляционного счетчика TRI-CARB. Предел обнаружения составил 7 Бк/л.

2. Результаты

2.1. Динамика изменения концентрации трития

Динамика изменения концентрации трития в листьях томатов представлена на диаграмме (рис. 2). На данной диаграмме приведены коэффициенты перехода влаги из воздуха в растения, которые определены как отношения концентрации трития в листьях томатов к среднесуточной концентрации трития в водяных парах (ВП) воздуха теплицы, которая соответствует суткам, в которые был произведен отбор листьев. Среднее значение коэффициента перехода составило 32%.

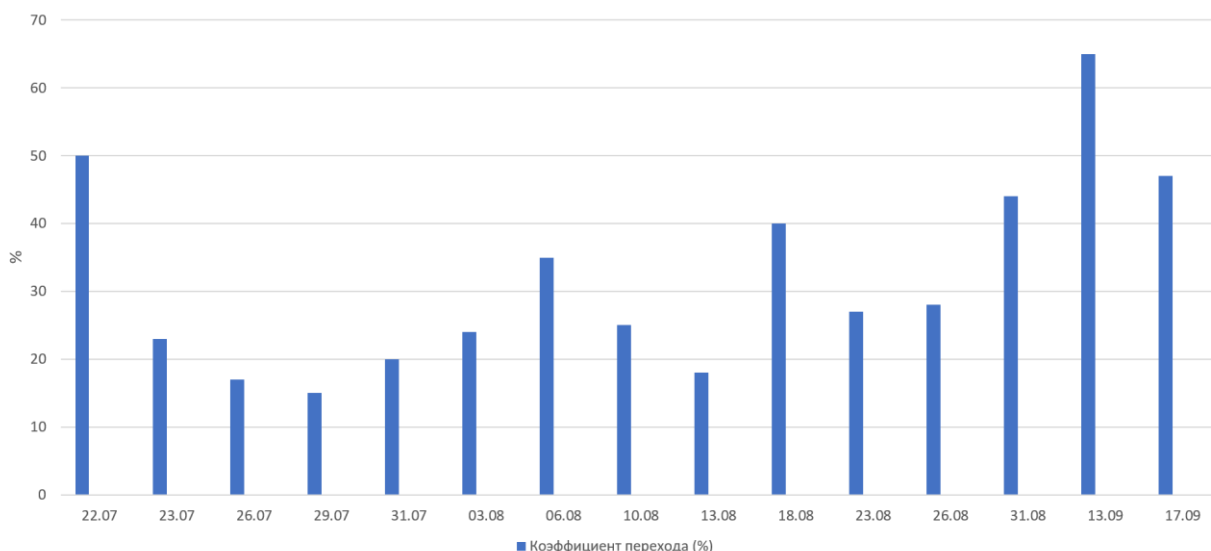


Рисунок 2. Коэффициенты перехода влаги из воздуха в растения

2.2. Распределение концентрации трития по вегетативным органам

Результаты изучения распределения концентрации трития по вегетативным органам приведены на рисунке 3. В среднем по ряду растительных объектов (проанализировано 9 объектов) концентрация в

листьях огурцов – 380 Бк/л, в плодах – 340 Бк/л, в стеблях – 210 Бк/л. В среднем по ряду растительных объектов (проанализировано 24 объекта) в листьях томатов – 530 Бк/л, в плодах – 280 Бк/л, в стеблях – 280 Бк/л. В среднем по ряду растительных объектов (проанализировано 3 объекта) в листьях свеклы – 427 Бк/л, в плодах – 418 Бк/л.

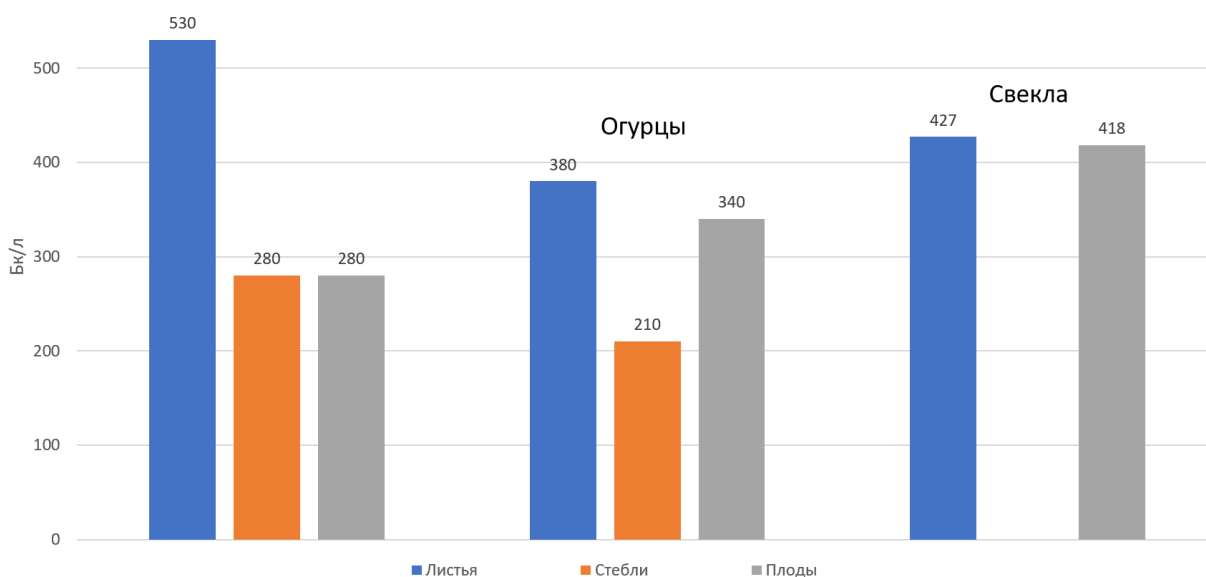


Рисунок 3. Распределение концентрации трития по вегетативным органам

2.3. Влияние состава и влажности почвы

Некоторые исследователи [5] отмечают наличие избирательной сорбции трития в геологических средах, а также изменение скорости его миграции в зависимости от состава почвы. Поэтому было принято решение провести исследование влияния состава почвы на конечную концентрацию в растительных

объектах на примере томатов и свеклы. Результаты исследования влияния почвы на конечную концентрацию трития приведены на рисунке 4.

Также было проведено исследование влияние влажности почвы (в диапазоне от 30% до 50% влажности) на поступление трития по механизму «воздух-растение».

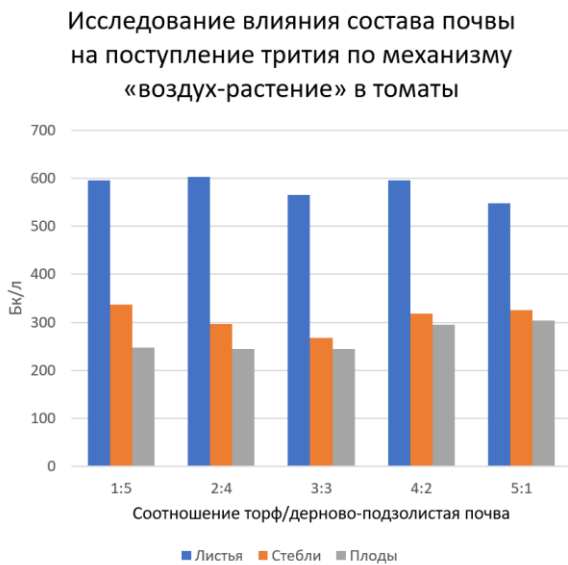


Рисунок 4. Влияние состава почвы

2.4. Исследование перехода трития в другие культуры

Также была определена концентрация трития в свободной воде других культур, диапазон приведенных ниже данных содержит данные по концентрациям, полученным в различные периоды вегетации, а также по различным вегетативным органам: редис – 410 Бк/л, картофель – 80-240 Бк/л, кукуруза – 110-310 Бк/л, петрушка – 150-240 Бк/л, перец – 110-560 Бк/л, салат – 180-750 Бк/л, укроп – 170-460 Бк/л, бобы – 540 Бк/л.

3. Обсуждение результатов

Результаты, полученные при изучении динамики концентрации трития в листьях томатов показывают, что явного влияния периода вегетации на поступление трития в растения не наблюдается. Однако, стоит отметить наличие тенденции на повышение концентрации трития в листьях томатов на поздних периодах вегетации растений.

Результаты изучения распределения концентрации трития по вегетативным органам позволяют сделать обоснованное предположение о том, что распределение трития отличается в зависимости от вегетативного органа, а также от исследуемой культуры. У огурцов концентрация трития в листьях и плодах превышает его концентрацию в стеблях в среднем в 1,5-2 раза. У томатов концентрация в стеблях и плодах практически равна, тогда как концентрация в листьях почти в 2 раза больше. У свеклы почти нет различия концентрации по вегетативным органам.

Результаты исследования зависимости состава и влажности почвы на конечную концентрацию трития в растительных объектах позволяют сделать

обоснованное предположение о том, что явного влияния состава почвы на конечную концентрацию в растительных объектах не наблюдается. А также, что явного влияния влажность почвы на поступление трития по механизму «воздух-растение» не оказывает.

Комплекс полученных результатов позволяет сделать вывод о чрезвычайной важности механизма миграции трития по пути «воздух-растение» и необходимости учета его вклада при оценке радиологической ситуации на потенциально радиационно-опасных объектах.

Список литературы

1. Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н. Оценка аэрального поглощения НТО культурой *Helianthus Annuus* в условиях Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. 2020. Том 29. №1. с. 79–89.
2. Полевой В.В. Физиология растений: Учеб. Для биол. спец. вузов. // М.: Высш. шк. 1989. с.192.
3. D. Galeriu, A. Melintescu, S. Strack, M. Atarashi-Andoh, S.B. Kim An overview of organically bound tritium experiments in plants following a short atmospheric HTO exposure // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. V.1118. pp.40–56.
4. V.Y. Korolevych, S.B. Kim Relation between the tritium in continuous atmospheric release and the tritium contents of fruits and tubers // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. V.1118. pp.113-120.
5. Yanguo Teng, Rui Zuo, Jinsheng Wang, Qinhong Hu, Zongjian Sun, Ni Zeng Detection of tritium sorption on four soil materials // Journal of Environmental Radioactivity. 2011. V.102.pp. 212–216.

STUDY OF TRITIUM MIGRATION IN THE “AIR-PLANT” SYSTEM

Lukashenko S.N., Krasnopeev S.A., Edomsкая M.A., Tomson A.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

Tritium is one of the main radionuclides in the emissions from nuclear power plants. At present, the activity of annual tritium emissions in the world is estimated at $n \cdot 10^{17}$ Bq. Considering the development pace of the nuclear power industry, it can be argued that the amount of tritium in the environment will increase. It is believed that only a small amount of water, and its tritiated forms, is absorbed from the air. So, the processes of tritium migration within the “air-plant” system are poorly studied. The purpose of this work is to study the entry of tritium into plants by the “air-plant” mechanism. To achieve this goal, we carried out a vegetative experiment, during which the plants were grown in greenhouses with a maintained and controlled tritium atmosphere. Several types of plants were used for the study: cucumbers, tomatoes, beets, radishes, potatoes, corn, parsley, peppers, lettuce, dill and beans. Plant samples were taken during the experiment. With an average tritium concentration in air water vapour of 810 Bq/L, the following tritium concentrations in free water of plants were determined: cucumbers - 140-730 Bq/L, tomatoes - 150-630 Bq/L, beets - 200-540 Bq/L, radish - 410 Bq/L, potatoes - 80-240 Bq/L, corn - 110-310 Bq/L, parsley - 150-240 Bq/L, pepper - 110-560 Bq/L, lettuce - 180-750 Bq/L, dill - 170-460 Bq/L, beans - 540 Bq/L. It should be noted that the tritium concentrations in various vegetative organs differ. In cucumbers, the tritium concentration in the leaves and fruits exceeds its concentration in the stems by an average of 1.5–2 times. The average concentration in the cucumber leaves is 380 Bq/L, in the fruits - 340 Bq/L, and the stems - 210 Bq/L. In tomatoes, the concentration in stems and fruits is almost equal, while the concentration in leaves is almost 2 times higher. The average concentration in the tomato leaves is 530 Bq/L, in the fruits - 280 Bq/L, and the stems - 280 Bq/L. We also performed a study of the influence of soil moisture (in the range from 30% to 50% moisture) and its composition (the proportion of organic matter in the soil differed) on the intake of tritium through the air-plant mechanism. The results showed that this effect was absent in both cases. The set of the results allows us to conclude that the mechanism of tritium migration by the “air-plant” path is extremely important and reveals the need to consider its contribution when assessing the radioecological situation at potentially radiation-hazardous facilities.

Keywords: *tritium, hydrogen isotope, migration mechanism, air-plant, radioecology*

УДК 631.4:502.76

ПРОГНОЗ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ^{137}Cs БРЯНСКОЙ, КАЛУЖСКОЙ, ТУЛЬСКОЙ И ОРЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ В 2022 И 2025 г.

Орлов П.М., Аканова Н.И.

*ФГБНУ «ВНИИ Агрoхимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, г. Москва, ул. Прянишникова 31а
e-mail: N_Akanova@mail.ru*

Проведена оценка содержания ^{137}Cs в почвах Калужской, Тульской и Орловской области. Расчеты проводились на основе экспериментальных данных по загрязнению почв ^{137}Cs названных областей в 2014 году и периодов полувыведения ^{137}Cs из почвы с 1992 по 2014 г. Оценены средние значения и верхние границы содержания на уровне районов. Оценено время достижения уровня загрязнения в 1 Ки/км² средних значений и верхних границ. Предложен новый мелиорант, снижающий кислотность почвенного раствора и содержащий повышенную концентрацию основных гидроксидов по сравнению с кислотными.

Ключевые слова: *плодородие почв, техногенные радионуклиды, ^{137}Cs , мониторинг, загрязнение почв*

Нами изучалось снижение загрязнения почв ^{137}Cs почв, Калужской, Тульской и Орловской области с 1992 по 2014 г [1]. На основе данных по снижению уровней загрязнения почв ^{137}Cs были оценены периоды полувыведения этого радионуклида из почв, Калужской, Тульской и Орловской области. Численные значения периодов полувыведения существенно отличались от периода полураспада ^{137}Cs в сторону

снижения. Это означает, что в механизм очищения почв от ^{137}Cs включены миграционные процессы. На основе количественных данных о периодах полувыведения мы рассчитали содержание ^{137}Cs в почвах сильно и умеренно загрязненных районов Калужской, Орловской и Тульской области в 2022 и 2025 г. Результаты представлены в табл.1.

Таблица 1

Прогноз содержания ^{137}Cs в почвах сильно и умеренно загрязненных районов Калужской, Орловской и Тульской области

Район	Среднее значение/верхняя граница, Ки/км ² .			Срок и (дата) достижения загрязнения в 1 Ки/км ² , среднее значение / верхняя граница, год ¹
	2014	2022	2025	
Калужская область (период полувыведения равен 22 г)				
Жиздринский	1,7/3,0	1,3/2,3	1,2/2,1	17/35 (2031/2049)
Людиновский	0,9/1,3	0,7/1,0	0,64/0,92	-/-
Ульяновский	2,7/4,1	2,1/3,2	1,9/2,9	31/44 (2045/2058)
Хвастовичский	2,1/3,7	1,6/2,9	1,5/2,6	24/42 (2038/2056)
Тульская область (период полувыведения равен 20 г)				
Арсеньевский	2,7/3,5	2,0/2,6	1,8/2,4	28/36 (2042/2050)
Белевский	1,2/2,0	0,9/1,5	0,8/1,4	5/20 (2019/2034)
Богородский	1,4/2,3	1,1/1,7	1,0/1,6	10/24 (2024/2038)
Киреевский	1,0/2,0	0,76/1,5	0,7/1,4	0/20 (-/2034)
Плавский	3,0/5,1	2,3/3,9	2,0/3,5	32/47 (2048/2061)
Узловской	1,7/2,6	1,3/2,0	1,2/1,8	15/28 (2029/2042)
Чернский	1,4/2,4	1,1/1,8	1,0/1,6	10/25 (2024/2039)
Орловская область (период полувыведения равен 18 г)				
Болховский	1,6/2,5	1,2/1,8	1,0/1,6	12/24 (2026/2038)
Глазуновский	0,9/1,5	0,7/1,1	0,6/1,0	-/11 (-/2025)
Дмитровский	0,9/1,4	0,7/1,0	0,6/0,9	-/9 (-/2023)
Мценский	0,9/1,3	0,7/1,0	0,6/0,9	-/8 (-/2022)
Троснянский	0,9/1,5	0,7/1,1	0,6/1,0	-/11(-/2025)
Урицкий	0,8/1,3	0,6/1,0	0,5/0,9	-/8 (-/2022)

¹ Начало отсчета 2014 г

В Калужской области в Жиздринском, Ульяновском и Хвастовичском районе среднее содержание и верхняя граница ^{137}Cs в почве на радиоактивных пятнах превышает значение 1 Ки/км² в 2014 г. По нашему прогнозу превышение также сохранится в 2022 и 2025 г. В Людиновском районе верхняя граница превышает значение 1 Ки/км². В 2022 году верхняя граница достигла названного значения и в 2025 года она станет меньше 1 Ки/км². В остальных загрязненных районах Калужской области содержание ^{137}Cs в почве существенно ниже уровня 1 Ки/км².

В Тульской области в Арсеньевском, Белевском, Богородском, Плавском, Узловском и Чернском районе среднее содержание и верхняя ^{137}Cs в почве превышали уровень в 1 Ки/км² в 2014 г. В 2022 и 2025 году в Арсеньевском, Киреевском и Плавском районах по нашему прогнозу превышение сохранится. В Белевском районе среднее значение достигнет уровня в 1 Ки/км² в 2019 г. В Киреевском районе выше уровня 1 Ки/км² находятся верхние границы.

В Орловской области только в Болховском районе среднее значение превышало уровень 1 Ки/км² в 2014 г. Превышение сохранится и в 2022 и 2025 г. Снижение среднего значения до уровня в 1 Ки/км² прогнозируется в 2026 г. Верхние границы

содержания ^{137}Cs в почве представленных районов превышали уровень 1 Ки/км² в 2014 г. В 2022 году превышение сохранится в Болховском, Глазуновском и Троснянском районе. В 2025 г превышение будет только в Болховском районе.

На основе экспериментальных данных по уровню загрязнения почв в 2014 г [2] и периодов полувыведения ^{137}Cs из почвы оценили время достижения средних значений и верхних границ содержания названного радионуклида в почве уровня в 1 Ки/км². Эти результаты также представлены в табл. 1.

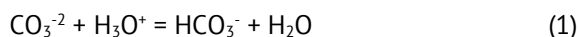
В Ульяновском и Хвастовичском районе Калужской области время достижения средних значений составляет 31 и 24 г, верхних границ – 44 и 42 г, соответственно. Начало отсчета 2014 г.

В Тульской области в Арсеньевском и Плавском районе время достижения средних значений равно 28 и 32 г, верхних границ – 36 и 47 лет. Снижение верхних границ содержания ^{137}Cs в Белевском Богородском, Узловском и Чернском районе находится в интервале 20–28 лет.

Проблема радиоактивного загрязнения почв и соответственно производство сельскохозяйственной продукции с повышенным содержанием ^{137}Cs в

Калужской и Тульской области сохранится еще продолжительное время.

Одним из приемов снижения поступления ^{137}Cs в урожай сельскохозяйственных культур является снижение кислотности почв. С этой целью проводится известкование почв. Внесение известковых материалов приводит к связыванию протонов карбонат ионами по реакции 1:

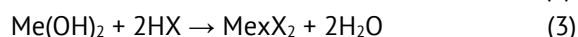
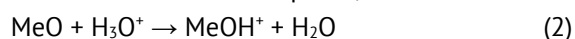


Эта реакция обратима и равновесна. Реакция является гетерофазной и во -времени, поэтому равновесие достигается за достаточно длительный срок. При многократном внесении извести в почву в повышенных дозах в течение длительного времени оно достижимо.

С аварии момента аварии на ЧАЭС прошло более 35 лет, в течение которых в почву вносилась известь, соответственно, за это время в почве установилось кислотно- основное равновесие в соответствии с реакцией 1. Дальнейшее внесение в почву известковых материалов не приведет к существенному снижению кислотности почв и к снижению поступления ^{137}Cs в урожай сельскохозяйственных культур.

Известкование почвы является основным приемом снижения уровня кислотности и поступления радионуклидов в растения. Однако, многократное и длительное применение известкования снижает эффективность данного метода. Целесообразно сменить мелиорант. Для этой цели подходят минералы или шлаки в состав которых входят основные оксиды металлов. При этом содержание основных оксидов (гидроксидов) в мелиоранте должно превышать содержание кислотных оксидов. При внесении такого мелиоранта в почву будет протекать реакция связывания ионов водорода основными оксидами

(гидроксидами) с образованием основных или средних солей в соответствии с реакциями 2 и 3.



Реакция взаимодействия ионов водорода с основными оксидами (гидроксидами) в большинстве случаев является необратимой. Важно, чтобы в состав мелиоранта входили оксиды или гидроксиды щелочно-земельных элементов магния и кальция. Избыточное содержание (по молям, эквивалентам) оксидов (гидроксидов) щелочно-земельных элементов по сравнению с кислотными оксидами в мелиоранте даст возможность снижать кислотность почв в присутствии избыточных количеств известковых материалов [3].

Следует обратить внимание на железосодержащий продукт ООО «Горно-химическая компания «Ультра СИ» г. Асбест, Свердловской области химический состав которого приведен в табл.2, соотношение между кислотными, амфотерными и основными оксидами – в табл. 3.

Наблюдается большой избыток основных оксидов над кислотными. Амфотерных оксидов немного, и они не вносят существенного вклада в кислотно-основное равновесие. Содержание (эквиваленты) оксида магния значительно больше, чем содержание кислотных оксидов. Часть магния находится в виде гидроксида $\text{Mg}(\text{OH})_2$. По всей видимости, железосодержащий продукт представляет собой механическую смесь веществ. Эта смесь будет взаимодействовать с веществом почвы существенно снижая уровень кислотности почв.

Целесообразно провести полевые опыты на загрязненной от Чернобыльской аварии территории о пригодности данного продукта к применению снижения поступления ^{137}Cs в урожай.

Таблица 2

Химический состав железосодержащего продукта

Оксид	Содержание в 100 г продукта		
	грамм	моли	эквивалент
H ₂ O	35,42	1,97	1,97
Fe ₂ O ₃	13,9	0,0869	0,260
MgO	21,9	0,548	1,095
SO ₃	12,2	0,1525	0,305
SiO ₂	10,1	0,168	0,337
Al ₂ O ₃	2,5	0,025	0,074
CaO	2,5	0,045	0,089
NiO	0,6	0,008	0,016
Cr ₂ O ₃	0,5	0,003	0,010
MnO	0,3	0,004	0,01

Количество (суммарное) оксидов в 100 г продукта

Тип оксида	Суммарное количество	
	моли	эквивалент
кислотные (SO ₃ + SiO ₂)	0,321	0,642
основные	0,695	1,47
амфотерные	0,028	0,085

Список литературы

1. Орлов П.М., Аканова Н.И. Периоды полувыведения и миграционная способность ¹³⁷Cs из почв, загрязненных Чернобыльскими выпадениями на территории Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей. // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021.№5, С. 101–104.

2. Орлов П.М., Гладышева О.В., Лунев М.И., Аканова Н.И. Зависимость содержания техногенных и естественных радионуклидов в почвах Центрального

федерального округа от интенсивности применения минеральных удобрений и химических мелиорантов. Международный сельскохозяйственный журнал. 2018.№1, С. 37–42.

3. Орлов П.М., Аканова Н.И. Экологические и радиохимические проблемы химической мелиорации почв с повышенным содержанием ¹³⁷Cs. Международный сельскохозяйственный журнал. 2019.№2, С. 58–61.

FORECAST OF SOIL POLLUTION LEVELS OF ¹³⁷Cs OF THE BRYANSK, KALUGA, TULA AND OREL REGIONS IN 2022 AND 2025

Orlov P.M., Akanova N.I.

The content of ¹³⁷Cs in the soils of the Kaluga, Tula and Orel regions was assessed. The calculations were based on experimental data on soil pollution of ¹³⁷Cs of these areas in 2014 and half-lives of ¹³⁷Cs from soil from 1992 to 2014. The time to reach the pollution level in 1 Ci/km² of the average values and upper limits was estimated. A new reclamation agent is proposed, which reduces the acidity of the soil solution and contains an increased concentration of basic hydroxides compared to acidic ones.

Keywords: soil fertility, technogenic radionuclides, ¹³⁷Cs, monitoring, soil pollution

УДК 57.043

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ РАСТЕНИЙ

Пирогова П.А., Здобнова Т.А., Гринберг М.А., Воденеев В.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, Российская Федерация
e-mail: poly.h@mail.ru

Ионизирующее излучение (ИИ) оказывает огромное влияние на живые организмы, реализующееся, во многом, за счёт изменения статуса сигнальных систем и модификации стрессовых сигналов. Один из значимых типов стрессовых сигналов растений — электрические сигналы (ЭС). ИИ способно оказывать эффекты на параметры ЭС, индуцированных другими раздражителями. Однако мишени такого влияния не выявлены и требуют изучения. В основе изменений, возникающих при воздействии ИИ, лежит как физиологическая, так и генетическая регуляция. Исследования были выполнены на 15-дневных проростках пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) сорта «Дарья». На основании анализа литературы выявлены потенциальные мишени в реализации эффекта ИИ на ЭС. При действии хронического облучения показано уменьшение экспрессии гена калиевых каналов SKOR. Однако через сутки после прерывания хронического облучения исчезает эффект ИИ на параметры ЭС, что позволяет предположить участие генетических и физиологических механизмов в эффекте ИИ на параметры ЭС.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, малые дозы, электрические сигналы, *Triticum aestivum* L., ионные каналы, H⁺-АТФаза, SKOR

Ионизирующее излучение (ИИ) оказывает огромное влияние на живые организмы, реализующееся, во многом, за счёт изменения статуса сигнальных систем и модификации стрессовых сигналов. Один из значимых типов стрессовых сигналов растений — электрические сигналы (ЭС) — распространяющиеся изменения мембранного потенциала — потенциал действия и переменный потенциал (ВП). В результате распространения ЭС изменяется активность ряда физиологических процессов, включая фотосинтез, транспирацию, экспрессию генов. К настоящему времени показано, что ИИ способно оказывать эффект на параметры ЭС, вызванных локальным стрессором: у облучённых растений увеличивается амплитуда и скорости распространения. В основе изменений, возникающих при воздействии ИИ, лежит регуляция физиологическом и генетическом уровне, что реализуется, преимущественно, за счёт активных форм кислорода (АФК), способных не только к повреждающему действию, но и к регуляции различных систем. Физиологическая регуляция компонентов ЭС заключается в изменении активности под воздействием АФК, а генетическая — основывается на изменении уровня экспрессии генов, что обусловлено прямым (деструктивное действие ИИ) и косвенным (изменение активности транскрипционных факторов) влиянием ИИ. Регуляцией на уровне генома объясняется долгосрочность эффектов ИИ у облучённых растений. Следовательно, для выяснения механизмов влияния ИИ на ЭС необходимо разделить физиологические и генетические пути регуляции.

Исследования проводили на трёх экспериментальных группах 15-дневных проростках пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) сорта «Дарья»: с постоянным облучением (ИИ), с прерыванием облучения (СтопИИ) и контроль. Две экспериментальные группы (ИИ и СтопИИ) облучали с помощью β-излучателя ⁹⁰Sr-⁹⁰Y с активностью 0,1 МБк и мощностью дозы примерно 31,3 мГр/час. Продолжительность облучения растений составляла 15 дней. Максимальная накопленная доза составляла около 11,3 мГр. Облучение прерывали на 15 день выращивания, измерения проводили в день прерывания и на следующий день. Группу с постоянным облучением и контроль использовали для оценки генетической регуляции

путем анализа экспрессии генов. В работе анализировали гены белков, которые потенциально могут обуславливать эффекты ИИ на электрогенез. Уровень экспрессии генов определяли методом ПЦР «в реальном времени». Разработку праймеров интересующих генов для ПЦР «в реальном времени» проводили с соблюдением необходимых параметров. В качестве референсных генов использовали β-актин (ACTB) и гомолог белка слияния вакуолей (MON1). Полученные результаты анализировали по методике ΔΔCt. Сохранение эффекта ИИ оценивали по параметрам ЭС. ВП регистрировали экстраклеточно с помощью AgCl макроэлектродов. Раздражение наносили нагреванием до 65 °С кончика второго листа в заполненной водой ячейке в течение 7 минут.

Теоретический анализ потенциальных мишеней ИИ позволил выделить ключевые компоненты электрогенеза, воздействие на которые может объяснить наблюдаемую в экспериментах модификацию ЭС. К ним относятся, в первую очередь, H⁺-АТФаза, NADPH-оксидаза и ионные каналы различных типов. В ходе работы подобраны праймеры для генов белков, участвующих в электрогенезе: H⁺-АТФазы (HA1), NADPH-оксидазы (RBOHs), анионных (CLC1 и ALMT1), калиевых (SKOR и AKT1) и кальциевых (TPC1) каналов. По результатам ПЦР «в реальном времени» определили относительный уровень экспрессии генов интереса у облучённых растений. Показано, что экспрессия гена калиевого канала SKOR уменьшилась под влиянием ИИ.

После прерывания облучения наблюдали изменение некоторых параметров ВП по сравнению с постоянно облучаемой группой растений. Через сутки после прерывания облучения показано снижение амплитуды и скорости деполяризации ВП по сравнению с постоянно облучаемой группой.

Проведенный анализ относительной экспрессии генов интереса и определение длительности сохранения эффекта ИИ на ЭС позволяют предположить участие как физиологической, так и генетической регуляции в эффектах ИИ на стрессовый сигналинг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Проектов № 075-15-2021-1068 и НЦФМ-10-ИПФ-2022.

ANALYSIS OF THE MECHANISMS OF INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON ELECTRICAL SIGNALS OF PLANTS

Pirogova P.A., Zdobnova T.A., Grinberg M.A., Vodenev V.A.

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Ionizing radiation (IR) has a huge impact on living organisms, which is realized, in many ways, by changing the status of signaling systems and modifying stress signals. One of the significant types of stress signals are electrical signals (ES). IR is able to have effects on the parameters of ES induced by other stimuli. However, the targets of such influence have not been identified. The studies were carried out on 15-day seedlings of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) of the "Daria" variety. Based on the analysis of the literature, potential targets in the implementation of the IR effect on ES have been identified. Under the action of chronic irradiation, a decrease in the expression of the potassium channel gene is shown. However, a day after the interruption of chronic irradiation, the effect of IR on ES parameters disappears, which suggests the participation of genetic and physiological mechanisms in the effect of IR on ES parameters.

Keywords: *ionizing radiation, small doses, electrical signals, Triticum aestivum L., ion channels, H⁺-ATPase, SKOR*

Ionizing radiation (IR) has a huge impact on living organisms, which is realized, in many ways, by changing the status of signaling systems and modifying stress signals. One of the significant types of stress signals of plants is electrical signals (ES) – action potential and variable potential (VP). As a result of the spread of ES, the activity of a number of physiological processes changes, including photosynthesis, transpiration, and gene expression. To date, it has been shown that IR is able to have an effect on the parameters of ES caused by a local stressor. The changes that occur under the influence of IR are based on the mechanisms of both physiological and genetic regulation, mostly due to reactive oxygen species (ROS), capable not only of damaging action, but also of regulating various systems. Therefore, in order to clarify the mechanisms of IR influence on ES, it is necessary to separate the physiological and genetic ways of regulation.

The studies were carried out on three experimental groups of 15-day seedlings of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) of the "Daria" variety: with constant irradiation (IR), with interruption of irradiation (STOP) and control. Two experimental groups (IR and StopIR) were irradiated with a ⁹⁰Sr-⁹⁰Y β-emitter with an activity of 0.1 MBq and a dose rate of approximately 31.3 mcg/hour. The group with constant irradiation and control were used to assess genetic regulation by analyzing gene expression by real-time PCR. The development of primers of the genes of interest for real-time PCR was carried

out independently in compliance with the necessary parameters. β-actin (ACTB) and the homolog of the vacuole fusion protein (MON1) were used as reference genes. The obtained results were analyzed using the ΔΔCt method. The preservation of the IR effect was evaluated by the ES parameters. VP was recorded extracellularly using macroelectrodes.

Theoretical analysis of potential IR targets allowed us to identify the key components of electrogenesis, the impact on which can explain the modification of ES observed in experiments. These include, first of all, H⁺-ATPase, NADPH-oxidase and ion channels of various types. In the course of the work, primers were selected for the genes of proteins involved in electrogenesis. Based on the results of real-time PCR, the relative level of expression of genes of interest in irradiated plants was determined. It was shown that the expression of the SKOR potassium channel gene decreased. A day after the interruption of irradiation, a decrease in the amplitude and rate of depolarization of the VP was shown in comparison with the constantly irradiated group.

The analysis of the relative expression of the genes of interest and the duration of the IR effect on ES suggest the participation of physiological regulation along with genetic regulation in the effects of IR on stress signaling.

The work was carried out with the financial support of Projects No. 075-15-2021-1068 and NCFM-10-IPF-2022.

УДК: 57.042, 582.6/9

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТЕНИЙ ARABIDOPSIS THALIANA ЛИНИИ CML39 В ОТВЕТ НА ДВУХФАКТОРНУЮ КОМБИНАЦИЮ АБИОТИЧЕСКИХ СТРЕССОРОВ

**Подобед М.Ю.¹, Бабина Д.Д.¹, Блинова Я.А.¹, Морозова Н.С.², Крылова П.С.³,
Бондаренко Е.В.¹**

¹ ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского, г. Калуга, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,
г. Москва, Российская Федерация

В рамках изучения молекулярно-биологических основ устойчивости растений к действию стрессовых факторов различной природы, включая радиационный, проведена серия экспериментов с использованием линии *cm139* модельного растения *Arabidopsis thaliana*. Эта линия отличается потерей функции гена CML39, кодирующего кальмодулин-подобный белок – сенсор Ca^{2+} . На первом этапе ответ растений на воздействие пяти абиотических стрессовых факторов по отдельности и их комбинации оценивали по морфометрическим параметрам, наиболее информативным из которых оказалась длина корня. В отличие от растений дикого типа (Col-8, использованного в качестве референтного) отмечена статистически значимая стимуляция роста корней проростков *cm139* после различных воздействий, в том числе в сочетании с гамма-излучением, по сравнению с контролем.

Ключевые слова: кальциевый сигналинг, *Arabidopsis thaliana*, гамма-облучение, абиотический стресс, комбинация стрессоров

Абиотические стрессовые факторы, такие как экстремальные температуры, дефицит воды, засоление, гербициды и ионизирующее излучение могут негативно повлиять на прорастание семян и рост растений. На сегодняшний день большинство исследований сосредоточено на реакции растений на одно стрессовое воздействие, а в полевых условиях на растения влияет комбинация стрессовых факторов, что может приводить к значительному ущербу для урожая. В целом, действие комбинации двух или более абиотических стрессов может быть сильнее, чем воздействие каждого из стрессовых факторов по отдельности.

В данной работе представлены эксперименты по комбинациям выбранных стрессовых факторов в дозах (концентрациях), которые ранее были оценены как стимулирующие.

Семена облучали на уникальной научной установке ГУР-120 в ФГБНУ ВНИИРАЭ (источник γ -квантов – ^{60}Co) в бумажных пакетах. Доза острого облучения 25 Гр при мощности дозы 60 Гр/ч.

Засоление моделировали добавлением в среду NaCl (M = 58.4 г/моль, Serva). NaCl добавляли в среду

1/2МС перед автоклавированием в концентрациях 5 мМ, методика была адаптирована из [1].

Окислительный стресс моделировали с помощью добавления метилвиологена (МВ, N,N'-диметил-4,4'-дипиридила дихлорид, M = 257.16 г/моль, Sigma-Aldrich) в среду 1/2МС в концентрации 0.001 мкМ перед автоклавированием.

В качестве агента для создания дефицита воды на среде использовали полиэтиленгликоль (ПЭГ) (молярный вес 5000–7000 г/моль, PanReac Applichem) в конечной концентрации 1 %. 20 мл раствора ПЭГ добавляли сверху на застывшую среду 1/2МС в пропорции 1:1 и выливали спустя 24 часа. За 24 часа раствор ПЭГ диффундирует в агарозную среду и понижает ее водный потенциал [1, 2].

При моделировании гипертермического воздействия семена нагревали в термостате (BINDER BD 115) в бумажных конвертах при температуре 50 °С. Время нагрева составляло 2 часа. Методика нагрева семян была адаптирована из [3].

Комбинации стрессоров показаны на рисунке 1.

К	γ -лучи	t °C	МВ	NaCl
t °C	t °C + γ -лучи			
МВ	МВ + γ -лучи	МВ + t °C		
NaCl	NaCl + γ -лучи	NaCl + t °C	NaCl + МВ	
ПЭГ	ПЭГ + γ -лучи	ПЭГ + t °C	ПЭГ + МВ	ПЭГ + NaCl

Рисунок 1. Эксперименты: все изучаемые факторы и их комбинации : γ -облучение (25 Гр), метилвиологен (МВ, 0.001 мкМ), температура (50 °С в течение 2 ч), NaCl (5 мМ) и дефицит воды на среде (ПЭГ, 1%) на семена исследуемых генотипов

В работе были использованы семена *A. thaliana* дикого типа и мутантного генотипа *cml39* с мутацией в гене кальциевого сенсора CML39. Известно, что CML39 служит важным датчиком Ca^{2+} во время развития семязачатков и семян, а также во время прорастания и укоренения проростков [4]. Семена высаживали на квадратные чашки Петри с затемнением корней. Проростки выращивали в фитотроне в режиме длинного дня (16 ч/8 ч) при температуре +21 °С днем и +20 °С ночью, влажность поддерживалась на уровне 55 %, плотность фотосинтетического фотонного потока составляла 80 мкмоль·с⁻¹·м⁻². Длину корней измеряли с помощью программы ImageJ. Для статистического анализа использовали программы MS Office Excel 2019, Statistica 8.0.

По данным литературы [5] белок CML39 синтезируется преимущественно в корнях проростков (зоны элонгации и дифференцировки) и в месте соединения корень-гипокотиль. На рисунке 2 и 3 представлены данные изменения длины корней проростков (Col-8, *cml39*) после воздействия изучаемых факторов относительно контроля.

Для растений дикого типа (Col-8) рост длины корней статистически значимо ингибировался относительно контроля на 7 сутки после воздействия гамма-излучения (γ) отдельно и в сочетании с солевым стрессом (γ +NaCl), а также после совместного действия температуры и осмотического стресса (Т+ПЭГ) в обеих временных точках (рисунок 2).

С высоким уровнем статистической значимости ($p < 0.0001$) были получены данные о стимуляции роста корней проростков *cml39* после различных воздействий, в т.ч. в сочетании с гамма-излучением по сравнению с контролем (Рисунок 3). Для всех таких случаев стимуляции наблюдается спад со временем (с 5-ые на 7-ые сутки). После воздействия γ -излучения и ПЭГ по отдельности наблюдается статистически значимая стимуляция на 5 сутки, которая снижается на 7-ые, а при комбинации двух этих факторов (γ +ПЭГ) стимуляция сохраняется и на 7 сутки. Самая большая стимуляция относительно контроля наблюдается при сочетании гамма-излучения и солевого стресса в обеих временных точках (γ + NaCl).

Известно, что мутанты *cml39* обладают повышенной чувствительностью к АБК-опосредованному ингибированию прорастания и к нарушению биосинтеза гибберелловой кислоты [4]. Эти данные могут объяснить стимуляцию роста длины корней после предварительного гамма-облучения семян (γ +NaCl, γ +ПЭГ) в комбинации с другим стрессором, т.к. ранее было показано что γ -облучение семян ячменя в дозах 4–50 Гр в течение 30 ч прорастания вызывало изменение метаболизма гиббереллинов и экспрессии генов, кодирующих ферменты биосинтеза и катаболизма АБК [6, 7].

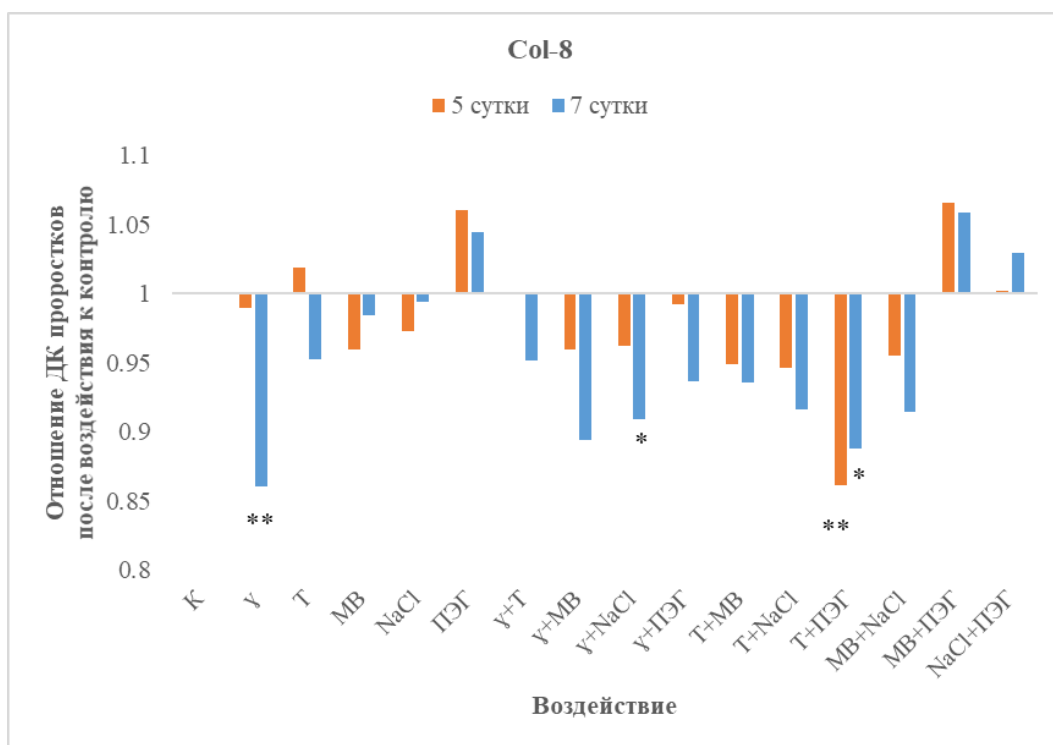


Рисунок 2. Изменение относительно контроля длины корней (ДК) проростков Col-8 после воздействия всех изучаемых факторов и их комбинаций

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ по отношению к семенам без абиотического воздействия того же генотипа (U-критерий Манна-Уитни)

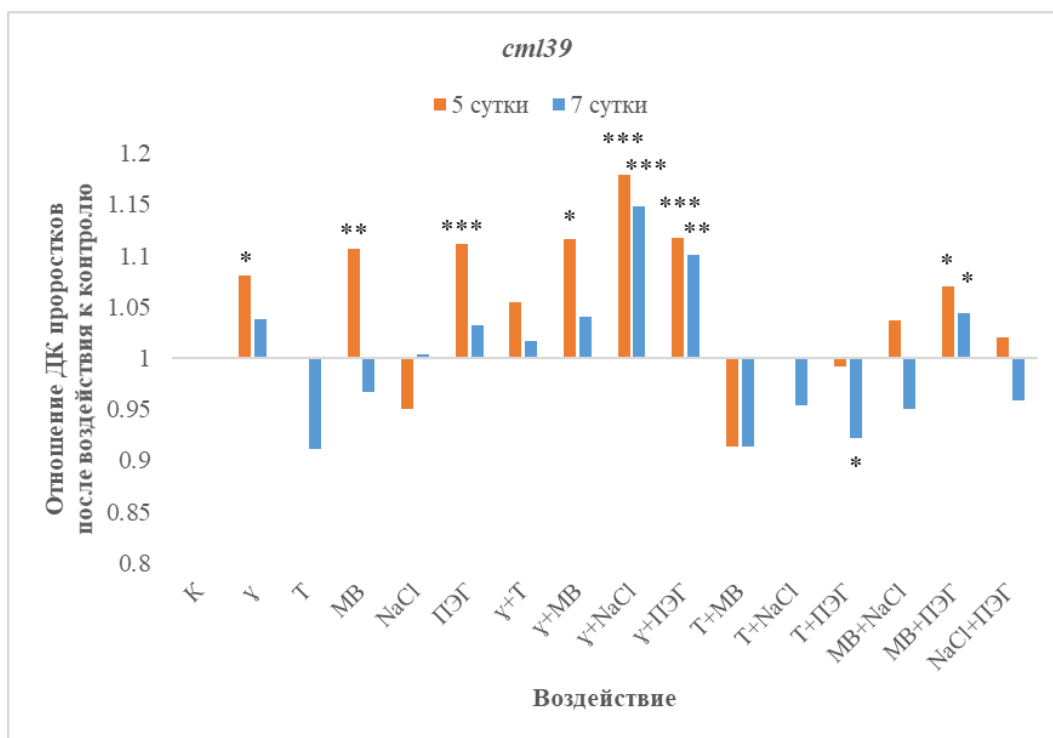


Рисунок 3. Изменение относительно контроля длины корней проростков *cml39* после воздействия всех изучаемых факторов и их комбинаций

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.0001$ по отношению к семенам без абиотического воздействия того же генотипа (тест Манна-Уитни)

Данная работа выполнена в рамках государственного задания № FGNE-2022-0004 «Исследование молекулярных и биохимических механизмов ответных реакций модельных и сельскохозяйственных растений на действие ионизирующих излучений и абиотических стрессовых факторов»

Список литературы

1. Verslues P., Agarwal M., Katiyar-Aragwal S. et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status // The Plant journal: for cell and molecular biology. 2006. Vol. 45(4). P. 523-539. doi:10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x
2. van der Weele C.M., Spollen W.G., Sharp R.E., Baskin T.I. Growth of *Arabidopsis thaliana* seedlings under water deficit studied by control of water potential in nutrient-agar media // Journal of experimental botany. 2000. Vol. 51(350). P. 1555-1562. doi:10.1093/jexbot/51.350.1555
3. Kim M., McLoughlin F., Basha E., Vierling E. Assessing Plant Tolerance to Acute Heat Stress. // Bio-

protocol. 2017. Vol. 7(14): e2405. doi.org:10.21769/BioProtoc.2405

4. Midhat U., Ting M.K.Y., Teresinski, H.J. et al. The calmodulin-like protein, CML39, is involved in regulating seed development, germination, and fruit development in *Arabidopsis*. *Plant Mol Biol* 96, 375-392 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11103-018-0703-3>

5. Vanderbeld B., Snedden W.A. Developmental and stimulus-induced expression patterns of *Arabidopsis* calmodulin-like genes CML37, CML38 and CML39. *Plant Mol Biol* 64, 683-697 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11103-007-9189-0>

6. Bitarishvili S.V., Bondarenko V.S., Geras'kin S.A. Expression of gibberellin biosynthesis and catabolism genes in the embryos of g-irradiated barley seeds. *Biol Bull Russ Acad Sci* 2020, 47:1558-1563. <https://doi.org/10.1134/S1062359020110059>.

7. Bitarishvili S.V., Bondarenko V.S., Geras'kin S.A. Influence of γ -irradiation on the expression of encoding ABA metabolism enzymes in barley embryos. *Ecol Genet* 2018, 16:85-89. <https://doi.org/10.17816/ecogen16485-89>.

STUDY OF MORPHOMETRIC PARAMETERS OF CML39 ARABIDOPSIS THALIANA PLANTS IN RESPONSE TO THE TWO-FACTOR COMBINATION OF ABIOTIC STRESSORS

Podobed M.Yu.¹, Babina D.D.¹, Blinova Ya.A.¹, Morozova N.S.², Krylova P.S.³, Bondarenko E.V.¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

²Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, Russian Federation

³Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

As part of the study of the molecular biological bases of plant resistance to stress factors of various nature, including radiation, a series of experiments was carried out using the *cml39* line of the model plant *Arabidopsis thaliana*. This line is a loss-of-function mutant. The CML39 gene encodes a calmodulin-like protein, the Ca²⁺ sensor. At the study's first stage, the response of plants to the impact of five abiotic stressors individually and their combination was assessed by estimation of morphometric parameters, the most informative of which was the root length. In contrast to wild-type plants (Col-8, used as a reference), a statistically significant stimulation of root growth of *cml39* seedlings was noted after various treatments, including in combination with gamma-radiation, compared with the untreated plants.

Keywords: *calcium signaling, Arabidopsis thaliana, gamma irradiation, abiotic stress, combination of stressors*

УДК 504.062.4

ОСОБЕННОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО РЕАБИЛИТАЦИИ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЙОНЕ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

Попов Е.В., Кирдин В.Ф., Штырхунов В.Д., Конончук В.В., Тимошенко С.М.

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»

143026, Московская обл., Одинцовский район, пос. Новоивановское, ул.Агрохимиков, д.6, Российская Федерация

e-mail: pev0063@mail.ru

Рассматривается вопрос реабилитации почв при воздействии неблагоприятных радиоэкологических факторов техногенного характера. Кратко приведены радиоэкологические факторы, возникшие на части территорий Центрального Нечерноземья в результате техногенного загрязнения. Приводятся некоторые эффективные способы по минимизации результатов воздействия подобных негативных факторов, улучшения плодородия почв и их реабилитации. Более подробно описана технология, выполняемая ярусными плугами, которая ранее использовалась для глубокой послойной запашки органических удобрений и мелиорантов на низкоплодородных почвах. Данная технология основывается на одноразовой глубокой заделке верхней части пахотного слоя за ротацию севооборота и более мелких обработок в последующие годы.

Ключевые слова: *плодородие почв, радиоактивное загрязнение почв, удобрения и мелиоранты, гумусообразование, ярусный плуг, точная технология*

Целый ряд проблем в области сельского хозяйства и экологии, существующих в современных условиях, обусловлен результатами различных нарушений почвенного плодородия, связанных с воздействием негативных факторов техногенного характера. Особенно актуально и остро стоят эти проблемы на территориях экономически развитых районов страны. Часть из них связано с неблагоприятными радиоэкологическими факторами, возникшими

в результате загрязнения окружающей среды. В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году загрязнению радионуклидами подверглась часть территорий в Центральном экономическом районе Нечерноземья. В момент аварии в окружающую среду было выброшено большое количество радионуклидов, прежде всего йода и цезия. На площади около 200 тыс. кв. километров на территории Европы уровень загрязнения цезием-137 превысил 37 кБк/км².

Первоначально загрязнению радионуклидами подверглись территории 14 субъектов РФ. Наиболее пострадали территории Брянской, Орловской, Калужской и Тульской областей [1]. На этих территориях возникло множество проблем, в том числе экономического, экологического и, радиэкологического характера [2, 3]. Обстановка за прошедшие годы на пострадавших территориях стабилизировалась, уровни излучений в окружающей среде снизились в несколько сотен раз [4], но спустя 35 лет на некоторых территориях в Центральном экономическом районе Нечерноземной зоны продолжает сказываться влияние негативных радиэкологических факторов [5]. Этот район всегда имел значительные площади для возделывания сельскохозяйственных культур и является важным для сельского хозяйства страны в целом [6].

Для реабилитации почв, подвергшихся воздействию подобных неблагоприятных факторов и полноценного их использования в процессе производства продукции сельского хозяйства необходимы специальные мероприятия, направленные на минимизацию и устранение последствий этих нарушений [7, 8]. А также для ускорения реабилитации этих территорий целесообразно развитие на них сельскохозяйственного производства в целом.

В настоящее время увеличение производства зерна является актуальной задачей сельскохозяйственного производства, в том числе при развитии агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны [6]. В силу сложившихся социально-экономических условий требуется производство продовольственного зерна с высокими хлебопекарными и технологическими качествами для мукомольной, кондитерской, крупяной, пивоваренной промышленности [9], а также высокопитательного фуражного зерна, сбалансированного по содержанию энергии и протеина, незаменимых аминокислот.

Для развития сельского хозяйства и дальнейшего подъема производства зерна высокого качества на ряде территорий Центрального экономического района Нечерноземья необходимы меры, обеспечивающие восстановление и разработку систем земледелия во всех хозяйствах, занимающихся производством сельскохозяйственной продукции, независимо от формы собственности, что позволит вернуться к обоснованной структуре посевных площадей, севооборотам и обеспечению технологической дисциплины [6]. Это мероприятие является малозатратным, однако требует соответствующего государственного организационного начала, пропаганды и рекламы. Оно является основой для осуществления всех других мер по повышению производства продукции сельского хозяйства и улучшению ее качества. Использование рациональных технологий по обработке и подготовке почвы с учетом неблагоприятных экологических факторов позволяет обеспечить в ближайшей перспективе частичную, а в долгосрочной перспективе полную реабилитацию

пострадавших земель сельхозназначения. При этом должен проводиться контроль качества производимой сельхозпродукции и по его результатам должны осуществляться необходимые коррективы в процесс производства на разных этапах. Одной из важных составляющих в этих условиях будут мероприятия по подготовке почвы для возделывания сельскохозяйственных культур. Так, применение азотных удобрений под озимые культуры в виде подкормки весной в дозе 30 кг/га д.в. повышает качество клейковины в зависимости от сорта на 3–10 %, внесение с учетом подкормки 60–90 кг/га д.в. позволяет получать зерно сильных сортов пшеницы в условиях Центрального экономического района Нечерноземной зоны. Аналогичные воздействия на качество зерна происходят при применении соответствующих доз фосфорных и калийных удобрений, одновременно обеспечивающих повышение плодородия земель [10]. Среди фосфорных удобрений значительная часть отводится к однокомпонентным формам, таким, как простой и двойной гранулированный суперфосфаты. Большая часть фосфорных удобрений будет принадлежать сложным твердым формам, таким как аммофос, диаммофос и их производные. Среди ассортимента калийных удобрений универсальной формой является хлористый калий. По значимости за ним следуют сложные так называемые комплексные удобрения – нитрофоски, азофоски и др. Предусмотрено также применение бесхлорных их форм для возделывания культур, чувствительных к хлору.

Одним из приемов увеличения производства зерна является насыщение севооборотов зерновыми культурами. В связи с внутрихозяйственной специализацией производства, когда вблизи хозяйственных центров и животноводческих ферм организуются севообороты с картофелем, корнеплодами и другими кормовыми культурами, на удаленных землях целесообразно иметь севообороты, насыщенные зерновыми. Обобщение результатов исследований показывает, что расширение площадей посевов зерновых в специализированных севооборотах должно производиться, прежде всего, за счет озимой пшеницы и ячменя [11]. Кроме того, необходимо включение в структуру севооборота зернобобовых культур, так как они являются отличными предшественниками для колосовых зерновых культур. При этом долю зерновых в специализированных севооборотах можно доводить до 70–75 %. При более высоком насыщении зерновыми увеличиваются сборы зерна, но снижается урожайность и уменьшается условно чистый выход кормовых единиц и переваримого протеина.

Многолетние исследования ФИЦ «Немчиновка» по разработке оптимальных систем обработки почвы показывают, что на дерново-подзолистых окультуренных почвах в распространенных для зоны плодосменных севооборотах наиболее отзывчивы на отвальную обработку почвы яровая ячмень, яровая пшеница, горох, гречиха. Поверхностная безотвальная обработка почвы предпочтительна под озимую рожь, овес, однолетние травы. Энергетическая и

экологическая оценка систем обработки почвы в севооборотах показывает, что, несмотря на более высокую продуктивность при комбинированной обработке с чередованием глубоких и мелких обработок, коэффициент энергетической эффективности на вариантах с применением только поверхностной обработки все-таки несколько выше из-за снижения затрат на обработку и такая обработка способствует большему накоплению гумуса в почве. Поэтому предпочтение в севооборотах должно отдаваться комбинированным обработкам, которые обеспечивают достаточно высокую продуктивность, характеризуются высокой энергетической эффективностью, а также обеспечивают воспроизводство органического вещества почвы на достаточно высоком уровне [12, 13].

К предлагаемым путям по минимизации возникших негативных воздействий на пострадавших территориях в первую очередь можно отнести:

1. Специальные способы обработки почвы на территориях, пострадавших от рассмотренных негативных техногенных воздействий.

2. Внесение на загрязненных территориях в почву калийных удобрений и их известкование.

3. Улучшение плодородия почв на пострадавших территориях в целях повышения рентабельности и привлекательности этих территорий для развития сельскохозяйственного производства.

Применяемые методы исследований ориентированы на проведение научных изысканий в области реализации этих путей по реабилитации сельхозугодий на пострадавших территориях. И в ходе проведения научных работ в первую очередь использовались методы системного анализа и полевых экспериментальных исследований.

Использование полевых методов экспериментальных исследований показали высокую эффективность комбинированно-ярусной обработки почвы в севооборотах с глубокой послойной заделкой верхнего слоя, основанной на чередовании ярусной вспашки с заделкой органических и минеральных удобрений двухъярусными или оборотными плугами и последующих более мелких обработок с припахиванием к нижнему слою измельченной соломы и сидератов [14]. Это позволяет формировать мощный корнеобитаемый слой и существенно повышает продуктивность культур севооборотов, обеспечивая ускоренное воспроизводство плодородия почв. Запашка удобрений осуществляется двухъярусными или оборотными плугами после предварительного перемешивания верхнего слоя почвы дисковыми орудиями [15]. В последующие годы проводят поверхностную обработку, глубокое рыхление или мелкую вспашку в зависимости от природно-климатических условий и требований возделываемых культур. Созданный ярусной вспашкой фон благоприятен для применения в последующем минимальной обработки с помощью дисковых орудий и противоэрозийных машин. Такая система обработки почвы эффективна в филиале ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка» Тульский НИИСХ, имеющем посевные площади на

пострадавшей в результате радиоактивного загрязнения территории Тульской области.

Часть территорий в Центральном экономическом районе Нечерноземья первоначально значительно пострадала в результате радиационной аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году, но за прошедшие после этой аварии годы существенно сократилась плотность загрязнения земли цезием [2, 4]. Реабилитация земель связана не только с естественным распадом радиоактивных элементов, но и со специфической обработкой почв. К культурно-техническим работам, которые необходимо периодически проводить, относятся глубокая вспашка, внесение калийных удобрений, известкование. В результате этого в два – два с половиной раза снижается поступление в растение загрязняющих почву веществ – радионуклидов. За счет технологии обогащения земли микроэлементами, необходимыми для питания растений, обеспечивается повышение уровня безопасности продукции земледелия на пострадавших и бывших непригодных к использованию для нужд сельского хозяйства территориях. При недостатке калия в загрязненной почве растения взамен этого элемента начинают потреблять цезий. Сельхозпродукцию, произведенную из таких растений и в том числе, из зерна этих растений, в пищу употреблять нельзя. По этой причине необходимо проводить восстановление загрязненных сельскохозяйственных земель. На более плотно загрязненных участках целесообразно проводить известкование кислых пахотных почв, внесение повышенных доз калийных удобрений, а также фосфоритование – для снижения подвижности цезия и стронция. На участках с небольшим загрязнением можно ограничиться выполнением зональных мероприятий, внесением удобрений с повышенным содержанием калия и ведением севооборота. Это обусловлено тем, что разные сельскохозяйственные культуры накапливают разное количество цезия-137. Например, в большей степени этого радионуклида накапливают люпин, горох и все бобовые, клевер, люцерна, либо злаковые, зерновые.

При проведении реабилитации сельскохозяйственных угодий, где уровень загрязнения почвы более 5 Ки/кв.км, необходимо учитывать количественные показатели содержания в почве калия и кальция, которые являются антагонистами цезия-137 и стронция-90, поэтому для реабилитации почв в рассматриваемых условиях, необходимо вносить повышенные дозы калийных удобрений и проводить усиленное известкование.

Для использования специфических способов обработки земель в целях захоронения загрязненного радиоактивными веществами верхнего слоя почв в Брянской области широко применялась предложенная профессором Сдобниковым С.С. технология глубокой послойной заделки верхней части пахотного слоя в подпахотный слой. Такая технология осуществлялась с помощью ярусных плугов [16]. Для этого на Производственном объединении "Алтайсельмаш" в Алтайском крае были созданы

специальные двухъярусные плуги. Эти плуги были поставлены на Новозыбковское ПМК Брянской области и использовались на загрязненных территориях. При помощи этих плугов верхний слой почвы заделывался на глубину 35–40 см, в результате чего степень загрязненности верхнего слоя почвы и поверхности почвы существенно снижалась.

Конструкция ярусных плугов включает раму с опорными колёсами и установленной на ней парой плужных корпусов верхнего и нижнего ярусов с полувинтовой формой отвалов. Корпус верхнего яруса смещен в поперечном направлении относительно корпуса нижнего яруса и установлен на раме с возможностью регулировки глубины пахоты. Величина смещения полевых обрезов корпусов – 100 мм. В отличие от применяемых обычных плугов отвал корпуса верхнего яруса выполнен винтовым, а отвал корпуса нижнего яруса – полувинтовым. Кроме того, ширина захвата корпуса верхнего яруса составляет 75% от ширины захвата корпуса нижнего яруса.

Плуг работает следующим образом. До прохода плуга по поверхности почвы в зависимости от потребности распределяют калийные удобрения, сидераты или известь и перемешивают с верхним слоем почвы. В процессе работы плуга корпуса верхнего яруса подрезают верхний пласт почвы на установленной глубине, например 12–15 см, вместе с расположенными в его верхнем слое растительными остатками или внесенными удобрениями, оборачивают и укладывают его на дно открытой при предыдущем проходе корпуса плуга борозды. Винтовая форма отвала корпуса обеспечивает оборот пласта без крошения, что способствует переносу верхнего слоя с прослойкой минеральных и органических удобрений на дно борозды. Далее корпуса нижнего яруса подрезают пласт почвы на глубину вспашки, который при сходе с отвала, выполненного полувинтовым отвалом, полностью оборачивается, крошится и укладывается на бывший верхний, уложенный на дно борозды пласт. В результате обеспечивается качественная вспашка всего пласта и полная глубокая заделка верхнего слоя почвы. В связи с производством современных плугов для выполнения ярусной вспашки вполне подходят оборотные плуги с полувинтовыми отвалами.

На проблемных территориях для выполнения специализированной комбинированно-ярусной обработки почв была предложена технология, основанная на одноразовой глубокой вспашке за ротацию севооборота с заделкой органических удобрений и мелиорантов, а затем более мелких обработок почвы в последующие годы. Это создает такую модель профиля пахотного слоя, когда верхняя органическая прослойка перемещается в нижнюю часть, и она периодически пополняется свежей органикой в виде сидератов и мелиорантов. Теоретической основой отмеченной разработки является установленная закономерность дифференциации пахотного слоя по плодородию и выявленное в опытах преимущество, которое представляет собой гетерогенное строение с

наличием плодородной прослойки в нижнем слое пашни. При этом в зависимости от размещения более плодородной прослойки в пределах пахотного слоя в период вегетации корневая система растений за счет хемотропизма более интенсивно развивается в слое, располагающем питательными веществами.

Если при ежегодной глубокой вспашке за счет оборачивания и перемешивания почвы показатели плодородия верхней и нижней частей пахотного слоя выравниваются, то при прекращении оборачивания почвы плодородие верхнего слоя увеличивается, а нижнего – уменьшается. Поэтому в течение ротации севооборота, применяя различную по глубине и способу обработку почвы и заделку органических удобрений, можно формировать разное строение пахотного слоя по плодородию: гомогенное (выровненное по плодородию), гетерогенное (с преимуществом верхнего слоя), а при периодическом оборачивании пахотного слоя после ряда лет поверхностной или плоскорезной обработки – обратно-гетерогенное (с преимуществом нижнего слоя).

Исследования позволили сформулировать положение о необходимости формирования обратногетерогенного строения пахотного слоя почвы с преимущественным расположением плодородной прослойки в нижней части пахотного слоя и в подпахотном слое почвы. На черноземах указанное положение в определенной степени может быть реализовано за счет использования естественного процесса дифференциации плодородия почвы, когда накопленные в верхнем слое почвы после ряда лет воздействия атмосферных явлений подвижные формы питательных веществ заделываются вниз периодическим полным оборотом пласта. Здесь применимы следующие принципы: природа улучшает плодородие в верхнем слое, а земледelec периодически преобразует структуру почвы, создавая благоприятное для растений обратно-гетерогенное строение.

Для малогумусных нечерноземных почв, у которых природные ресурсы плодородия нуждаются в постоянном пополнении, обратногетерогенное строение пахотного слоя почвы создают периодической заделкой в нижнюю часть этого слоя улучшающей его плодородие прослойки, обогащенной органическим веществом в виде перемешанного с верхним слоем почвы компоста, сидерата или пласта многолетних трав [17].

Запашка различных видов органики вниз и их последующая трансформация при недостатке кислорода обеспечивают более эффективное использование продуктов минерализации без их потерь, повышая отдачу от удобрений более чем в 2 раза. На этой основе разработаны и освоены агротехнические приемы формирования обратно-гетерогенного строения пахотного слоя при помощи периодической заделки органических удобрений и мелиорантов, предварительно перемешанных с верхним слоем почвы, в нижнюю часть пахотного слоя с использованием современных оборотных и двухъярусных плугов.

В целях улучшения плодородия почв на рассматриваемых территориях в целях повышения рентабельности и привлекательности этих территорий для развития сельскохозяйственного производства рекомендованная система обработки почвы включает чередование периодической глубокой вспашки с оборотом пласта с поверхностной или безотвальной обработкой почвы. Эта система состоит из базисной и надстроечной частей. В соответствии с базисной частью системы в начале ротации севооборота проводят глубокую ярусную вспашку с заделкой внесенных органических удобрений, таких как компоста и мелиорантов, в количестве, необходимом для создания бездефицитного баланса гумуса в почве. В основное удобрение добавляют 3–4 т/га извести, цеолиты и другие углеродосодержащие органические вещества. Глубина вспашки для заделки удобрений определяется глубиной пахотного слоя с припашкой 2–3 см подпахотного горизонта. На черноземах и серых лесных почвах глубину вспашки доводят до 35–40 см, на дерново-подзолистых – до 30–35 см. Под все последующие культуры севооборота применяют отвальную мелкую или безотвальную обработку на глубину до нижней органической прослойки. В соответствии с надстроечной частью системы припахивание свежих органических удобрений осуществляют на глубину на 6–8 см меньшую, чем при основной заделке компоста, обеспечивая контакт двух органических прослоек и дополнительную активизацию микробиологических процессов в зоне концентрации удобрений, что увеличивает продолжительность последствий удобрений и мелиорантов, а также усиливает выявленные преимущества обратного строения пахотного слоя. Преимущество новой технологии, основанной на приведенной системе и получившей название комбинированно-ярусной, подтверждено результатами производственных испытаний, которые были проведены в период 2014–2020 гг. в условиях Республики Татарстан в восьмипольном зерновом севообороте [18]. Если перед закладкой опыта содержание гумуса в почве (по Тюрину И.В.) в слое 0 – 20 см составило 6,5%, а в слое 20–40 см – 6,2 %, то в конце ротации севооборота по ежегодной глубокой вспашке соответственно 6,6 % и 6,4 %, по мелкой обработке 6,6% и 6,3%, а по комбинированно-ярусной обработке 6,6% и 6,8%.

В изложенном материале описаны вопросы реабилитации почв при воздействии отдельных неблагоприятных факторов техногенного характера. Более подробно раскрыты способы улучшения качества и увеличения плодородия почв в Центральном экономическом районе Нечерноземной зоны России, в том числе с учетом неблагоприятного радиологического фактора. Показаны элементы технологии – комбинированно-ярусной системы обработки почвы и применение удобрений в севообороте, способствующих воспроизводству плодородия почв, подвергшихся техногенным нарушениям.

Список литературы

1. Воронов С.И., Седнев В.А., Смулов А.В. Оценка последствий аварии на Чернобыльской АЭС и основные направления обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности территорий. В сборнике: Эколого-ориентированное управление рисками и обеспечение // Государственный университет управления. 2017. С.52–60.
2. Воронов С.И., Седнев В.А. Авария на Чернобыльской АЭС. Последствия и выводы // Научные образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 1 (28). С. 11–18.
3. Воронов С.И. Экологические проблемы радиационного и химического загрязнения окружающей среды и безопасность населения в крупных промышленных регионах (на примере Московской области) / Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Москва, 1999. 286 с.
4. Воронов С.И., Седнев В.А. Основные направления и задачи в области преодоления последствий радиоактивного загрязнения территорий в результате аварии на Чернобыльской атомной станции // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. №1. С.30–36.
5. Попов Е.В. Радиационный мониторинг и комплексное применение стационарных и мобильных средств контроля радиационной обстановки на радиоактивно загрязненных территориях в результате аварии на Чернобыльской АЭС // В сборнике: Радиологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск, 2021. С. 211–214.
6. Иванов А.Л., Петриков А.В., Кирюшин В.И. и др. Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года. Версия 2.0. Москва. 2021. 400 с.
7. Седнев В.А., Воронов С.И., Лысенко И.А. и др. Организация защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: Учебник. Москва, 2018. (4-е изд., перераб. и доп.). 188 с.
8. Симонов А.В., Скоробогатов А.М., Попов Е.В. и др. Оценка условий хозяйственного использования и восстановления социально-экономического значения участков, ранее выведенных из хозяйственного оборота по радиационному признаку. Разработка предложений по организации управления отселенными территориями Брянской области. Отчет о НИР № 74 от 20.09.2016 / (Центральный региональный центр МЧС России), 2016, 137 с.
9. Воронов С.И., Медведев А.М., Нардид А.В. и др. О проблемах и результатах селекционного улучшения озимой тритикале в условиях Центрального Нечерноземья // В сборнике: Тритикале. Материалы заседания секции тритикале ОСХН РАН онлайн / Ростов-на-Дону, 2021. С.88–96.

10. Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Тимошенко С.М. Урожайность и водопотребление озимой пшеницы в зависимости от агротехнических факторов и условий увлажнения в Центральном Нечерноземье // Сборник трудов ФИЦ «Немчиновка». М.: Литература, 2019. С.198–208.

11. Воронов С.И., Плескачев Ю.Н., Ильященко П.В. Основы производства высококачественного зерна озимой пшеницы // Плодородие, 2020, № 2 (113). С.64–66.

12. Штырхунов В.Д. Влияние доз периодичности и способов заделки органических удобрений на плодородие дерново-подзолистых почв и продуктивность севооборотов // Автореферат дисс. На соискание ученой степени канд. с.-х. н., Немчиновка, 1991. 18 с.

13. Конончук В.В., Штырхунов В.Д., Благовещенский Г.В., Тимошенко С.М., Назарова Т.О., Соболев С.В. Урожайность, азотофиксирующая способность многолетних трав различного видового состава и

поступление симбиотически связанного азота в малый биологический круговорот в Центральном Нечерноземье // Агрехимия. 2019. № 1. С. 48–57.

14. Кирдин В.Ф. Теория и практика обработки почвы в Центральных районах России. М.: 1996. 116 с.

15. Кирдин В.Ф. Воспроизводство плодородия почвы – основа повышения продуктивности растениеводства / Аграрная Россия, 2008, №6. С. 17–18.

16. Сдобников С.С. Пахать или не пахать?: (Новое в обраб. и удобрении полей). М.: Б. и., 1994. 288 с.

17. Кирдин В.Ф., Гармаш Г.А., Штырхунов В.Д., Гармаш Н.Ю., Каланчина А.С. Исследования почвенного плодородия для разработки технологий возделывания сельскохозяйственных культур // Аграрная Россия. 2020. №10. С.9–14.

18. Кирдин В.Ф., Ахмедгараев Х.Х., Совершенствование интенсивной технологии // Аграрная Россия. №9. 2021. С. 21–23.

FEATURES OF SOIL REHABILITATION MEASURES UNDER THE INFLUENCE OF ADVERSE RADIOECOLOGICAL FACTORS IN THE CENTRAL ECONOMIC REGION OF THE NON-CHERNOZEM REGION

Popov E.V., Kirdin V. F., Shtyrkhunov V.D., Kononchuk V.V., Timoshenko S.M.

Federal Research Center "Nemchinovka", Moscow region, Russian Federation

The issue of soil rehabilitation under the influence of unfavorable radioecological factors of technogenic nature is considered. The radioecological factors that have arisen in part of the territories of the Central Non-Chernozem region as a result of man-made pollution are briefly presented. Some effective ways to minimize the effects of such negative factors, improve soil fertility and their rehabilitation are given. The technology performed by longline plows, which was previously used for deep layer-by-layer plowing of organic fertilizers and meliorants on low-fertile soils, is described in more detail. This technology is based on a one-time deep sealing of the upper part of the arable layer for rotation of crop rotation and smaller treatments in subsequent years.

Keywords: soil fertility, radioactive contamination of soils, fertilizers and meliorants, humus formation, longline plow, precise technology

УДК: 577.152.1: 614.876: 535.243: 633.877.3

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ ГЛУТАТИОНПЕРОКСИДАЗЫ КАТАЛАЗЫ В ПОПУЛЯЦИЯХ *Pinus sylvestris* L., ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ЗОНЕ ЧАЭС

Празян А.А., Шестерикова Е.М., Макаренко Е.С., Гераськин С.А.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: prazyana@yahoo.com

Проведена первичная оценка активности фермента глутатионпероксидазы в хвое деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., подвергающейся хроническому радиационному воздействию в 30-км зоне аварии на Чернобыльской атомной электростанции.

Ключевые слова: хроническое облучение, активность, глутатионпероксидаза, сосна обыкновенная

Авария на ЧАЭС привела к обширному радиоактивному загрязнению территорий, с природными экосистемами [3]. Последствия действия радиации на растения хорошо изучены, в отличие от хронического влияния облучения низкими уровнями радиационного воздействия. Изучение такого влияния поможет понять механизмы адаптации растений, которые не изучены в полной мере.

Популяции сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающие на территории Чернобыльской зоны отчуждения, представляют собой уникальный объект для изучения адаптивных реакций, происходящих на различных уровнях биологической организации, в ответ на хроническое радиационное воздействие. В данной работе были получены результаты первичной оценки активности глутатионпероксидазы, позволяющие дополнить имеющиеся знания об ответной реакции антиоксидантной системы *P. sylvestris* на хроническое облучение. Известно, что в условиях хронического радиационного воздействия популяции растений могут испытывать оксидативный стресс, что приводит к ускоренной генерации активных форм кислорода (АФК) [4]. АФК утилизируются внутриклеточной антиоксидантной системой с помощью ферментативных и неферментативных антиоксидантов [2]. Ферментативные антиоксиданты отличаются высокой специфичностью действия, которая направлена против определенных форм АФК. Одним из таких антиоксидантов является глутатионовая пероксидаза (GPX, КФ 1.11.1.9).

Глутатионовые пероксидазы относятся к негемовым тиоловым пероксидазам и также катализируют восстановление пероксида водорода и органических гидропероксидов до воды. В растениях они локализованы в митохондриях, хлоропластах и цитозоле [5].

GPX использует для восстановления пероксида водорода глутатион, вступая в реакцию, обратную реакции с глутатионредуктазой.

Материалы и методы

Отбор проб проводили в Гомельской области Республики Беларусь на территории Полесского радиационно-экологического заповедника на участках с разным уровнем радиоактивного загрязнения. Опираясь на данные радионуклидного загрязнения территорий, были выбраны контрольные участки (К-1 и К-2) и три загрязненных участка в разной степени (Таблица 1). На каждом участке была измерена мощность амбиентной дозы с помощью дозиметра-радиометра МКС-02СА1 (Россия).

Таблица 1

Характеристики экспериментальных участков в Чернобыльской зоне отчуждения

Участок	МАД(γ), мкЗв/ч
Контрольный участок - 1	0.11
Контрольный участок - 2	0.10
Гнездинка (Г)	0,26
Масаны (М)	2,67
Кулажин (К)	9,85

Для отбора проб выбирали деревья сосновых насаждений II класса. Образец состоял из хвои одного дерева, собранной с четырех основных направлений кроны деревьев. На каждом участке осуществляли 11 повторностей, хвою помещали в криобирки и немедленно замораживали в жидком азоте до анализа.

Для анализа активности глутатионпероксидазы из каждого образца отбирали навеску равную 0,2 г. и гомогенизировали в жидком азоте с добавлением поливинилпирролидона (PVP) [6]. Осадок ресуспендировали в холодном 0,1 М TRIS-буфере. Затем гомогенаты центрифугировали в течение 20 минут при скорости 14500 об/мин на центрифуге с охлаждением (Eppendorf, Germany) и из полученного супернатанта готовили образцы для измерений. Измерение проводили на спектрофотометре NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific). Анализ проводили по Бисвангеру с модификациями при длине волны 340 нм [1]. Показания спектрофотометра переводили в международные единицы ферментативной активности (МЕ) (МЕ в мкл реакционной смеси для GPX) используя формулу из [1]. Активность глутатион пероксидазы оценивали по динамике прохождения реакции до нагрева и после. Анализ результатов выполнен в MS Office Excel 2010. Значимость различий оценивали с помощью U-критерия Манна-Уитни в Statistica 8.0.

Результаты

Результаты первичной оценки активности фермента глутатион пероксидазы в популяциях *P. sylvestris* приведены на Рисунке 1. Из полученных результатов видно, что в исследуемых популяциях сосны статистической значимой активности фермента, в сравнении с контролем, не наблюдается.

Ввиду особенностей действия глутатионпероксидазы, можно сделать вывод, что у рассмотренных нами популяций сосны обыкновенной отсутствует статистически значимое изменение активности упомянутого фермента.

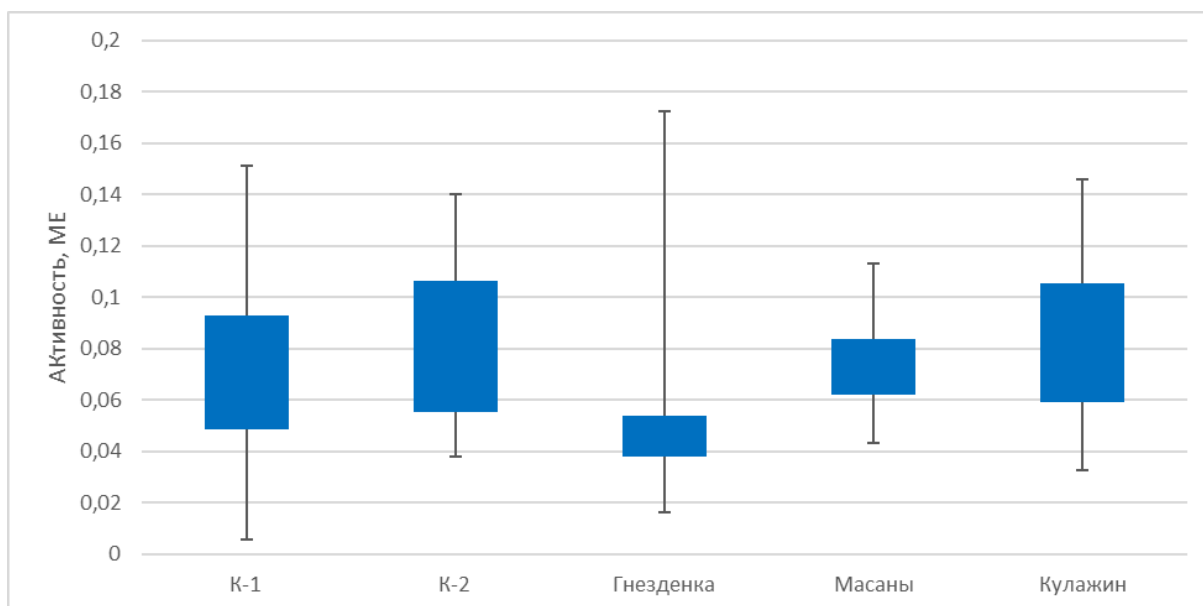


Рисунок 1. Активность фермента каталазы в популяциях *P. Sylvestris*, произрастающих в 30-км зоне аварии на ЧАЭС

Причиной такого феномена может служить сам характер радиоактивного загрязнения. Ввиду того, что данные территории несут в себе характер хронического облучения, такого стресса оказывается недостаточно для изменения ответа системы глутатион пероксидазы в сравнении с контролем. Наши данные вносят вклад в оценку состояния антиоксидантной системы хронически облучаемых популяций и требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-16-00004.

Список литературы

1. Биссвангер Х. Практическая энзимология / Х. Биссвангер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 328 с.
2. Прадедова Е.В., Ишеева О.Д., Салаяев Р.К. Классификация системы антиоксидантной защиты как

основа рациональной организации экспериментального стресса у растений // Физиология растений. 2011. Т. 58. № 2. С. 177–185.

3. Российский национальный доклад. 25 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России (1986–2011) / Под общей редакцией С.К. Шойгу, Л.А. Большова. Москва, 2011. 160 с.

4. Цыб А.Ф. Будагов Р.С., Замулаева И.А. Радиация и патология / под общ. ред. А.Ф. Цыба. М.: Высш. шк., 2005. 341 с.

5. Margis R. et al. Glutathione peroxidase family – an evolutionary overview / R. Margis, C. Dunand, F.K. Teixeira // The FEBS Journal. 2008. V. 275. Is. 15. P. 3959–3970.

6. Walker J.R.L. Enzyme isolation from plants and the phenolic problem –What's New Plant Physiol. 1980. 11:33-36

EVALUATION OF THE GLUTATHIONE PEROXIDASE IN POPULATIONS OF *Pinus sylvestris* L. GROWING IN THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

Prazyan A.A., Shesterikova E.M., Makarenko E.S., Geras'kin S.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

An initial assessment of the activity of glutathione peroxidase (GPx) in pine (*Pinus sylvestris* L.) subjected to chronic ionizing radiation in 30 kilometers zone near Chernobyl atomic station.

Keywords: chronic radiation, glutathione peroxidase, enzyme activity

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА ГУМИТОН НА ПРОДУКТИВНОСТЬ КАРТОФЕЛЯ И ПЕРЕХОД ^{137}Cs В УРОЖАЙ В БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Ратников А.Н., Санжарова Н.И., Свириденко Д.Г., Суслов А.А., Иванкин Н.Г., Петров К.В.,
Баланова О.Ю.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: sedelnikov167@gmail.com

В полевых исследованиях на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых почвах Новозыбковского района Брянской области показано, что применение комплексных удобрений ФосАгро НРК и Боркалимагнезия способствовало повышению урожайности картофеля на 22–54 %. Обработка посадок органо-минеральным комплексом на основе торфа Гумитон привела к повышению урожая клубней на 12–33% и снижению перехода ^{137}Cs в продукцию до 6,4 раза.

Ключевые слова: почва, картофель, Гумитон, урожайность, ^{137}Cs , переход

Получение высококачественной сельскохозяйственной продукции, в частности картофеля, с высокой (до 50 т/га) урожайностью, в том числе на загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС почвах, является приоритетной задачей для достижения РФ продовольственной безопасности. Этого можно добиться путем внедрения новых видов удобрений и комплексов, содержащих гуматы [1].

Органо-минеральный комплекс на основе торфа Гумитон разработан учеными ФГБНУ ВНИИРАЭ. Получены: патент на изобретение № 2709737 от 19.12.2019 г.; Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) №718667 от 05.07.2019 г.

Главное отличие комплекса от аналогов (Гуминовое удобрение ЭДАГУМ[®]СМ, жидкой препарат Гумистим, комплексные гуминовые удобрения Теллура – М и Феникс, жидкое органо-минеральное удобрение СТИМУЛАЙФ, сухое торфо-гуминовое удобрение «ФЛОРА-С» и др. гуматизированные минеральные удобрения), представленных на рынке – высокое содержание водорастворимых гуматов калия.

Гумитон содержит: N – 12 %, P₂O₅ – 23 %, K₂O – 30 %, микроэлементы (B – 0,2, Mo – 0,1, Mn – 0,1%), содержание гуматов калия – 11–14 %. 1-2-кратная обработка Гумитоном вегетирующих растений в дозе 1 л/га проводится в фазы наиболее активного роста и потребления питательных веществ [2, 3].

Цель исследования – изучение влияния новых комплексных удобрений и Гумитона на продуктивность картофеля и снижение перехода ^{137}Cs в клубни на радиоактивно загрязненных почвах Брянской области.

Материалы и методы

Исследования проводились в 2020 году на дерново-подзолистых супесчаных почвах в ООО «ФХ Пуцко» Новозыбковского района Брянской области.

Агрохимическая характеристика почв: pH_{KCl} 6,0; содержание гумуса – 1,7%; подвижного фосфора и обменного калия – 257 и 206 мг/кг почвы, соответственно. Средняя плотность загрязнения почв ^{137}Cs – 231,4 кБк/м². Обработку посадок картофеля сорт Леди Клер Гумитоном проводили до наступления фазы бутонизации.

Схема эксперимента: 1. Фон – технология хозяйства. 2. Фон + комплексное удобрение ФосАгро НРК (N – 8%, K₂O – 20%, P₂O₅ – 30%), 0,5 т/га. 3. Фон + удобрение Боркалимагнезия (MgO – 11%, CaO – 12%, K₂O – 12%, N – 4%, B – 0,25%; Si – 2%), 2 т/га.

Комплексное удобрение ФосАгро НРК (8:20:30), с высоким содержанием калия и фосфора и низким содержанием азота, хорошо подходит для основного внесения с осени. Универсальное удобрение, идеальное для многолетних трав, сахарной свёклы и картофеля, а также зерновых и зернобобовых культур.

Планирование полевых опытов, анализ данных по урожайности и статистическую обработку результатов проводили по Доспехову Б.А [4]. Содержание ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах определяли на полупроводниковом гамма-спектрометре (Canberra) с программным обеспечением Genie-2000 по количественному анализу спектров. Математическую обработку результатов исследований выполняли с использованием пакета прикладных программ в составе Microsoft Excel 2007 с 95%-ным уровнем значимости результатов.

Результаты и их обсуждение

В проведенных ранее исследованиях по применению Гумитона в различных районах Калужской области показана его высокая эффективность в зональных технологиях выращивания картофеля. Повышение урожая клубней составило 12–36 %, что эквивалентно дополнительному получению 5,7 т/га – на

пойменной почве, 2,5–9,8 т/га – на дерново-подзолистой и 3,7–10,0 т/га – на серой лесной в зависимости от сорта. За счет применения Гумитона повышалось качество клубней: содержание крахмала на серых лесных почвах увеличилось до 1,2; на дерново-подзолистых – до 2,3 % по отношению к контролю [3]; содержание нитратов снижалось на 9–21 %.

Проведенные в Новозыбковском районе Брянской области исследования показали, что внесение в

радиоактивно загрязненную почву ФосАгро НРК повысило урожай клубней картофеля на 22, а Боркалимагнезии – на 54 % по отношению к контролю, соответственно (табл. 1).

Обработка вегетирующих растений Гумитоном способствовала росту урожайности на контроле на 33, а при использовании ФосАгро НРК и Боркалимагнезии – на 12 и 8,5 % по сравнению с вариантами без использования препарата, соответственно.

Таблица 1

Влияние Гумитона и новых комплексных удобрений на урожайность картофеля и переход ^{137}Cs в клубни в ООО «ФХ Пуцко» Новозыбковского района Брянской области, 2020 г.

Вариант	Урожай клубней, т/га	Прибавка урожая к контролю, т/га	Кп ^{137}Cs в клубни	Кратность снижения, раз
<i>Без применения Гумитона</i>				
Фон – технология хозяйства	26,0	-	0,134	-
Фон + ФосАгро НРК	31,8	5,8	0,028	4,8
Фон + Боркалимагнезия	40,0	14,0	0,075	1,8
НСП ₀₅	3,2	-	-	-
<i>С применением Гумитона</i>				
Фон – технология хозяйства	34,5	-	0,021	6,4
Фон + ФосАгро НРК	35,7	1,2	0,039	-
Фон + Боркалимагнезия	43,4	8,9	0,048	1,6
НСП ₀₅	3,6	-	-	-

Содержание ^{137}Cs в клубнях во всех вариантах опыта (4–16 Бк/кг), что существенно ниже нормативов (80 Бк/кг) [5]. Эффект по снижению перехода ^{137}Cs в клубни без применения гуминовых препаратов максимален при внесении ФосАгро НРК и составил 4,8 раза по сравнению с контролем (табл. 1). Наибольший эффект по снижению перехода ^{137}Cs в клубни картофеля при применении Гумитона получен на контроле (технология хозяйства) – 6,4 раза. При применении Боркалимагнезии кратность снижения перехода ^{137}Cs в клубни составила 1,6 раза по сравнению с вариантом без использования комплекса. Полученные данные можно объяснить эффектом “разбавления” (снижением содержания радионуклидов на единицу массы сухого вещества по мере увеличения урожая).

Заключение

На радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых почвах Брянской области применение новых комплексных удобрений ФосАгро НРК и Боркалимагнезия способствовало повышению урожайности картофеля на 22–54 % по отношению к контролю, а обработка Гумитоном посадок – на 12–33 % по сравнению с вариантами без применения препарата.

Радиологическая эффективность Гумитона проявилась в снижении перехода ^{137}Cs в клубни в 1,6–

6,4 раза по сравнению с вариантами без использования препарата.

Список литературы

1. *Ионас Е.Л.* Влияние новых форм удобрений и регуляторов роста на динамику роста, накопление биомассы растений, фотосинтетическую деятельность и урожайность картофеля // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. №1, 2018. С. 84–90.
2. *Сулов А.А. и др.* Органоминеральный комплекс Гумитон как элемент адаптивной технологии возделывании озимой пшеницы в Брянской области // Агрехимический вестник. № 4, 2020. С. 24–29. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10051.
3. *Mazurov V. N. et al.* Gumiton - New Organo-Mineral Complex to Increase the Productivity of Agricultural Cultures // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-4, November 2019. P. 3374–3381.
4. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 336 с.
5. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01, СанПиН 2.3.2.2650–10.

EFFECT OF COMPLEX GUMITON ON POTATO PRODUCTIVITY AND TRANSFER OF ^{137}Cs TO YIELD IN BRYANSK REGION

Ratnikov A.N., Sanzharova N.I., Sviridenko D.G., Suslov A.A., Ivankin N.G., Petrov K.V.,
Balanova O.Y.

Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Kaluga Region, Russian Federation

In field research on radioactively contaminated soddy-podzolic soils of Novozybkovsky district of Bryansk region, it was shown that the use of complex fertilizers PhosAgro NPK and Borkalimagnesia contributed to an increase in potato yield by 22–54 %. The treatment of plantings with organo-mineral complex based on peat Gumiton led to an increase in the yield of tubers by 12–33 % and a decrease of transfer coefficient of ^{137}Cs to products by up to 6.4 times.

Keywords: soil, potato, Gumiton, yield, ^{137}Cs , transfer

In field research on radioactively contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant soddy-podzolic soils of Novozybkovsky district of Bryansk region, it was shown that the introduction of PhosAgro NPK complex fertilizer into the soil (N – 8 %, K_2O – 20 %, P_2O_5 – 30 %), at a dose of 0.5 t/ha, increased the yield of potato tubers by 22, and Borkalimagnesia fertilizers – (MgO – 11 %, CaO – 12 %, K_2O – 12 %, N – 4 %, B – 0.25 %, Si – 2 %), at a dose of 2 t/ha - by 22–54 % relative to the control. The treatment of vegetative potato plants with an organo-mineral preparation based on peat Gumiton contributed to an increase in yield at the control by 33, and with the use of PhosAgro NPK and Borkalimagnesia - by 12 and 8.5 % compared with the variants without the use of the drug, respectively. Gumiton contains: N – 12 %, P_2O_5 – 23 %, K_2O – 30%, trace elements (B – 0.2, Mo – 0.1, Mn – 0.1 %), potassium humate content – 11–14 %. Effect of reducing the transfer of ^{137}Cs to tubers without the use of humic preparations is maximal with the introduction of PhosAgro NPK and amounted to 4.8 times compared with the control. The greatest effect on reducing the transfer coefficient of ^{137}Cs to potato tubers with the use of Gumiton was obtained at the control (farming technology) - 6.4. When using Borkalimagnesia, the multiplicity of reducing the transfer of ^{137}Cs to tubers was 1.6 times compared with the option without using the complex. Gumiton is an effective agromeliorant in potato cultivation technologies in radioactively contaminated territories.

УДК: 574.24: 59.08: 592

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ДЛЯ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ: РАЗНООБРАЗИЕ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ

Рыбак А.В., Майстренко Т.А.

*ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Российская Федерация
e-mail: canewa.anuta@yandex.ru*

Рассмотрены методологические подходы к оценке состояния популяций дождевых червей при загрязнении среды их обитания радионуклидами природного происхождения. Приведены методы и приёмы, использованные для регистрации биологических эффектов, отмечена их эффективность для решения задач в радиоэкологическом исследовании. Представлены результаты изучения последствий влияния ионизирующих излучений на люмбрицид на разных уровнях организации биосистем.

Ключевые слова: радионуклиды, ионизирующее излучение, загрязнение почвы, дождевые черви, биологические эффекты

Изучение последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды для человека и биоты является одним из приоритетных прикладных аспектов в радиоэкологии. Широкий спектр применяемых в исследованиях методов обусловлен разнообразием

используемых объектов: от клеток и тканей до отдельных популяций и целых экосистем. Комплексный анализ биологических эффектов на основе результатов лабораторных и полевых экспериментов и системного подхода, объединяющего элементы

разных уровней функциональной организации, позволяет получить целостное представление о последствиях воздействия ионизирующего излучения на растения и животных в среде обитания.

В наземных экосистемах почва служит главным хранилищем радиоактивных элементов и долгосрочным источником их поступления в живые организмы. Среди важных групп почвенной биоты выделяют дождевых червей вследствие их большой общей биомассы и значимой деятельности по поддержанию плодородия почвы [1]. Представители люмбрицид находятся в постоянном контакте с частицами почвы и через проницаемый эпителий и пищеварительный тракт подвержены воздействию присутствующих в почве веществ, в том числе радионуклидов. Основными преимуществами дождевых червей как биоиндикаторов радиационного воздействия являются значимость для экосистемы, доступность для мониторинга, возможность дифференциации внешних и внутренних критических путей облучения, высокая способность к самовосстановлению популяции и достаточная для регистрации ответной реакции радиочувствительность организмов. Дождевые черви включены в число референтных видов для оценки радиационного воздействия на окружающую среду и анализа экологических рисков для биоты в целом [2].

Целью работы было изучение биологических эффектов у дождевых червей (Lumbricidae), обитающих в почве с повышенными концентрациями тяжёлых естественных радионуклидов, и анализ адаптационных возможностей почвенных беспозвоночных.

В процессе исследования использовали как натурные эксперименты в природных системах, так и лабораторные модельные опыты с внесением радионуклидов в почвенную среду. В первом случае мы получали результат, отражающий интегральное взаимодействие многих факторов окружающей среды, во втором – результат оценки влияния только радиоактивного загрязнения почвы. Хотя в последнем случае сложность схемы распада в ряду ^{238}U и проблема химической токсичности некоторых радиоактивных элементов затрудняют однозначную интерпретацию полученных данных. Для выявления механизмов реализации биологических эффектов в популяциях животных помимо общепринятых и хорошо себя зарекомендовавших в радиоэкологических исследованиях методов изучения надорганизменных систем в настоящее время широко используют методы молекулярной биологии, цитологии, генетики. Такой комплексный мультидисциплинарный подход – актуальная необходимость для понимания последствий радиоактивного загрязнения почвы для окружающей среды.

При изучении эффектов у дождевых червей из природных популяций (*Aporrectodea caliginosa*, *Lumbricus rubellus*) и лабораторных микрокосмов (*Eisenia fetida*) оценивали отклик биологических систем на радиационное воздействие разной продолжительности и интенсивности. Для регистрации ответной реакции использовали следующие

показатели: плотность популяции, выживаемость, репродуктивная способность особей, дифференциация целоцитов, уровни повреждений ДНК и скорость их репарации, а также анализ генетического полиморфизма популяций.

Мощности доз пролонгированного облучения в природно-территориальных комплексах варьировали от 0.3–1.0 мкГр/ч на контрольных участках до 5.7–114 мкГр/ч на участках с техногенно повышенным содержанием в почве радионуклидов уранового ряда. Дозовые нагрузки на лабораторных животных в условиях хронического воздействия, оценённые с помощью ERICA Tool 2.0, составили 0.4–4.0 Гр при мощности дозы 0.3–2.6 мГр/ч, острого – 10 и 20 Гр при мощности 0.7 Гр/мин.

Отметим, что в отличие от лабораторных экспериментов, где действующие факторы, как правило, контролируемы, и их число лимитировано, в полевых условиях на организмы влияет множество агентов различной природы. В нашем исследовании дождевые черви *A. caliginosa* и *L. rubellus* из природных популяций в течение длительного времени подвергались воздействию не только радиоактивного, но и сопутствующего ему химического загрязнения (на некоторых локациях). Также при изучении популяций и сообществ сложно учесть вариабельность природно-климатических факторов и сочетанные эффекты. Широкий спектр влияющих на животных характеристик среды их обитания осложняет интерпретацию полученных результатов, а зачастую не позволяет выявить ответную реакцию организмов. Наиболее чувствительными биологическими показателями, применёнными в полевых и лабораторных экспериментах для оценки влияния загрязнённой радионуклидами почвы на дождевых червей, оказались плотность населения природной популяции, выживаемость и репродуктивная способность особей, скорость репарации ДНК.

Для регистрации биологических показателей в работе применяли комплекс разнообразных методов: прямой оценки плотности популяции, анализа выживаемости и репродуктивной способности, ДНК-комет, провокационного облучения, определения нуклеотидной последовательности ДНК, анализа полиморфизма длин амплифицированных фрагментов (AFLP), микроскопического и проточно-цитометрического анализа целоцитов. Некоторые из них оказались неэффективными для решения поставленных задач. Например, с помощью метода AFLP выявлена сложная внутривидовая структура природной популяции дождевых червей *A. caliginosa*, что ограничивает дальнейшее применение этого инструмента для данного вида в радиоэкологических исследованиях.

Среди всех использованных методов особенно стоит выделить те, которые позволяют проводить изучение на клеточном уровне и регистрировать изменения в биологической системе на раннем этапе негативного воздействия. Это, в частности, – микроскопические и цитометрические методы, направленные на изучение структуры и морфологии клеток.

Количество целомоцитов, их состав, морфометрические параметры клеток могут изменяться в ответ на загрязнение почвы, поэтому эти показатели могут быть использованы в качестве биомаркера иммунного ответа дождевых червей на стресс окружающей среды [3, 4]. Предварительные результаты микроскопического и проточно-цитометрического анализа целомоцитов дождевых червей *E. fetida* в лабораторной культуре показали тенденцию к увеличению количества целомоцитов в ответ на острое облучение в дозе 10 Гр и экспонирование в течение двух месяцев в почве, содержащей повышенные концентрации природных радионуклидов. Также после радиационного воздействия отметили выраженную дифференциацию иммунокомпетентных клеток целомической жидкости, особенно заметную при использовании наиболее загрязненной почвы. Полагаем, что проточная цитометрия является перспективным и информативным методом в радиоэкологических исследованиях и может дополнить комплекс привычных способов регистрации и анализа биологических эффектов у почвенных беспозвоночных.

Таким образом, сочетание полевых исследований и использование лабораторных животных позволило изучать и анализировать биологические эффекты у дождевых червей на разных уровнях организации. Например, отмечали снижение репродуктивной способности особей в природных популяциях с низкой плотностью населения. Однако уровни повреждения ДНК у животных с фоновой и импактной территории статистически значимо не отличались. При этом в лабораторных экспериментах применение провокационного острого облучения позволило зафиксировать увеличение скорости репарации повреждений у беспозвоночных после хронического воздействия радионуклидов и тяжёлых металлов. Острое облучение в дозах более 2000 Гр одинаково изменяло выживаемость *A. caliginosa* с радиоактивных и фоновых участков. Репродуктивная

способность и выживаемость не отличались также между облучёнными в дозе 10 Гр и необлучёнными дождевых червей *E. fetida*. Хотя экспонирование этих в течение двух месяцев особей этого вида в почвенных субстратах, содержащих повышенные концентрации естественных радионуклидов (поглощённые дозы облучения 0,9 и 1,8 Гр), уменьшало выживаемость беспозвоночных на 40 и 80% соответственно. А после хронического воздействия более загрязнённой почвы (поглощённые дозы облучения 2.8 и 4.0 Гр) выявили выраженную дифференциацию иммунокомпетентных клеток.

Сочетание лабораторных и полевых экспериментов, разнообразие ответных реакций, регистрируемых с помощью мультидисциплинарных методов, позволяет получить больше информации, систематизировать результаты и оценить последствия для анелид радиоактивного загрязнения среды их обитания.

Список литературы

1. Edwards C.A. The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna // *Earthworm ecology* / Edited by C.A. Edwards. CRC Press, 2004. P. 3–11.
2. ICRP, 2008. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. 2008. Ann. ICRP 38 (3).
3. Homa J. et al. Metal-specific effects on metallothionein gene induction and riboflavin content in coelomocytes of *Allolobophora chlorotica* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2010. V. 73(8). P. 1937–1943.
4. Plytycz B. et al. Characteristics of immune-competent amoebocytes non-invasively retrieved from populations of the sentinel earthworm *Lumbricus rubellus* (Annelida; Oligochaeta; Lumbricidae) inhabiting metal polluted field soils // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2011. V. 74(4). P. 719–726.

THE STUDY OF EFFECTS OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF SOIL TO EARTHWORMS: A VARIETY OF APPROACHES AND METHODS

Rybak A.V., Maystrenko T.A.

The methodological approaches to assess the state of earthworm populations when their habitat is contaminated with naturally occurring radionuclides are considered. The methods and techniques used to study the biological effects are given; also its effectiveness in solving this radioecological problem is noted. The results of studies the effects of ionizing radiation on the lumbricids are presented at various levels of biosystem organization.

Keywords: radionuclides, ionizing radiation, soil pollution, earthworms, biological effects

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ВИДОВ СОРБЕНТОВ И КОРМОВЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ПРОДУКЦИИ В ЗОНАХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Рыбникова П.В., Губарева О.С., Цыгвинцев П.Н., Грудина Н.В., Исамов Н.Н.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: rybnikova.polya9@yandex.ru

Оценена эффективность применения смеси комбикормов и сорбента в сельскохозяйственных предприятиях Брянской области. Показано влияние применения ферроцина на дойных коровах в пастбищный период. Снижение загрязненности молока и мяса радиоцезием в производственных условиях может носить классический нисходящий или мультивариантный волнообразный характер. Установлено влияние высокомолекулярного водорастворимого полимера на увеличение продуктивности животных.

Ключевые слова: радионуклиды, сельскохозяйственные животные, сорбенты, кормовые добавки, ферроцин, высокомолекулярный водорастворимый полимер

Целью исследований является разработка научных основ применения новых видов сорбентов и кормовых добавок, направленных на повышение продуктивности сельскохозяйственных животных и получения экологически чистой продукции в зонах техногенного загрязнения.

Объект исследования: сельскохозяйственные животные (дойные коровы, телята).

Задачи:

Оценить эффективность использования комплексной кормовой добавки (комбикорм, ферроцин, высокомолекулярный водорастворимый полимер (ВВП)) для снижения поступления ^{137}Cs из рациона в молоко, а также мясо дойных коров и телят в условиях длительного эксперимента.

Новизна исследований

Впервые в производственных условиях определена эффективность применения комплексных кормовых добавок (комбикорм, ферроцин, высокомолекулярный водорастворимый полимер) на снижение поступления ^{137}Cs в организм животных (дойные коровы, телята) и качество молока при радиоактивном загрязнении кормовых угодий в условиях длительного эксперимента.

Методика исследований

Производственные исследования на лактирующих коровах (100 голов) провели в СПК «Родина» и К(Ф)Х ИП Останькевич Д.Н. Красногорского района Брянской области при средней плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs 186-310 кБк/м². Экспериментальные работы выполняли на лактирующих коровах и откормочном молодняке КРС 4-6 месячного возраста (в течение 60 суток) при летне-пастбищном содержании. В дополнение к хозяйственному рациону животные в разных группах получали ферроцин (доза 5,0 г/гол/сут), а также высокомолекулярный водорастворимый полимер (доза 0,1 г/гол/сут) в различных комбинациях.

Отбор проб молока, кормов, прижизненная дозиметрия и контроль продуктивности животных осуществляли перед началом и ежемесячно в течение

эксперимента в соответствии с «Ветеринарными правилами ВП 13.5.13/03-00» (М. Минсельхозпрод России, 2000).

Анализ проб проводили по аттестованным методикам. Содержание ^{137}Cs в молоке определяли методом полупроводниковой гамма-спектрометрии на спектрометре ГАММА-1П с Ge детектором, ошибка счета 10-25 %. Определение концентрации ^{137}Cs в мышечной ткани животных проводилось с помощью модифицированного гамма - радиометра СРП-88П, оборудованного NaI сцинтилляционным детектором и цилиндрическим коллиматором. Концентрация ^{137}Cs в мышечной ткани животных рассчитывалась с учетом их живой массы. Одновременно с прижизненной дозиметрией молодняка КРС проводили взвешивание телят. Качественные показатели молока коров

оценивали на ультразвуковом анализаторе молока «Клевер-2» (процентное содержание массовой доли жира, белка, сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) и плотности).

Данные обрабатывали с применением прикладных программ Microsoft Excell.

Вся информация статистически обработана: среднее геометрическое значение, среднее арифметическое значение, ошибки к ним, минимальное и максимальное значение.

Результаты научных исследований

Получены новые данные по оценке эффективности использования комплексной кормовой добавки (комбикорм, ферроцин, высокомолекулярный водорастворимый полимер) для снижения поступления ^{137}Cs из рациона в молоко, а также мясо дойных коров и телят в условиях длительного эксперимента. Показано, что применение полимера существенно не повлияло на содержание ^{137}Cs в молоке коров, в то время, как добавление ферроцина в рацион коров приводило к достоверному ($P < 0,05$) его снижению в молоке по сравнению с контрольной группой. Анализируя содержание ^{137}Cs в мясе коров и телят по данным прижизненной дозиметрии (рисунки 1,2), необходимо отметить его снижение при применении в рецептуре кормовых добавок ферроцина, по

сравнению с контролем. Применение полимера не повлияло на содержание ^{137}Cs в мышечной ткани коров и телят. Наибольший уровень снижения содержания ^{137}Cs в мясе коров и телят наблюдается при применении только ферроцина. Так, после 60 суток применения препарата, содержание радионуклида в мясе коров снизилось на 40 % по сравнению с контролем для коров и в 2 раза для телят. Наименее выраженное снижение наблюдалось при применении одновременно полимера и ферроцина, эффект на 60 сутки составила 20 % для коров и 30 % для телят. Следует отметить, что темпы снижения удоев (перевод коров в запуск) заметно отличались при применении полимера. Так, если в контрольной группе в среднем за сутки удои снижались на 66 ± 10 грамм, в группах с применением ферроцина в среднем на 58 ± 8 грамм, то в группе с применением полимера на 35 ± 12 грамм, достоверно ($p < 0,05$) отличаясь от контроля. Значительно больший эффект от применения полимера наблюдался при анализе среднесуточных привесов телят. В группе с добавлением полимера в рацион телят их среднесуточные привесы составили 680 ± 50 грамм, в то время как в контрольной группе и в группе с применением ферроцина привесы достигали только 330 ± 30 грамм в сутки. При одновременном применении полимера и ферроцина, эффект прироста массы был ниже 430 ± 55 грамм, превышая контрольные значения на 30 %.

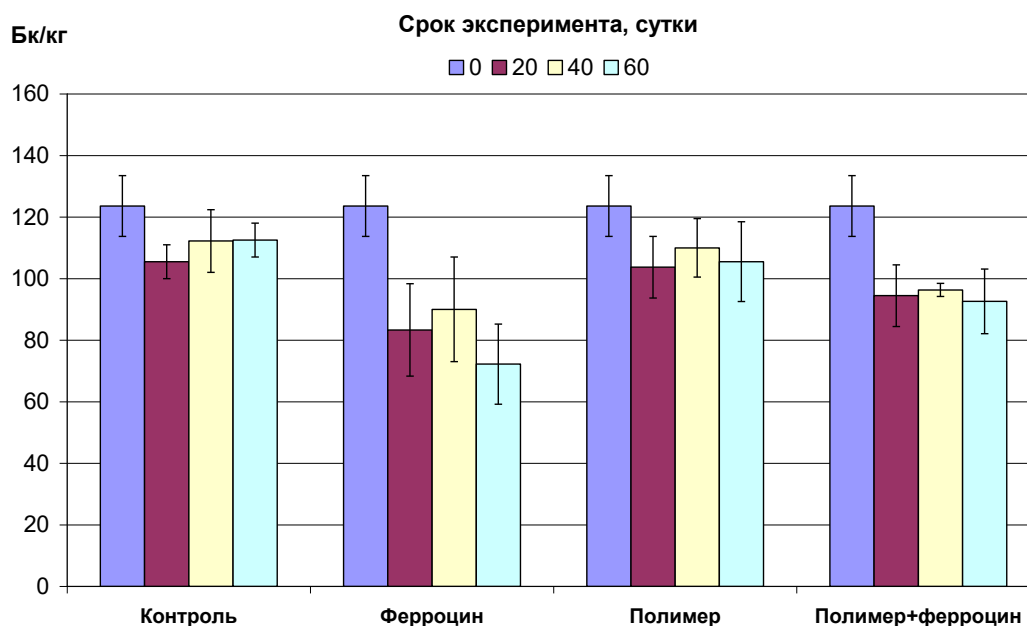


Рисунок 1. Содержание ^{137}Cs в мышечной ткани коров СПК «Родина»

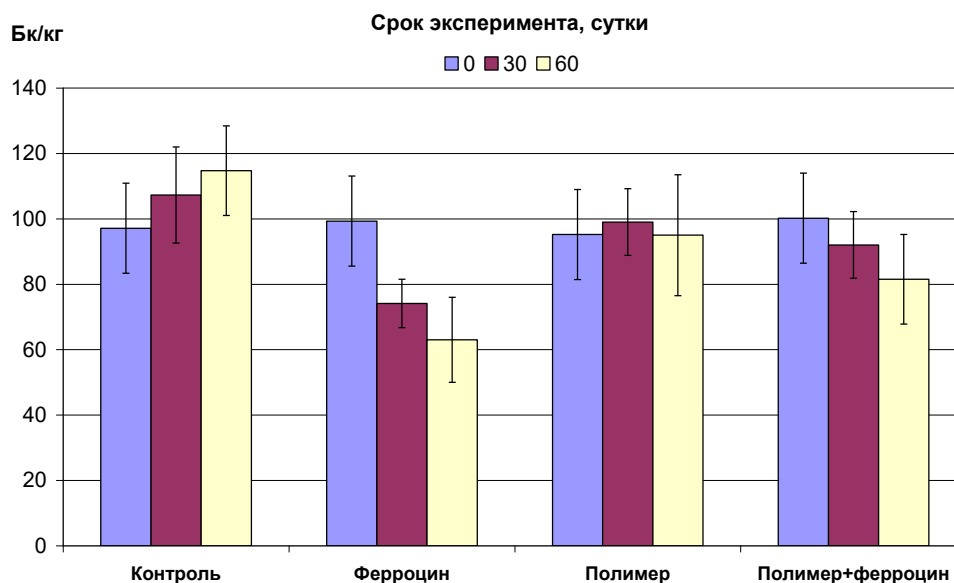


Рисунок 2. Содержание ^{137}Cs в мышечной ткани бычков К(Ф)Х ИП Останькевич Д.Н.

В контрольной группе коров СПК «Родина» (рисунок 2), не получавших кормовых добавок удельная активность ^{137}Cs в мясе на протяжении всего эксперимента находилась на уровне 100-130 Бк/кг, а в К(Ф)Х ИП Останькевич Д.Н. на уровне 80-130 Бк/кг.

Наибольший уровень снижения содержания ^{137}Cs в мясе коров и телят наблюдается при применении только ферроцина. Так, после 60 суток применения препарата, содержание радионуклида в мясе коров снизилось на 40 % по сравнению с контролем для коров и в 2 раза для телят. Для более выраженного снижения загрязнения продуктов животноводства (молоко, мясо) необходимо более длительное применение ферроцина – вплоть до 4-5 месяцев. Наименее выраженное снижение наблюдалось при

применении одновременно полимера и ферроцина, эффект на 60 сутки составила 20 % для коров и 30 % для телят.

Значительно больший эффект от применения полимера наблюдался при анализе среднесуточных привесов телят (рисунок 3). Так, в группе с добавлением полимера в рацион телят, их среднесуточные привесы составили 680 ± 50 грамм, в то время как в контрольной группе и в группе с применением ферроцина привесы достигали только 330 ± 30 грамм в сутки. При одновременном применении полимера и ферроцина, эффект прироста массы был ниже 430 ± 55 грамм, превышая контрольные значения на 30 %.

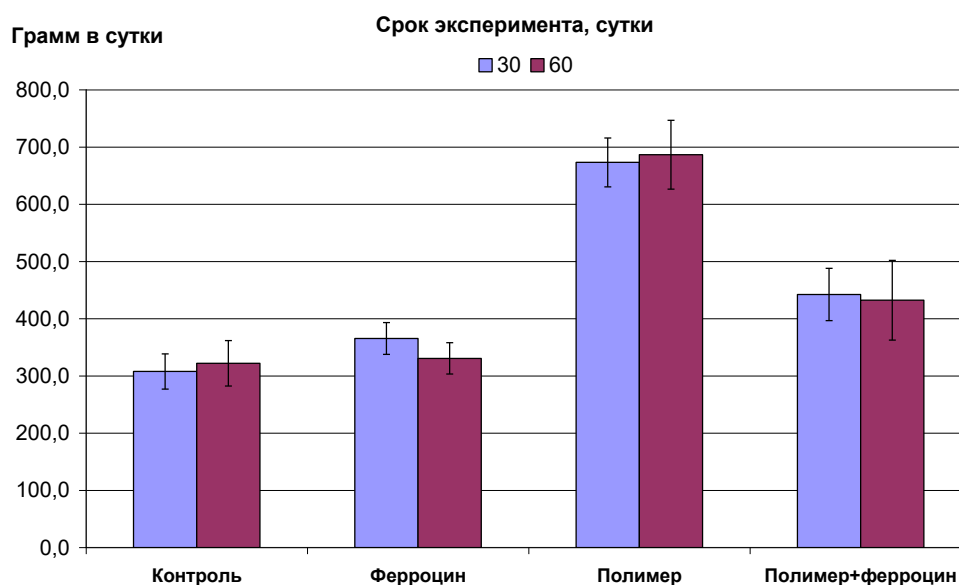


Рисунок 3. Суточные привесы телят К(Ф)Х ИП Останькевич Д.Н.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены новые данные по оценке эффективности использования комплексной кормовой добавки (комбикорм, ферроцин, высокомолекулярный водорастворимый полимер) для снижения поступления ^{137}Cs из рациона в молоко, мясо дойных коров и телят, а также повышения их продуктивности.

Список литературы

1. Губарева О.С., Исамов Н.Н. и др. Испытания новых рецептур кормовых добавок для снижения ^{137}Cs в продукции животноводства. *Journal of Agriculture and Environment*. 2022. № 1 (21).

2. Панов А.В., Исамов Н.Н. и др. Технологии ведения животноводства при масштабном радиоактивном загрязнении (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) // *Вестник сельскохозяйственной науки*, 2021, № 4. С. 58–63.

3. Губарева О.С., Исамов Н.Н., Цыгвинцев П.Н., Алешкина Е.Н. Испытания новых рецептур кормовых добавок для снижения ^{137}Cs . Участие в международной научно-практической конференции «Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике». 29 апреля 2021 года г. Гомель, Республика Беларусь.

USE OF NEW TYPES OF SORBENTS AND FEED ADDITIVES TO INCREASE PRODUCTIVITY OF FARM ANIMALS AND PRODUCE ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PRODUCTS IN MAN-MADE POLLUTION ZONES

Rybnikova P.V., Gubareva O.S., Tsygvintsev P.N., Grudina N.V., Isamov N.N.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The effectiveness of using a mixture of combined feed and sorbent in agricultural enterprises of the Bryansk region was assessed. The influence of ferrocin use on dairy cows during the pasture period has been shown. Reducing the contamination of milk and meat with radiocesium in production conditions can be classic descending or multivariant wave-like. The effect of a high molecular weight water-soluble polymer on increasing animal productivity has been established.

Keywords: *radionuclides, farm animals, sorbents, feed additives, ferrocin, high-molecular weight water-soluble polymer*

УДК 631.45:(661,847+661.848)

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СОЧЕТАНИЙ СОДЕРЖАНИЯ Zn И Cd В СУПЕСЧАНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ НА ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ФОРМАМ ФИКСАЦИИ

Саруханов А.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Крыленкин Д.В., Санжаров А.И., Дикарев Д.В., Корнеев Ю.Н.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: cornblum@mail.ru*

В работе было изучено влияние разных концентраций Cd и Zn на их содержание в подвижной и сумме подвижной и связанной с органоминеральными комплексами формах. Концентрации Cd изменялись от 10 до 25 мг/кг, концентрации Zn изменялись от 50 до 150 мг/кг. Возрастание концентраций кадмия приводил к увеличению содержания, как кадмия, так и цинка в подвижной и сумме подвижной и связанной с омик формах. Значительных изменений в концентрации извлекаемого кадмия от количества цинка не выявлено.

Ключевые слова: формы нахождения, миграция, Cd, Zn, экология, сельское хозяйство

Кадмий и цинк – тяжелые металлы способные оказывать тератогенное воздействие на организм, как во время развития плода, так и на генетическом уровне. Однако если для кадмия характерно тератогенное воздействие при избытке, цинк может вызывать нарушение синтеза ДНК, напротив, при дефиците за счет торможения активности цинкозависимых ферментов [1]. В данной работе было рассмотрено влияние содержания этих металлов на прочность закрепления в дерново-подзолистой почве, для оценки возможности использования внесения цинка для снижения возможного поступления кадмия в дальнейшем в организм человека из почвы через продукты растительного или животного происхождения.

Поведение Zn и Cd изучали в вегетационных опытах в теплице на дерново-подзолистой супесчаной почве с использованием тест-культуры ячменя (*Hordeum vulgare* L.) до достижения растениями

возраста 80 сут. (температура 25–35°C, относительная влажность воздуха 60–70 %, влажность почвы 55 % от полной влагоемкости ПВ).[2]

В ходе экспериментов проводились исследования по изучению динамики трансформации подвижных (извлекаемых 1 МСН₃COONH₄, pH 4,8) [2] форм нахождения Zn и Cd в дерново-подзолистой супесчаной почве. Усредненные значения для вариантов с концентрацией Cd = 10 мг/кг, полученные на 18-е, 40-е, 60-е и 80-е сутки вегетационного эксперимента, представлены на рисунке 1. Содержание подвижных форм Zn в почве возрастало с увеличением количества вносимого Zn. Полученная зависимость может быть удовлетворительно описана с помощью линейной функции: $[Zn]_{Cd10Ac.}(\%) = 0,33 \times [Zn]_{вал.} - 12,61$ (мг/кг), $R^2=0,995$ для вариантов с концентрацией Cd 10 и $[Zn]_{Cd25Ac.}(\text{мг/кг}) = 0,56 \times [Zn]_{вал.}$ (мг/кг), $R^2=0,99$ для вариантов с концентрацией Cd 25.

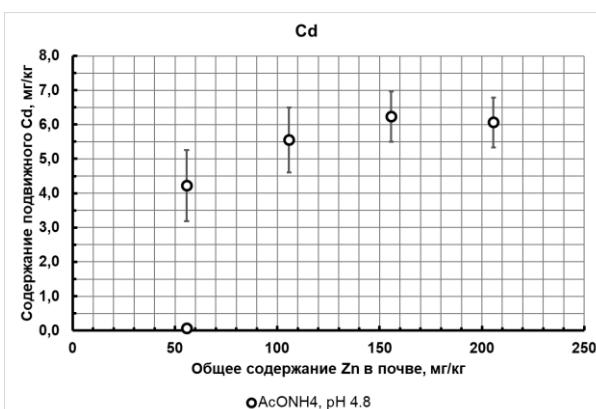
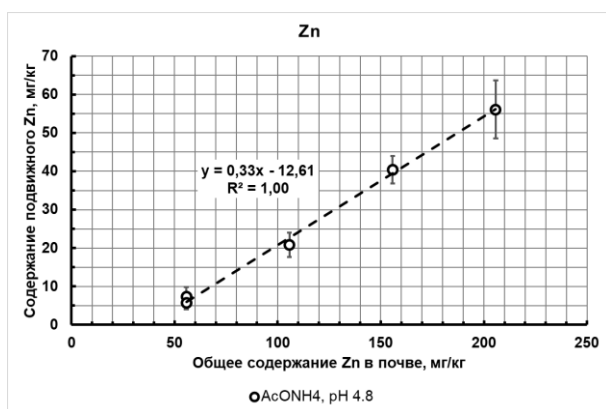


Рисунок 1. Содержание подвижной формы Zn и Cd в почве в зависимости от варианта исследования при совместном их внесении

Содержание подвижных форм Cd в почве также возрастало: при внесении в почву Cd в количестве 10 мг/кг сначала с $0,07 \pm 0,05$ мг/кг до $4,2 \pm 1,0$ мг/кг, и, далее, с $4,2 \pm 1,0$ мг/кг до $6,1 \pm 0,7$ мг/кг с увеличением количества внесенного в почву Zn (от 50 до 150 мг/кг) (Рис. 1), а при внесении в почву Cd в количестве 25 мг/кг сначала с $0,16 \pm 0,05$ мг/кг (контроль) до 22 ± 8 мг/кг (вариант Cd₂₅Zn₀) и, далее, варьировало в диапазоне 23–25 мг/кг независимо от количества внесенного в почву Zn (от 50 до 150 мг/кг), (Рис. 2в).

Также в течение экспериментов проводились исследования по изучению динамики трансформации суммы подвижных и связанных с органо-минеральными комплексными соединениями – ОМК (извлекаемых 1 МСН₃COONH₄, pH 4,8+1 % ЭДТА) форм [2] нахождения Zn и Cd в дерново-подзолистой почве. Результаты представлены на рисунках 2 и 3.

Содержание суммы подвижного и связанного с органо-минеральными комплексными соединениями Zn в почве возрастало с увеличением концентрации

металла. Полученная зависимость может быть удовлетворительно описана с помощью линейной функции: $[Zn]_{Cd10e.} = 0,42 \times [Zn]_{вал.} - 14,24$ (мг/кг), $R^2=0,98$ для концентраций Cd 10 мг/кг и [Zn]

$Cd_{25e.}(\text{мг/кг}) = 0,72 \times [Zn]_{вал.}$ (мг/кг), $R^2=0,99$ для концентраций Cd 25 мг/кг.

Содержание подвижных и специфически сорбированных форм Cd в почве также возрастало: при внесении в почву металла в количестве 10 мг/кг сначала с $0,10 \pm 0,06$ мг/кг до $4,3 \pm 1,2$ мг/кг, и, далее, с $4,3 \pm 1,2$ мг/кг до 7–8,5 мг/кг с увеличением количества внесенного в почву Zn (от 50 до 150 мг/кг) (Рис. 3), а при внесении в почву металла в количестве 25 мг/кг сначала с $0,24 \pm 0,05$ мг/кг до $23,1 \pm 1,2$ мг/кг и, далее, далее, варьировало в диапазоне 26–28 мг/кг независимо от количества, внесенного в почву Zn (от 50 до 150 мг/кг), (рис. 2 а, б).

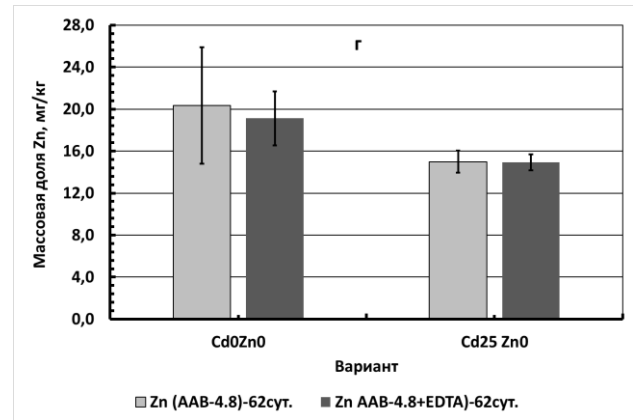
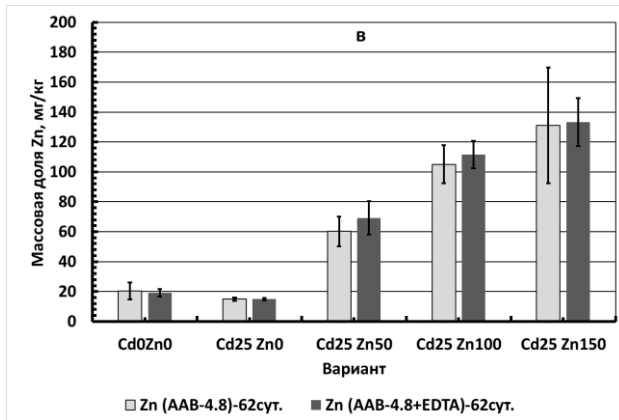
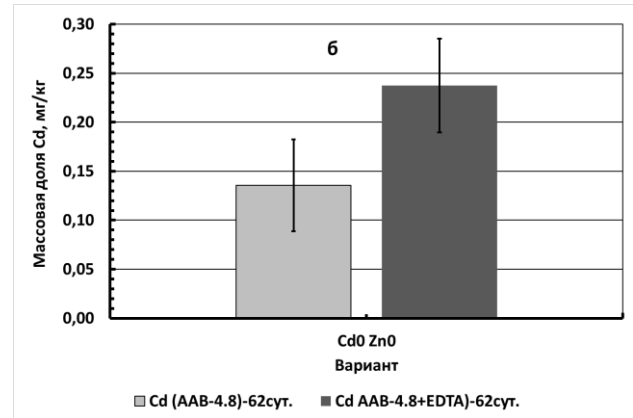
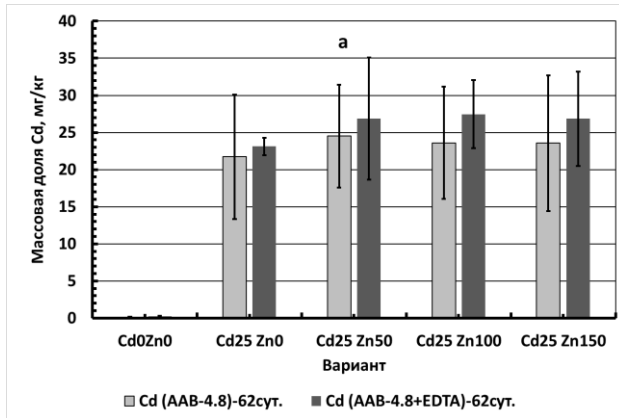


Рисунок 2. Содержание подвижных и суммы подвижных и связанных с органо-минеральными комплексами форм Cd (а,б) и Zn (в,г) в зависимости от варианта для доз Cd25

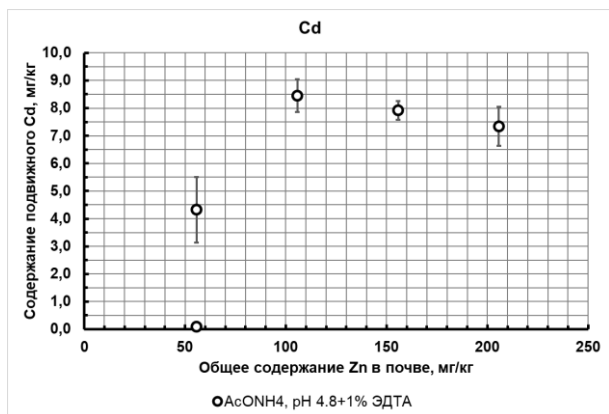
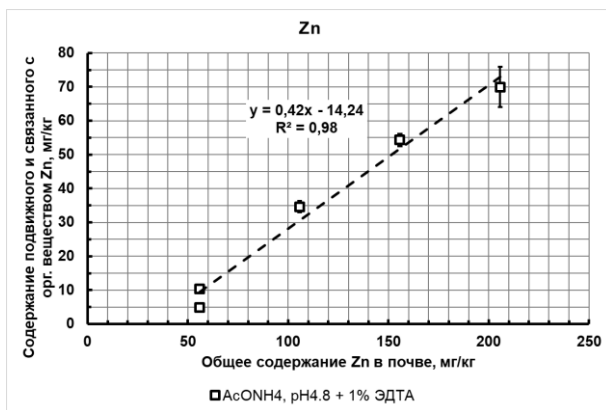


Рисунок 3. Содержание суммы подвижных и сорбированных в виде ОМК-соединений Zn и Cd в почве для доз Cd10

Полученные результаты опытов по относительному содержанию подвижных и специфически сорбированных органо-минеральным комплексом почв форм Zn и Cd в исследуемой дерново-подзолистой почве при совместном внесении в нее этих ТМ, представлены на рисунках 4 и 5.

Из диаграмм, представленных на соответствующих рисунках, следует, что количественное соотношение между Zn, присутствующим в почве в подвижной форме и в сумме форм - подвижной и специфически сорбированной в виде органо-минеральных комплексных соединений, составляет, в среднем, 0,8 при концентрациях Cd10 и 0,95 при Cd25 при любом

исследованном содержании Zn в почве. Для подвижной формы и суммы подвижной и специфически

сорбированной форм Cd соотношение составили 0,79 для Cd10 и 0,90 для Cd25.

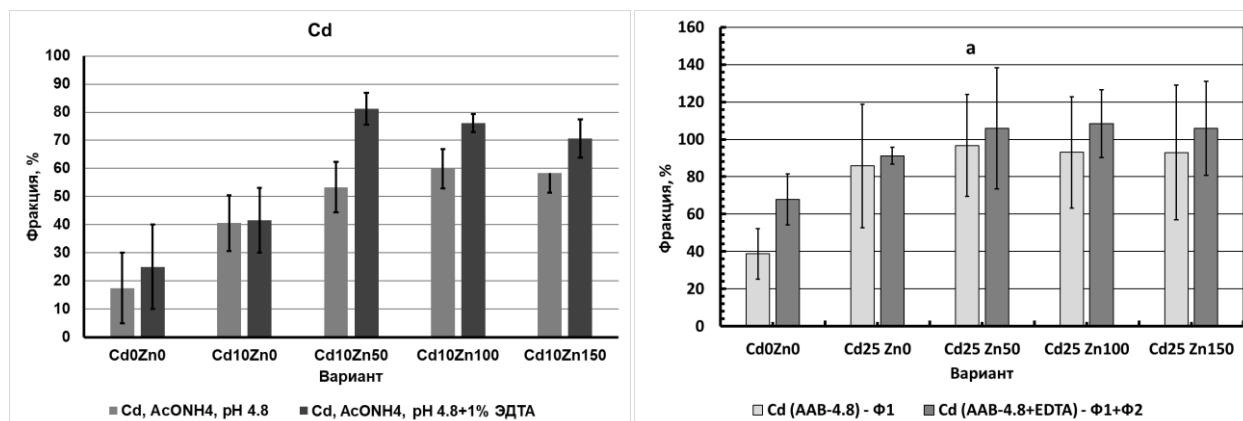


Рисунок 5. Относительное содержание подвижного Cd и суммы подвижного и специфически сорбированного в виде органо-минеральных комплексных соединений Cd), %

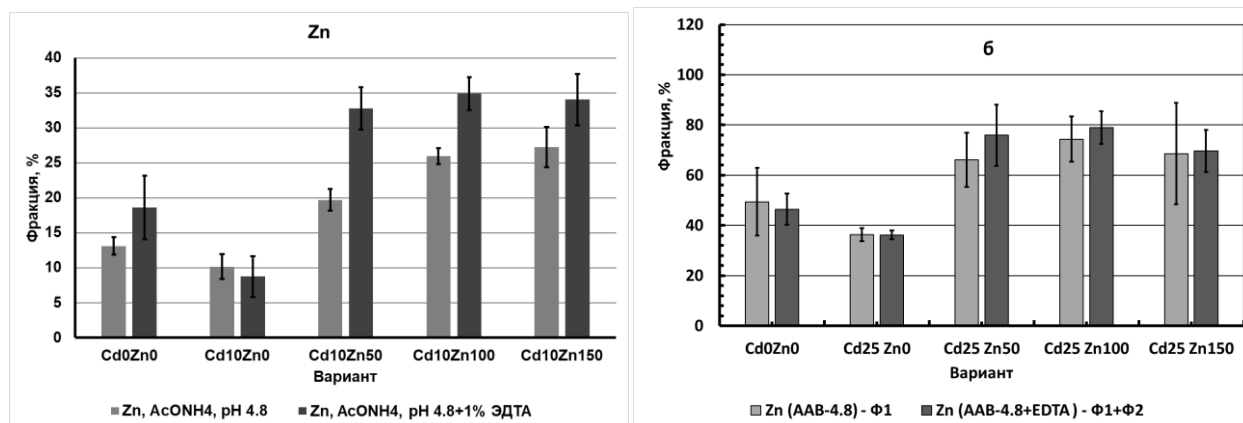


Рисунок 6. Относительное содержание подвижного Zn и суммы подвижного и специфически сорбированного в виде органо-минеральных комплексных соединений Zn в почве, %

Подобное соотношение форм подвижных и суммы подвижных и связанных с органо-минеральными комплексами Zn и Cd свидетельствует о близости химических характеристик соответствующих групп соединений их с ТМ в почве, разделяемых как «подвижные» или «специфически сорбированные в виде органо-минеральных комплексных соединений». Таким образом, данная схема фракционирования ТМ в почвах по степени прочности их связывания с компонентами почвы оправдывает свою актуальность.

Таким образом, при больших концентрациях кадмия в почве в подвижную форму переходит большее количество как цинка $[Zn]_{Cd25Ac}(мг/кг) = 0,56 \times [Zn]_{вал}$ против $[Zn]_{Cd10Ac}(мг/кг) = 0,33 \times [Zn]_{вал} - 12,61$ мг/кг, так и кадмия (23-25) против 6 мг/кг, что абсолютно логично для Cd, учитывая его возросшее количество, и

может быть объяснено для Zn за счет конкурентного взаимодействия с ионом Cd, занимающего места его фиксации в почве. Подобная же картина наблюдается и для суммы подвижной и связанной с ОМК соединениями форм Zn и Cd с $[Zn]_{Cd10e} = 0,42 \times [Zn]_{вал} - 14,24(мг/кг)$ для Cd10 и $[Zn]_{Cd25e}(мг/кг) = 0,72 \times [Zn]_{вал}$ (мг/кг) для Cd25 для Zn.

Список литературы

1. Арустамян О.М., Ткачишин В.С., Алексейчук А.Ю. Влияние соединений кадмия на организм человека // Медицина неотложных состояний. 2016 г.
2. Крыленкин Д.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н. и др. Влияние Zn на подвижность Cd в дерново-подзолистой почве и его накопление ячменем // Агрехимический Вестник, 2021, №3. С 40–46.

IMPACT OF DIFFERENT Zn AND Cd CONTENT IN SODDY PODZOLIC SOIL ON THEIR DISTRIBUTION IN EXCHANGABLE AND CARBONATE BOUND FRACTIONS

Sarukhanov A.V., Anisimov V.S., Anisimova L.N., Krylenkin D.V., Sanzharov A.I., Dikarev D.V., Korneev Yu.N.

Russian Institute of Radiology and Agroecology. Obninsk, Russian Federation

The impact of different concentration of Cd and Zn in soil on their content in exchangeable and carbonate bound forms was studied. Cadmium concentration in soil varied from 10 to 25 mg/kg, Zn concentration in soil varied from 50 to 150 mg/kg. An increase in the concentrations of Cd resulted in an increase of the content of both Zn and Cd in the exchangeable and sum of exchangeable and carbonate bound fractions. Significant changes in Cd concentration depending on amount of Zn in soil were not found.

Keywords: labile fraction, migration, Zn, Cd, ecology, agriculture.

УДК 631.895+631.816

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСА ГУМИТОН НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО КУКУРУЗЫ И ПЕРЕХОД ^{137}Cs В УРОЖАЙ В БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Свириденко Д.Г., Санжарова Н.И., Ратников А.Н., Суслов А.А., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Баланова О.Ю.

*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: sedelnikov167@gmail.com*

В полевых исследованиях на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых почвах Новозыбковского района Брянской области показано, что применение комплексного удобрения ФосАгро NPK способствовало повышению урожайности вегетативной массы кукурузы на 43%. Обработка Гумитоном посадок кукурузы вызвало повышение урожайности на 25–42,5 % и увеличение содержания сырого протеина на 1,05–1,55 % по сравнению с вариантами без применения препарата. Применение Гумитона снижало переход ^{137}Cs в вегетативную массу в 2,2–2,7 раза.

Ключевые слова: почва, кукуруза, Гумитон, урожайность, качество, ^{137}Cs , переход

При разработке новых подходов к технологиям по снижению накопления радионуклидов в сельскохозяйственной продукции предложены наиболее перспективные агроメリоранты. В полевых исследованиях в 2021 г. на территории Брянской области были испытаны: удобрение ФосАгро NPK и органо-минеральный комплекс Гумитон.

Комплексное удобрение **ФосАгро NPK** (N – 8 %, P_2O_5 – 20 %, K_2O – 30 %), с высоким содержанием калия и фосфора и низким содержанием азота, хорошо подходит для основного внесения с осени. Универсальное удобрение, идеальное для многолетних трав, сахарной свёклы и картофеля, а также зерновых и зернобобовых культур. Высокоэффективно на почвах с низким содержанием подвижного калия: легких по гранулометрическому составу, с промывным водным режимом.

Органо-минеральный комплекс на основе торфа **Гумитон** разработан учеными ФГБНУ ВНИИРАЭ. Получены: патент на изобретение № 2709737 от 19.12.2019 г.; Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) №718667 от 05.07.2019 г. Гумитон содержит: N – 12 %, P_2O_5 – 23 %, K_2O – 30 %, микроэлементы (B – 0,2, Mo – 0,1, Mn – 0,1 %), содержание гуматов калия – 11–14 %. 1–2-кратная обработка Гумитоном вегетирующих растений в дозе 1 л/га проводится в фазы наиболее активного роста и потребления питательных веществ [1, 2].

Материалы и методы

В условиях полевого опыта на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых супесчаных почвах Новозыбковского района Брянской области на базе СПК «Заречье» проводились исследования по

изучению влияния обработки Гумитоном вегетирующих растений кукурузы (сорт Каскад 195) на продуктивность и качество и на переход ^{137}Cs в зеленую массу.

Исследования проводились на площади 12 га. Агрохимическая характеристика почв: pH_{KCl} 5,6; содержание гумуса – 1,69 %; гидролитическая кислотность – 1,70 мг.-экв./100 г почвы, содержание подвижного фосфора и обменного калия – 478 и 189 мг/кг почвы, соответственно. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs – 650 кБк/м² (17,6 Ки/км²).

Схема полевого опыта:

1. Технология хозяйства – навоз – 60 т/га. 2. Технология хозяйства + внесение ФосАгро NPK, 0,5 т/га (N₄₀P₁₀₀K₁₅₀). 3. Технология хозяйства + Гумитон (1 л/га). 4. Технология хозяйства + внесение ФосАгро NPK + Гумитон (1 л/га).

Площадь каждого варианта – 1 га, повторность 3-кратная.

Культура – кукуруза на силос, сорт Каскад 195.

Обработка посадок кукурузы Гумитоном (доза 1 л/га) была проведена в фазу 5–6 листьев. После уборки вегетативной массы кукурузы определяли урожайность и содержание ^{137}Cs в зеленой массе и в почве для расчета $\text{Kп}^{137}\text{Cs}$ (Бк/кг ^{137}Cs в растениях)/(кБк/м² ^{137}Cs в почве).

Планирование полевых опытов, анализ данных по урожайности и статистическую обработку

результатов проводили по Доспехову Б.А [3]. Содержание ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах определяли на полупроводниковом гамма-спектрометре (Canberra) с программным обеспечением Genie-2000 по количественному анализу спектров. Математическую обработку результатов исследований выполняли с использованием пакета прикладных программ в составе Microsoft Excel 2007 с 95%-ным уровнем значимости результатов.

Результаты и их обсуждение

В проведенных ранее исследованиях по применению Гумитона в радиоактивно загрязненном Краснoгорском районе Брянской области показана его высокая эффективность в зональных технологиях выращивания кукурузы. Урожай вегетативной массы повысился на 21–26 %, в зависимости от агрофона. Кратность снижения перехода ^{137}Cs в зеленую массу кукурузы при обработке посадок Гумитоном была 1,6–3,2 раза [4]. Увеличение содержания сырого протеина в вегетативной массе составила 1,00–2,38 % в абсолютных цифрах.

В результате исследований 2021 г. в СПК «Заречье» показано, что внесение в почву ФосАгро NPK способствовало повышению урожая зеленой массы кукурузы на 42,9% по сравнению с контролем (табл. 1).

Таблица 1

Влияние основных удобрений на урожай вегетативной массы кукурузы и содержание ^{137}Cs в растениях, без применения гуминовых препаратов. СПК «Заречье», Новозыбковский район Брянской области

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка за счет удобрений, ц/га	Прибавка, %	Содержание ^{137}Cs в вегетативной массе, Бк/кг	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	$\text{Kп}^{137}\text{Cs}$	Кратность снижения $\text{Kп}^{137}\text{Cs}$, раз
1. Фон – технология хозяйства	28,0	-	-	117	766 кБк/м ²	0,153	-
2. Фон + ФосАгро NPK	40,0	120	42,9	70,9	579 кБк/м ²	0,122	1,25
НСР ₀₅	35,0						

Плотность загрязнения почвы по всем вариантам опыта была высокая (579–766 кБк/м² или 15,6–20,7 Ки/км²)

Обработка Гумитоном посадок кукурузы на удобренной навозом слабокислой дерново-подзолистой супесчаной почве с высокой плотностью загрязнения ^{137}Cs (свыше 555 кБк/м²) вызвало повышение урожайности вегетативной массы на 25 %, а по фону применения удобрения ФосАгро NPK – на 42,5 % по сравнению с вариантами без применения препарата.

Содержание ^{137}Cs в зеленой массе во всех вариантах опыта, в том числе на контроле, варьирует от 36,1 до 117 Бк/кг, что в 3,4–11,1 раза ниже нормативов ВП-13.5.13/06 -01 (400 Бк/кг) [5]. $\text{Kп}^{137}\text{Cs}$

составляет 0,055–0,153 в различных вариантах опытов. Внесение в почву ФосАгро NPK уменьшает переход ^{137}Cs в вегетативную массу в 1,25 раза по сравнению с контролем.

Обработка Гумитоном снижает переход ^{137}Cs в вегетативную массу кукурузы в 2,7 раза на контроле и в 2,2 раза при применении ФосАгро NPK, по сравнению с вариантами без обработки препаратом (табл. 2).

Внесение в почву ФосАгро NPK повысило содержание сырого протеина в вегетативной массе на 1,03 % в абсолютных цифрах по сравнению с контролем (технология хозяйства).

Обработка растений Гумитоном достоверно увеличила содержание сырого протеина в кукурузе на 1,55 % на контроле и на 1,05 % при внесении

ФосАгро NPK в абсолютных цифрах, по сравнению с вариантами без опрыскивания препаратом.

Таблица 2

Влияние Гумитона на урожай вегетативной массы кукурузы и содержание ¹³⁷Cs в растениях. СПК «Заречье», Новозыбковский район Брянской области

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка за счет удобрений, ц/га	%	Прибавка за счет Гумитона, ц/га	%	Содержание ¹³⁷ Cs в продукции, Бк/кг	Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	Кп ¹³⁷ Cs	Кратность снижения Кп ¹³⁷ Cs за счет Гумитона, раз
1. Фон – технология хозяйства	35,0	-	-	70	25,0	40,9	712 кБк/м ²	0,057	2,7
2. Фон + ФосАгро NPK	57,0	220	62,9	170	42,5	36,1	662 кБк/м ²	0,055	2,2
НСП ₀₅	55,0								

Список литературы

1. Ратников А.Н., Свириденко Д.Г. и др. Эффективность удобрения пролонгированного действия Супродит М и органо-минерального комплекса Геотон при возделывании кукурузы в условиях радиоактивного загрязнения // Проблемы агрохимии и экологии», 2019, № 2. С. 37-41.

2. Mazurov V. N. et al. Gumiton - New Organo-Mineral Complex to Increase the Productivity of Agricultural Cultures // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-4, November 2019. P. 3374–3381.

3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 336 с.

4. Баланова О.Ю., Ратников А.Н. и др. Влияние органо-минерального комплекса Гумитон на продуктивность и качество кукурузы в условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий Брянской области // Современные проблемы радиобиологии, радиэкологии и агроэкологии: Сборник докладов IV международной молодежной конференции, Обнинск, 22-24 сентября 2021. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 169–172.

5. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.3.2.1078-01, СанПиН 2.3.2.2650–10.

EFFECT OF COMPLEX GUMITON ON THE PRODUCTIVITY AND QUALITY OF CORN AND THE TRANSFER OF ¹³⁷Cs TO YIELD IN BRYANSK REGION

Sviridenko D.G., Sanzharova N.I., Ratnikov A.N., Suslov A.A., Ivankin N.G., Petrov K.V., Balanova O.Y.

Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Kaluga Region, Russia,

In field research on radioactively contaminated soddy-podzolic soils of Novozybkovsky district of Bryansk region, it was shown that the use of the complex fertilizer PhosAgro NPK contributed to an increase in the yield of the vegetative mass of corn by 43%. The treatment of corn plantings with Gumiton caused an increase in yield by 25-42.5% and an increase in the crude protein content by 1.05-1.55% compared to variants without the use of the drug. The use of Gumiton reduced the transfer of ¹³⁷Cs to the vegetative mass by 2.2-2.7 times.

Keywords: soil, corn, Gumiton, yield, quality, ¹³⁷Cs, transfer

In field research on the territory of Novozybkovsky district of Bryansk region, the following agromeliorants were tested: PhosAgro NPK fertilizer and organo-mineral complex Gumiton. PhosAgro NPK complex fertilizer (N – 8 %, P₂O₅ – 20 %, K₂O – 30 %), ideal for perennial grasses, sugar beet and potatoes, as well as cereals and legumes. Highly effective on soils with low content of mobile potassium: light in granulometric composition, with a washing water regime. The organo-mineral complex based on peat Gumiton contains: N – 12 %, P₂O₅ – 23 %, K₂O – 30 %, trace elements (B – 0.2, Mo – 0.1, Mn – 0.1 %), potassium humate content – 11-14 %. Gumiton treatment of vegetative plants at a dose of 1 l/ha is carried out in the phases of the most active growth and nutrient intake. It was shown that the introduction of PhosAgro NPK into the soil contributed to an increase in the yield of green mass of corn by 43 % compared with the control. The treatment of corn plantings with Gumiton caused an increase in the yield of vegetative mass by 25%, and according to the background of the use of PhosAgro NPK fertilizer – by 42.5 % compared with the options without the use of the drug. The introduction of PhosAgro NPK into the soil reduces the transfer of ¹³⁷Cs to the vegetative mass by 1.25 times compared to the control. Treatment with Gumiton reduces the transfer of ¹³⁷Cs to the vegetative mass of corn by 2.7 times at the control and by 2.2 times when using PhosAgro NPK, compared with options without treatment with the drug. Treatment of plants with Gumiton significantly increased the crude protein content in corn by 1.55 % at the control and by 1.05 % when PhosAgro NPK was applied in absolute numbers, compared with the options without spraying.

УДК 632.262:631.5

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЛУКОМ БАТУНОМ В УСЛОВИЯХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Середин Т.М., Баранова Е.В., Ушакова О.В., Марчева М.М., Солдатенко А.В.

ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства»

Московская область, Одинцовский район, пос.ВНИИССОК, ул.Селекционная, д.14, Российская Федерация

e-mail: timofey-seredin@rambler.ru

Насчитываются тысячи видов и форм декоративных растений, множество разнообразных сортов. К ним с полным правом можно отнести и ряд растений рода *Allium* L. – луки, отличающиеся большим многообразием и насчитывающие, по разным оценкам от 500 до 850 видов, из которых около 200 произрастает на территории России. До недавнего времени многообразие луков использовалось слабо, культивировалось только 10 видов, используемых в пищу и для лекарственных целей. Лук батун (*Allium fistulosum* L.) – один из видов многолетних луков, культивируемых с давних времен. По классификации Н.И.Вавилова центр происхождения батун С.-З.Китай. В настоящее время батун в значительных объемах выращивают в Японии, Китае, Корее, Северном Вьетнаме, Индонезии и на Дальнем Востоке России. Важнейшая особенность овощных культур, в частности растений рода *Allium* L. обусловлена высокими содержаниями витаминов, антиоксидантов, а также способностью выводить из организма тяжелые металлы и радионуклиды. Изучение биологических особенностей сортов, накапливающих минимальное количество загрязнителей, позволит вести целенаправленный скрининг образцов при изучении мирового генофонда [1, 2, 3]. В настоящих исследованиях дано описание коллекционного питомника лука батун по накоплению в листьях радионуклидов в условиях Нечерноземья.

Ключевые слова: лук батун, радионуклиды, 90-стронций, 137-цезий, лист

Методика исследований. Для проведения работы в 2020-2021 годы использовали материал, отобранный в лаборатории в предыдущие годы, а также образцы из коллекции ВНИИГР им. Н.И. Вавилова. Изучение и оценку материала со всеми учетами и наблюдениями проводили в соответствии с «Методическими указаниями по селекции луковых культур» (1997), «Методическими указаниями по изучению коллекционного материала многолетних луков» и «Методическими указаниями по изучению и поддержанию в живом виде мировой коллекции лука и

чеснока» (2005). В разные годы исследований коллекционный питомник лука батун был представлен 40 сортообразцами различного эколого-географического происхождения и образцов из каталога ВНИИГР им. Н.И.Вавилова.

Результаты исследований. В условиях изучаемых лет накопление радионуклидов (¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr) в листьях лука батун, в зависимости от образца варьировало от 5,1 до 5,8 Бк/кг по 137-цезию, что почти в 32 раза ниже ПДК. Среднее накопление по 137-цезию 5,4 Бк/кг, что более чем в 30 раз ниже ПДК.

По 90-стронцию содержание поллютанта изменяется от 7,0 до 8,3 Бк/кг, что более чем в 6 раз ниже ПДК.

Как показали результаты исследований коллекционного питомника по уровню накоплению радионуклидов ¹³⁷цезия и 90-стронция проявляются

сортовые различия и специфика накопления обоих элементов. В таблице представлены образцы, которые были отобраны в условиях Московской области в 2019 году как контрастно различающиеся по накоплению радионуклидов.

Таблица 1

Содержание радионуклидов (Бк/кг) в продукции лука батуна, 2020–2021 годы

Сортообразец	¹³⁷ Cs	Ранг	⁹⁰ Sr	Ранг
Стар	5,8 ±1,2	4	7,7 ±1,6	3
Серёжа	5,1 ±0,9	1	7,4 ±1,3	2
Эверест	5,1 ±1,3	2	8,3 ±1,6	4
Русская трапеза	5,3 ±1,5	3	7,0 ±1,4	1
ПДК	130		50	

С целью выделения исходного материала для селекции на стабильно низкий уровень накопления ¹³⁷цезия и 90-стронция особый интерес представляют шесть образцов: Серёжа и Русская трапеза.

В результате проведения эксперимента на коллекционном питомнике лука батуна отечественной и зарубежной селекции выявлена сортовая реакция по накоплению радионуклидов ¹³⁷цезия и 90-стронция. Выяснено, что лук батун не является активным аккумулятором накопления экотоксикантов в условиях Брянской области. В среднем по четырем сортам накопление ¹³⁷Cs составило 5,3 Бк/кг, при ранге 3. Необходимо отметить, что анализ полученных результатов свидетельствует, что при высоком уровне накопления ¹³⁷цезия растения сформировали более крупные листья и имели более высокий ложный стебель по сравнению с растениями с низким уровнем накопления элемента (¹³⁷цезия). По содержанию ⁹⁰Sr распределение по рангам накопления сортов приближается к нормальному. Наиболее представительны ранги со средним уровнем накопления радионуклида (⁹⁰Sr): от 7,4 до 7,7 Бк/кг. Они содержат два из четырех изученных форм.

Список литературы

1. Середин Т.М., Солдатенко А.В., Баранова Е.В., Шумилина В.В. Оценка коллекционного питомника лука порея (*Allium porrum* L.) для селекции на стабильно низкий уровень накопления радионуклидов// Ж.Овощи России. №4. 2018. С.33–35.
2. Середин Т.М., Солдатенко А.В. и др. Содержание радионуклидов в луке порее (*Allium porrum* L.) в условиях Московской области//Сб.научн.тр. Международной молодежной конференции (3-4 октября 2019). Обнинск.-С.200-202.
3. Солдатенко А.В., Добруцкая Е.Г., Сычев С.М., Середин Т.М. Адаптивный потенциал овощных растений для получения экологически безопасной продукции с низким уровнем накопления ¹³⁷цезия//Сб.науч.тр. Фундаментальные и прикладные исследования в биоорганическом сельском хозяйстве России, СНГ и ЕС. 9-12 августа 2016 г. Малые Вяземы.

PECULIARITIES OF RADIONUCLIDE ACCUMULATION BY BATUN ONION UNDER THE CONDITIONS OF THE BRYANSK REGION

Seredin T.M., Baranova E.V., Ushakova O.V., Marcheva M.M., Soldatenko A.V.

FSBSI «Federal Scientific Vegetable Center»

Moscow region, Odintsovsky district, v. VNISSOK, Seleksionnaya st. 14, Russian Federation

e-mail: timofey-seredin@rambler.ru

There are thousands of species and forms of ornamental plants, with many different varieties. These include many plants of the genus *Allium* L. - onions, which are very diverse and have, according to various estimates, from 500 to 850 species, of which about 200 grow on the territory of Russia. Until recently, the diversity of onions was used poorly, only 10 species were cultivated for food and medicinal purposes. Batun onion (*Allium fistulosum* L.) is one of the types of perennial onions cultivated since ancient times. According to N.I. Vavilov's classification, the centre of batun origin is S.-W. China. Currently, batun is grown in significant volumes in Japan, China, Korea, North Vietnam, Indonesia and the Russian Far East. The most

important feature of vegetable crops, in particular plants of the genus *Allium* L., is due to the high content of vitamins, and antioxidants, as well as the ability to remove heavy metals and radionuclides from the organism. The study of the biological characteristics of varieties that accumulate the minimum amount of pollutants will allow targeted screening of samples in the study of the world gene pool [1, 2, 3]. These studies describe the accumulation of radionuclides in leaves of the batun onion under the conditions of the Nonchernozem zone.

Keywords: batun onion, radionuclides, strontium-90, cesium-137, leaf

УДК 574:631.4:546.11.027*3:504.5 (574.41)

ТРИТИЕВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВЫ СИП

Тимонова Л.В., Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Сержанова З.Б.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК
071100 Абайская область, г. Курчатов, улица Бейбіт атом 2Б, Республика Казахстан
e-mail: Timonova@nnc.kz*

В работе представлены результаты исследований содержания и распределения ^3H в почвах Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Так как почва СИП может являться источником вторичного загрязнения ^3H объектов окружающей среды, исследования проводились на различных радиационно-загрязненных объектах полигона. Участками исследований являлись как места проведения наземных, так и подземных ядерных испытаний. В целом, по результатам исследований, проведенных на территории СИП, установлено, что содержание ^3H в почвах находится в значимых количествах и зависит от характерных физических особенностей проведения того или иного испытания.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), ядерные испытания, почва, ^3H

Первоначально при исследованиях радионуклидного загрязнения почвы СИП основной акцент был сделан на изучение ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{90}Sr . Содержание ^3H в почве не изучали.

Таким образом, целью данной работы является оценка тритиевого загрязнения почв СИП.

Большое количество ^3H установлено во многих объектах окружающей среды в местах проведения ядерных испытаний на СИП [1–8].

Для исследований содержания ^3H в почвах СИП выбраны площадки, на которых проводились испытания различного вида («Опытное поле», «Сары-Узень», «Балапан», «Дегелен», «Телькем»), а также территория «Атомного» озера.

На выбранных участках ^3H в почве исследовался в поверхностном слое (до 10 см).

Для определения содержания ^3H пробы почвы подготавливались методом автоклавного разложения [9]. Удельная активность ^3H определялась проведением бета-спектрометрического анализа на жидкосцинтилляционном спектрометре.

На площадке «Опытное поле» участками исследований являлись эпицентры взрывов и участки, расположенные по мере удаления от эпицентров. Максимальная удельная активность ^3H в почве 185 000 Бк/кг выявлена на технической площадке П-1 в эпицентре первого термоядерного взрыва. Характер распределения ^3H определялся в ходе исследований

по проложенным лучам по мере удаления от эпицентров взрывов. В результате выявлено, что с увеличением расстояния от предполагаемых эпицентров концентрация ^3H в почве значительно снижается.

Участками исследований на территории «Атомного» озера являлся гребень воронки и профиль, протяженностью 3 000 м, пролегающий в северо-западном направлении. Максимальная удельная активность ^3H в почве 240 000 Бк/кг зафиксирована на гребне воронки в месте максимального радионуклидного загрязнения поверхности. Исследование распределения ^3H по мере удаления от гребня воронки показало, что с увеличением расстояния содержание ^3H изначально возрастает, а затем снижается.

Исследование содержания ^3H в почве на площадке «Сары-Узень» проводилось в местах расположения скважин, которые внесли основной вклад в радионуклидное загрязнение площадки. Это скважины с нештатными радиационными ситуациями, имевшими место во время проведения испытаний ядерных устройств. Полученные результаты показали, что наибольшему тритиевому загрязнению подвержена скважина 101, где в 1966 г. проводилась отработка промышленных зарядов (для производства ядерных взрывов в мирных целях) – максимальная удельная активность ^3H в почве составила порядка 93 000 Бк/кг.

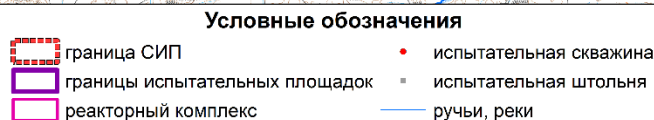
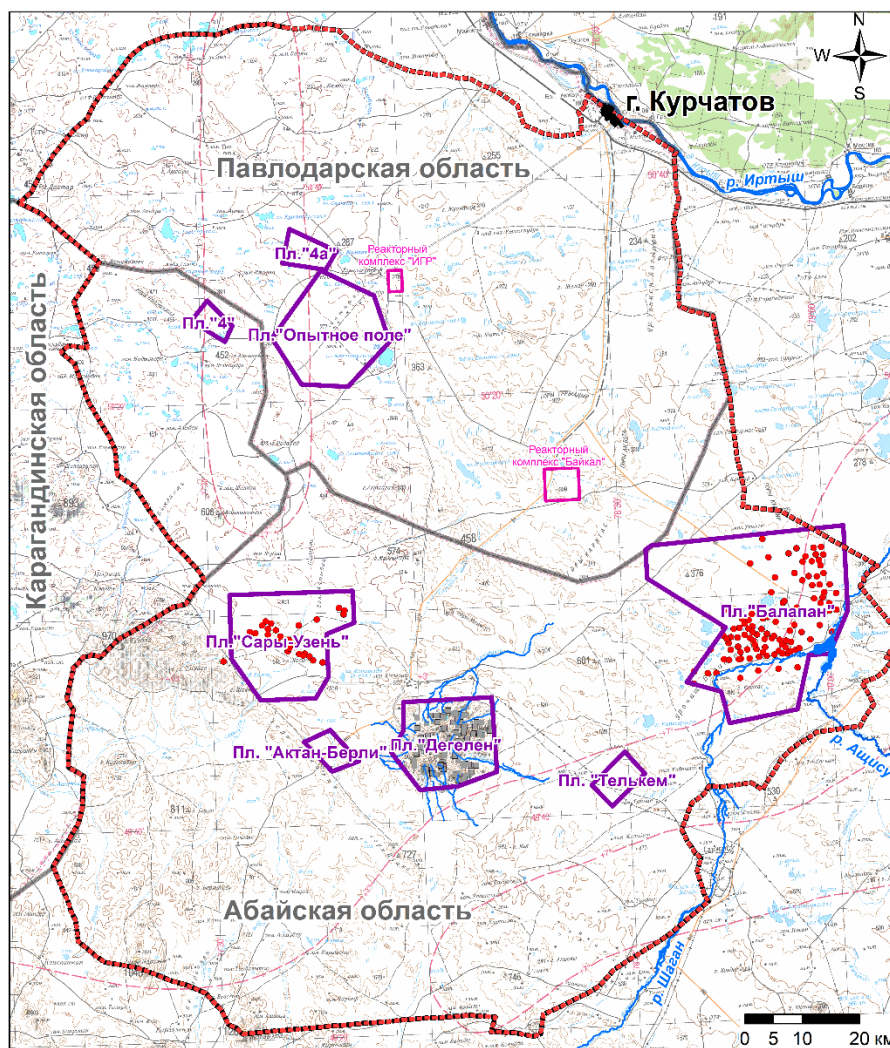


Рисунок 1. Карта СИП

На площадке «Балапан» исследования проводились в местах расположения 30-ти боевых скважин. Выявлено, что ^3H в почве присутствует не на всех исследуемых участках, а только в 11 случаях. Максимальная удельная активность зафиксирована в почве на скважинах 1010 и 1267 (до 20 000 Бк/кг).

Для исследования тритиевого загрязнения почвы на площадке «Дегелен» выбраны 3 участка с максимальным радионуклидным загрязнением, расположенные вблизи припортальных зон штолен 607, 176 и 172. В ходе исследований отмечено, что наибольшему тритиевому загрязнению подвержен участок припортальной зоны штольни 176, где содержание ^3H в почве составило 47 000 Бк/кг.

Для оценки загрязнения почвы ^3H на площадке «Телькем» отбор проб производился с вершины гребня воронок. Точки отбора проб выбраны по расположению сторон света. Анализ полученных результатов показал отсутствие содержания ^3H в почве, хотя

невысокие значения удельной активности ^3H отмечены в воде, присутствующей в воронках, которые составили от 30 до 60 Бк/кг [10].

Проведенные исследования позволили дать общую оценку тритиевого загрязнения почвы на исследуемых территориях. Установлено, что содержание ^3H в почвах на различных участках СИП связано с видами проведенных испытаний, а его распределение может зависеть от мощности взрыва зарядного устройства и других характерных особенностей проведенного испытания.

Список литературы

1. Ляхова О.Н. и др. Исследование содержания трития в объектах окружающей среды на территории испытательной площадки «Дегелен» // Вестник НЯЦ РК. 2007. №4. С. 80–86.

2. Lyakhova O.N. et al. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site / Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V., Tur Y.S. // Journal of Environmental Radioactivity. 2012, vol. 113, pp. 98–107.

3. Lyakhova O.N. et al. Tritium as an indicator of venues for nuclear tests // Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Mulgin S.I., Zhdanov S.V. // Journal of Environmental Radioactivity. 2013, vol. 124, pp. 13–21.

4. Есимбеков А.Ж. и др. Определение и локализация каналов поступления ^3H в воды реки Шаган / Есимбеков А.Ж., Айдарханов А.О., Актаев М.Р., Дроздов А.В. // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана, сборник трудов Национального ядерного центра РК, Казахстан – 2013. Выпуск 4, том II, С. 25–40.

5. Turchenko D.V. et al. Studying of tritium content in snowpack of Degelen mountain range // Journal of Environmental Radioactivity. 2014, vol. 132, pp. 115–120.

6. Актаев М.Р. и др. Характер загрязнения тритием вод р. Шаган в районе «Атомного» озера // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана,

сборник трудов Национального ядерного центра РК, Казахстан. 2017. Выпуск 6, том I, С. 202–207.

7. Ляхова О.Н. и др. Современные уровни активности искусственных радионуклидов в объектах водопользования, расположенных на территории Семипалатинского полигона (СИП). // Радиационная биология. Радиозология. 2017. Том 57. № 1. С. 77–85.

8. Larionova N.V. et al. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177. P. 218–224.

9. Сержанова З.Б. и др. Методические подходы для исследования связанных форм нахождения трития в почвах радиоактивно-загрязненных участков семипалатинского испытательного полигона // Вестник НЯЦ РК. 2020. №2. С.41–48.

10. Ляхова О.Н. и др. Оценка уровня концентрации газообразных соединений трития в местах проведения ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиационная биология. Радиозология. 2020. Том 60. № 6. С. 646–657.

TRITIUM POLLUTION OF THE SOIL OF THE STS

Timonova L.V., Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Aidarkhanov A.O., Serzhanova Z.B.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents the results of studies of the content and distribution of ^3H in the soils of the Semipalatinsk test site (STS). Since the STS soil can be a source of secondary ^3H contamination of environmental objects, the studies were carried out on various radiation-contaminated objects of the polygon. The research sites were both ground and underground nuclear testing sites. In general, according to the results of studies carried out on the territory of the STS, it was found that the content of ^3H in soils is in significant quantities and depends on the characteristic physical features of a particular test.

Keywords: Semipalatinsk test site (STS), nuclear tests, soil, ^3H

УДК 631.95

ОЦЕНКА РИСКА ПОЛУЧЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРЕВЫШЕНИЕМ СОДЕРЖАНИЯ ^{137}Cs ДЛЯ 5 ЮГО-ЗАПАДНЫХ РАЙОНОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Титов И.Е., Кречетников В.В., Кречетникова Е.О., Шубина О.А.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация
e-mail: viktor.krechetnikov@mail.ru

В ходе выполнения работ были произведены оценки риска получения сельскохозяйственной продукции, не соответствующей гигиеническим нормативам и ветеринарным требованиям, производимых на сельскохозяйственных территориях 153 коллективных хозяйств 5 наиболее радиоактивно загрязненных районов Брянской области. Для каждого хозяйства были оценены площади, на которых риски получения продукции растениеводства и кормопроизводства с превышением нормативов составляют менее 10 % и более 50 %.

Ключевые слова: *риск превышения норматива, сельскохозяйственные территории, радиоактивное загрязнение*

Ведение сельскохозяйственного производства в условиях широкомасштабного радиоактивного загрязнения и необходимость обоснования наиболее эффективных путей снижения содержания радионуклидов в агропродукции потребовало разработки новых подходов и методов оценки поставочной ситуации, а также оценки возможности производства продукции растениеводства и кормопроизводства на радиоактивно загрязненных ^{137}Cs сельскохозяйственных землях.

Критической экологической системой в радиоактивно загрязненных ландшафтах юго-западных районов Брянской области в настоящее время являются лугопастбищные и кормовые угодья на легких почвах, где наличие луговой дернины, в которой сосредоточена большая часть ^{137}Cs , обеспечивает интенсивное и длительное поступление радионуклидов в растения. Особенно высокий переход ^{137}Cs в растительность отмечен на торфяно-болотных почвах. Поэтому основную проблему в отдаленный период после аварии на ЧАЭС представляет производство чистых кормов и, соответственно, продукции животноводства.

В настоящее время на территории упомянутых выше 5 наиболее загрязненных районов функционирует 135 коллективных сельскохозяйственных предприятия различных форм собственности. Площадь их кормовых угодий составляет 98567 га, из них: пастбища составляют 49541 га, сенокосы занимают 37449 га.

Данные последнего тура радиологического обследования юго-западных районов Брянской области показали следующее. Средневзвешенная плотность загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ Гордеевского района снизилась с 1998 года в 1,3 раза, Злынковского района – в 1,6 раза, Красногорского района – в 1,4 раза, Клинцовского района – в 1,2 раза и Новозыбковского района – в 1,3 раза.

Несмотря на суммарное снижение уровней радиационного загрязнения, данные радиационного контроля показывают, что содержание ^{137}Cs в зеленой массе трав за последние три года в некоторых отдельных пробах способно многократно превышать нормативы Ветеринарных правил (ВП 13.5.13/06-01) до 27 раз (**2707 Бк/кг**), а в сене до 3,8 раза (**1502 Бк/кг**). Причем, доля кормов с превышением нормативов в 2017–2018 гг. варьирует от 4 до 16%.

В связи с этим необходимо оценивать и прогнозировать риски получения продукции растениеводства и кормопроизводства на радиоактивно

загрязненных территориях с содержанием цезия, превышающим нормативы.

Оценка рисков получения загрязненной продукции может выполняться непосредственно на основе экспериментальных данных, исходя из результатов обработки полученных проб. Однако такой способ позволяет лишь констатировать величину ущерба, уже возникшего на загрязненной территории и не позволяет получить прогноз развития радиологической ситуации для будущего реагирования. В связи с этим для прогнозирования рисков был применен математически обоснованный подход, основанный на статистических расчетах.

Статистической характеристикой загрязненности служит величина риска превышения норматива (РПН), которая равна относительной доли продукции представленной партии, загрязненность которой превышает заданный норматив Λ (Бк/кг). Контроль за величиной РПН позволяет адекватно и консервативно оценивать и поддерживать продовольственную безопасность продукции, производимую на загрязненных и реабилитируемых после радиационных аварий территориях.

Использованные модельные расчеты позволяют количественно оценить перенос радионуклидов между звеньями сельскохозяйственной цепочки “почва – растения” с учетом вариабельности миграционных параметров. Полученные данные и расчетные соотношения позволяют решить вопрос об использовании загрязненных почв для сельскохозяйственного производства исходя из величины риска превышения нормативов. При оценке и прогнозировании РПН для продукции растениеводства и кормопроизводства с применением статистических методов учитывался вероятностный характер коэффициентов накопления.

Коэффициенты накопления K_H имеют высокую вариабельность, которая удовлетворительно описывается логнормальным распределением, и, соответственно, K_H полагается случайной величиной. Значения статистик коэффициента накопления (μ_K, σ_K) для расчетов РПН брались из рекомендаций МАГАТЭ.

Выражение для расчета риска производства продукции растениеводства и кормопроизводства, то есть вероятность того, что загрязненность C_p некоторой партии превышает некоторую величину Λ имеет следующий вид:

$$R = \frac{1}{2} \{1 - \text{erf} [(\ln \left(\frac{\Lambda}{A_s \lambda_0} \right) - \mu_K) / (\sigma_K \sqrt{2})]\}.$$

где параметр L – величина норматива; $erf(x)$ – функция ошибок, иначе называемая функцией Лапласа; A_s – плотность загрязнения почвы, $\text{кБк}/\text{м}^2$; μ_k – натуральный логарифм среднего геометрического значения коэффициента накопления K_n ; σ_k – натуральный логарифм геометрического стандартного отклонения значения коэффициента накопления.

Выражение является аналитической формой статистического решения “прямой” задачи обеспечения безопасного использования продукции кормопроизводства, а именно – прогноза величины РПН на сельскохозяйственных угодьях с заданной функции распределения загрязнения. Риск превышения норматива численно равен доле продукции, загрязненность которой превышает предельно допустимый уровень, установленный законодательно.

РПН рассчитывался для следующих видов продукции растениеводства и кормопроизводства: зерно злаков, кукурузы, листовые овощи, фрукты, картофель/корнеплоды, а также сено и зеленая масса трав.

Расчеты показали, что в Гордеевском районе для зерна злаков риск превышения нормативов составляет менее 10 % на площади 21154 га, более 50 % на 5528 га. Для овощей риск превышения нормативов составляет менее 10 % на 30698 га, более 50 % на 45 га. Для картофеля РПН менее 10 % на 32265 га, более 50 % территорий нет. РПН для зеленой массы трав составляет менее 10 % на площади 28467 га, более 50 % на 15101 га.

В Злынковском районе для зерна злаков риск превышения нормативов составляет менее 10 % на

площади 17803 га, более 50 % на 4352 га. Для овощей риск превышения нормативов составляет менее 10 % на 22365 га, более 50 % на 1192 га. Для картофеля РПН менее 10 % на 23583 га, более 50 % на 215 га. РПН для зеленой массы трав составляет менее 10 % на площади 19259 га, более 50 % на 6762 га.

В Клинцовском районе для зерна злаков риск превышения нормативов составляет менее 10 % на площади 36080 га, более 50 % на 2808 га. Для овощей риск превышения нормативов составляет менее 10 % на 41169 га, более 50 % на 11 га. Для картофеля РПН менее 10 % на 41620 га, более 50 % территорий нет. РПН для зеленой массы трав составляет менее 10 % на площади 44144 га, более 50 % на 12645 га.

В Красногорском районе для зерна злаков риск превышения нормативов составляет менее 10 % на площади 30275 га, более 50 % на 6720 га. Для овощей риск превышения нормативов составляет менее 10 % на 35588 га, более 50 % на 1177 га. Для картофеля РПН менее 10 % на 38394 га, более 50 % территорий нет. РПН для зеленой массы трав составляет менее 10 % на площади 40418 га, более 50 % на 12380 га.

В Новозыбковском районе для зерна злаков риск превышения нормативов составляет менее 10 % на площади 20994 га, более 50 % на 11440 га. Для овощей риск превышения нормативов составляет менее 10 % на 33297 га, более 50 % на 1093 га. Для картофеля РПН менее 10 % на 38359 га, более 50 % территорий нет. РПН для зеленой массы трав составляет менее 10 % на площади 24437 га, более 50 % на 22637 га.

ASSESSMENT OF THE RISK OF OBTAINING AGRICULTURAL PRODUCTS WITH EXCEEDING THE CONTENT OF ^{137}Cs FOR 5 SOUTH-WESTERN REGIONS OF THE BRYANSK REGION

Titov I.E., Krechetnikov V.V., Krechetnikova E.O., Shubina O.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

In the course of the work, assessments were made of the risk of obtaining agricultural products that do not meet hygienic standards and veterinary requirements, produced on the agricultural territories of 153 collective farms in the 5 most radioactive contaminated districts of the Bryansk region. For each farm, the areas were estimated where the risks of obtaining crop and fodder products in excess of the standards are less than 10 % and more than 50 %.

Keywords: *risk of exceeding the standard, agricultural areas, radioactive contamination*

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНЕРГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛЕЙ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ФИЗИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Толкаева М.С.

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национального медицинского исследовательского центра радиологии» Минздрава России, 249036, Обнинск, РФ
E-mail: marya.tolkaeva@yandex.ru

Представлены новые экспериментальные результаты по синергизму одновременного применения тяжелых металлов в различных концентрациях и ионизирующей радиации (или гипертермии) на выживаемость диплоидных дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae*.

Ключевые слова: синергическое взаимодействие, тяжёлые металлы, концентрация препарата, гипертермия, ионизирующее излучение

Проблема загрязнения окружающей среды в настоящее время занимает главенствующее место во всех уголках нашей планеты. Об экологических проблемах начали говорить ещё в начале двадцать первого века, когда произошло значительное увеличение населения и развитие промышленности, внедрялись новые технологии во все сферы хозяйства. В настоящее время ухудшение экологической обстановки связано с активным использованием химических веществ в сельском хозяйстве и глобальными изменениями среды под действием антропогенной нагрузки [1].

Одними из самых хорошо известных загрязнителей окружающей среды являются тяжёлые металлы. Свою известность они получили из-за их токсичности, стойкости в окружающей среде и биоаккумуляционной природы. Главный источник тяжелых металлов – промышленность. Промышленные выбросы и сбросы сточных вод проникают в водоемы, атмосферу, почву, а из нее – в сельскохозяйственные культуры [2].

В реальной жизни негативное действие тяжелых металлов может происходить на фоне ионизирующих излучений или повышенных температур. Их взаимодействие может быть синергическим. Синергическое взаимодействие означает, что суммарный эффект действия двух агентов превышает независимую сумму действия каждого агента в отдельности. Этот эффект позволяет снизить дозы и концентрации физических и химических агентов при одновременном действии лучевой терапии и противоопухолевых препаратов, содержащих тяжёлые металлы. С другой стороны, для экологии синергический эффект приводит к более тяжёлым последствиям при многофакторных взаимодействиях.

Цель исследования – изучение закономерностей синергического взаимодействия солей тяжёлых металлов с ионизирующим излучением или гипертермией.

Объектом исследований являлись диплоидные дрожжевые клетки *Saccharomyces cerevisiae* (штамм XS800), которые в стационарной стадии роста подвергались одновременному воздействию растворов солей тяжёлых металлов с гипертермией или ионизирующим излучением, а также отдельному воздействию приведённых агентов.

В опытах использованы следующие соли тяжелых металлов различных концентраций: – PbI_2 , $K_2Cr_2O_7$.

Для оценки результатов использовали выживаемость клеток, регистрируемую по способности клеток образовывать видимые глазом макро колонии на твёрдой питательной среде. Количественно выживаемость оценивали отношением числа колоний, образованных клетками, подвергшимися действию применяемых агентов, к числу колоний, сформированных в контроле. Все экспериментальные серии повторяли 3–5 раз.

На рисунках 1, 2, 3 представлены экспериментальные данные, полученные в результате проведения опытов. На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента синергического усиления от концентрации растворов PbI_2 , $K_2Cr_2O_7$, при одновременном действии с ионизирующим излучением. Во всех случаях взаимодействия различных концентраций PbI_2 , $K_2Cr_2O_7$ наблюдается синергизм. Следует отметить, что зависимость коэффициента синергического усиления от концентрации применяемого раствора носит куполообразный характер. Синергизм увеличивается постепенно, достигая максимума при оптимальном соотношении агентов, а затем уменьшается.

Куполообразная зависимость также наблюдается при взаимодействии указанных солей тяжёлых металлов с гипертермией, что, в совокупности с данными ранее полученными другими авторами [3], говорит об универсальности проявления закономерностей синергического взаимодействия.

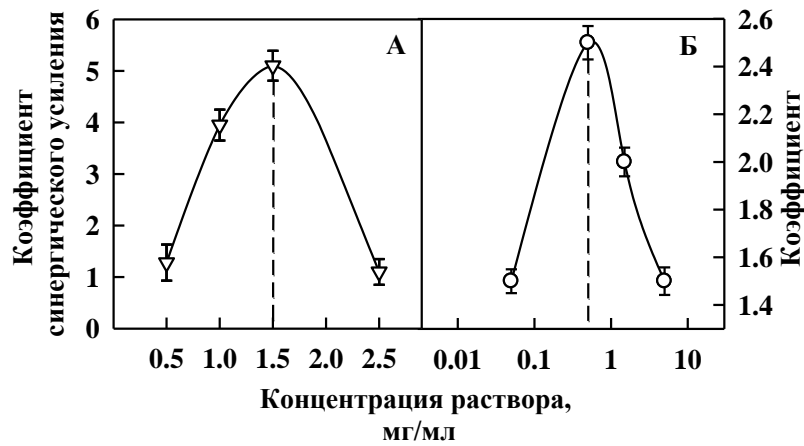


Рисунок 1. Зависимость коэффициента синергического усиления от концентрации растворов солей тяжёлых металлов PbI_2 (А) $K_2Cr_2O_7$ (Б) после их одновременного действия с ионизирующим излучением (^{60}Co , 10.8 Гр/мин) на выживаемость диплоидных дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* (штамм XS800)

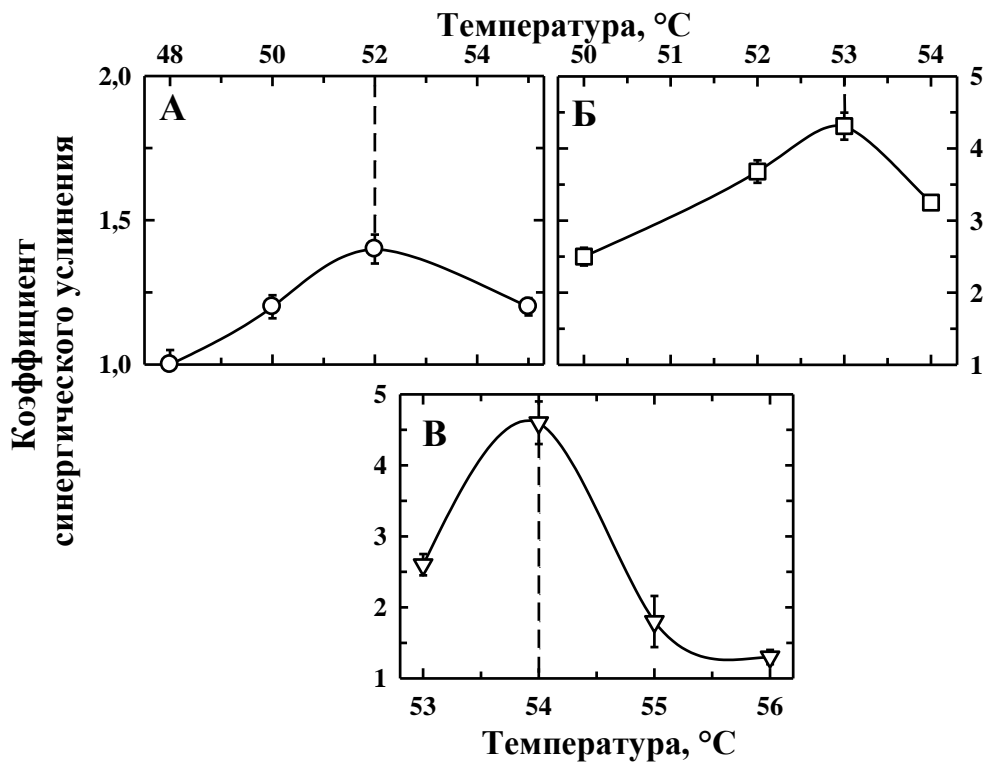


Рисунок 2. Зависимость коэффициента синергического усиления от температуры при её одновременном действии с PbI_2 (А – 1 мг/мл; Б – 2,5 мг/мл; В – 5 мг/мл) на выживаемость диплоидных дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* (штамм XS800)

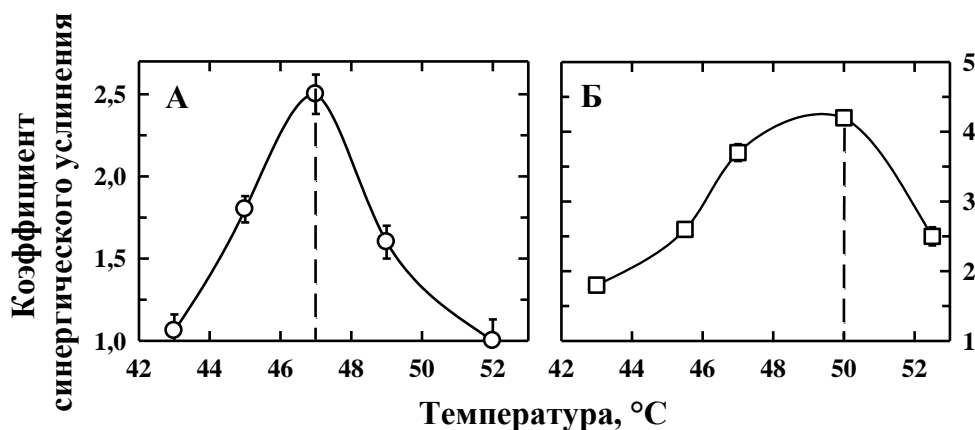


Рисунок 3. Зависимость коэффициента синергического усиления от температуры при её одновременном действии с $K_2Cr_2O_7$ (А – 0,5 мг/мл; Б – 5 мг/мл) на выживаемость диплоидных дрожжевых клеток *Saccharomyces cerevisiae* (штамм XS800)

Полученный результаты свидетельствует о существовании оптимального соотношения агентов, при котором наблюдается максимальный синергический эффект, любое отклонение от которого приводит к уменьшению синергического эффекта. Научные данные, полученные в ходе работы, имеют не только фундаментальное значение, но и найдут применение при использовании комбинированных воздействий в медицинской радиологии и санитарно-гигиеническом нормировании многофакторных воздействий в окружающей среде.

Список литературы

1. Ревель П. Среда нашего обитания. Книга 4. Здоровье и среда, в которой мы живем. Москва: Мир, 1995. 192 с.
2. Алексахин Р.М. Сельскохозяйственная радиэкология. /Р.М. Алексахин, А.В. Васильев, В.А. Дикарев и др. М.: Экология, 1991. 400 с.
3. Петин В.Г., Жураковская Г.П., Комарова Л.Н. Радиобиологические основы синергических взаимодействий в биосфере. М.: ГЕОС, 2012. 219 с.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF SYNERGIC INTERACTION OF HEAVY METAL SALT AND PHYSICAL AGENTS

Tolkaeva M.S.

A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the Federal State Budget Institution «National Medical Research Center of Radiology» of the Health Ministry of the Russian Federation, Obninsk, Russian Federation

New experimental results on the synergism of the simultaneous use of heavy metals at various concentrations and ionizing radiation (or hyperthermia) on the survival of diploid yeast cells of *Saccharomyces cerevisiae* are presented.

Keywords: synergistic interaction, heavy metals, drug concentration, hyperthermia, ionizing radiation

The problem of environmental pollution currently occupies a dominant place in all corners of our planet. [1]. One of the most well-known environmental pollutants are heavy metals. They are known for their toxicity, persistence in the environment, and bioaccumulative nature. The main source of heavy metals is industry. Industrial emissions and wastewater discharges penetrate into water bodies, the atmosphere, soil, and from it into agricultural crops [2].

In real life, the negative effect of heavy metals can occur against the background of ionizing radiation or

elevated temperatures. Their interaction can be synergistic. Synergistic interaction means that the total effect of the action of two agents exceeds the independent sum of the action of each agent separately.

The purpose of the study is to study the patterns of synergistic interaction of salts of heavy metals with ionizing radiation or hyperthermia.

The object of research was diploid yeast cells of *Saccharomyces cerevisiae* (strain XS800), which, at the stationary stage of growth, were simultaneously exposed to solutions of salts of heavy metals with

hyperthermia or ionizing radiation, as well as to the separate effects of the above agents. The following salts of heavy metals of various concentrations were used in the experiments: – PbI_2 , $K_2Cr_2O_7$.

To evaluate the results, cell survival was used, which was recorded by the ability of cells to form macro colonies visible to the eye on a solid nutrient medium. Survival was quantified by the ratio of the number of colonies formed by cells exposed to the applied agents to the number of colonies formed in the control. All experimental series were repeated 3–5 times.

According to the data obtained for the interaction of PbI_2 , $K_2Cr_2O_7$ solutions with hyperthermia or ionizing radiation, the dependence of the synergistic

amplification factor on the concentration of the applied solution or temperature is dome-shaped. Synergism increases gradually, reaching a maximum at the optimal ratio of agents, and then decreases.

The obtained results indicate the existence of an optimal ratio of agents, at which the maximum synergistic effect is observed, any deviation from which leads to a decrease in the synergistic effect. The scientific data obtained during the work are not only of fundamental importance, but will also find application in the use of combined effects in medical radiology and in the sanitary and hygienic regulation of multifactorial effects in the environment.

УДК 631.438.2

ИЗУЧЕНИЕ МИГРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ» В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ НИФХИ ИМ. Л.Я. КАРПОВА

Шаврина К.Е.¹, Лаврентьева Г.В.^{1,2}, Удалова А.А.¹, Шпилько М.А.¹, Мельникова Т.В.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» 249040 Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д.1, Российская Федерация

e-mail: shavrinake@oiate.ru

² КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Российская Федерация

В работе представлены результаты влияния физико-химических характеристик почв на миграцию K-40, Th-232, Ra-226 и Cs-137 в системе «почва – растительность» в зоне влияния АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Установлено влияние полной влагоемкости почвы, актуальной и обменной кислотности и массовой доли органического вещества на миграцию радионуклидов в системе «почва – растительность». При этом для Ra-226 установлено влияние массовой доли органического вещества, для Th-232 – актуальной и обменной кислотности, для K-40 – гигроскопической влажности. На накопление Cs-137 растениями оказывают влияние массовая доля органического вещества и емкость катионного обмена почвы. Также наблюдается достоверное изменение коэффициента накопления от емкости катионного обмена и концентрации водорастворимого калия.

Ключевые слова: радиационно-опасный объект, почва, растение, гамма-спектрометрия, миграция, естественные радионуклиды, Cs-137

В настоящее время собрано достаточно информации в области миграции радионуклидов в природных средах, в том числе и наземных. Однако даже это не может в полной мере охарактеризовать и объяснить общие закономерности перехода радионуклидов в растения. Особенности исследования заключаются в огромном разнообразии условий, которые, естественно, создают неповторимость почти всех исследований. Более половины, выполненных в этом направлении работ рассматривают взаимосвязи между отдельным параметром системы и не учитывают важность других. Также особую значимость приобретают исследования в естественных условиях, когда нет возможности смоделировать физико-химические условия среды и необходимо учесть все разнообразие факторов влияния на миграционные

особенности радионуклидов. При этом известно, что общие колебания удельного радиоактивного загрязнения растений можно объяснить различным состоянием физических, химических и биологических свойств почвы. Например, эти изменения могут быть вызваны физиологией поглощения питательных веществ растением под влиянием внешних и внутренних факторов [1, 5].

Целью данного исследования является изучение влияния физико-химических характеристик почв на миграцию радионуклидов K-40, Th-232, Ra-226 и Cs-137 в системе «почва – растительность» в зоне влияния АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» за летний период 2021 года.

Объекты и методы исследования

Отбор проб почвы и растительности проводился летом 2021 г. в зоне влияния НИФХИ им. Л.Я. Карпова. 6 почвенных образцов отбирались из пахотного слоя (0–20 см) методом конверта площадью 100 м², в тех же местах отбиралась растительность. Все участки отбора проб находились в санитарно-защитной зоне НИФХИ им. Л.Я. Карпова в лесу.

Образцы растительности измельчали, высушивали при комнатной температуре. Затем измельчали образцы, доведенные до воздушно-сухого состояния, с помощью шлифовальной машинки.

Гигроскопическую влажность и влагоёмкость определяли гравиметрическим методом, рН водной и солевой вытяжек и содержание водорастворимого калия – потенциометрическим методом, ёмкость катионного обмена – титриметрическим методом, массовую долю органического вещества – спектрофотометрическим методом.

Удельная активность радионуклидов K-40, Ra-226, Th-232, Cs-137 в почве и в растительности измерялась на сцинтилляционном спектрометре гамма-излучения с программным обеспечением «Прогресс».

Коэффициенты накопления (КН) радионуклидов из почвы в растения рассчитывались по формуле

$$КН = \frac{a_p}{a_{\pi}}, \quad (1)$$

где a_p – удельная активность радионуклида в растении (Бк/кг); a_{π} – удельная активность радионуклида в почве (Бк/кг).

В тексте, рисунках и таблицах для удельной активности радионуклидов по умолчанию представлены значения измерения и неопределенность, для остальных параметров представлены средние значения и стандартные ошибки среднего. Экспериментальные данные были обработаны с помощью программного пакета Microsoft Excel.

Результаты исследований

Значения коэффициентов накопления радионуклида варьируют в диапазоне для K-40 – от $0,82 \pm 0,39$ до $2,00 \pm 0,78$; для Ra-226 – от $0,29 \pm 0,65$ до $3,83 \pm 1,64$; для Th-232 – от $0,01 \pm 0,5$ до $0,70 \pm 0,89$; для Cs-137 – от $0,31 \pm 0,92$ до $1,76 \pm 1,70$ (рис. 1).

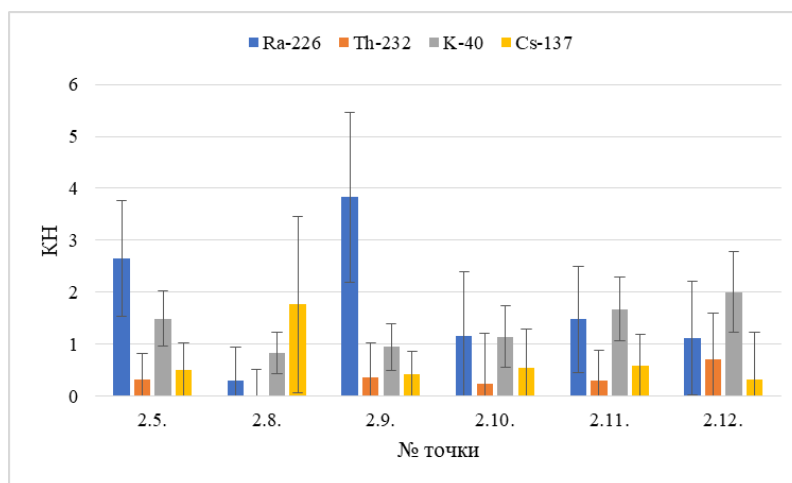


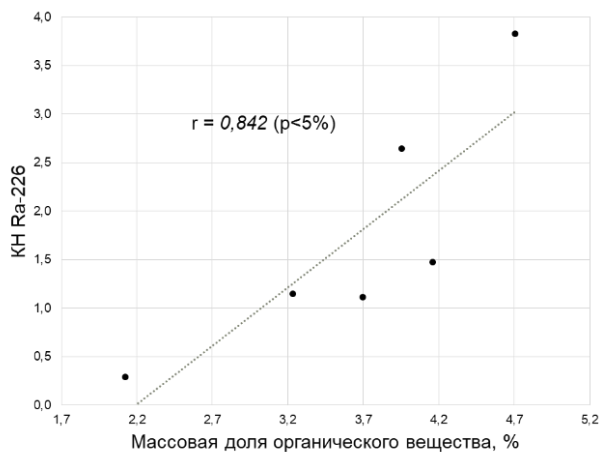
Рисунок 1. Коэффициенты накопления радионуклидов в растительности

Корреляционный анализ показал положительную взаимосвязь КН Ra-226 с относительной массовой долей органического вещества (рис. 2а). Накопление радионуклида между минимальным и максимальным значениями органического вещества (от 2,12 до 4,71%) увеличивается в 13 раз. На миграционное поведение Th-232 в системе «почва – растение» влияет показатель рН водной и солевой вытяжек: при увеличении показателя рН от 4,14 до 5,72 увеличивается КН радионуклида растениями в 2 раза (рис. 2б).

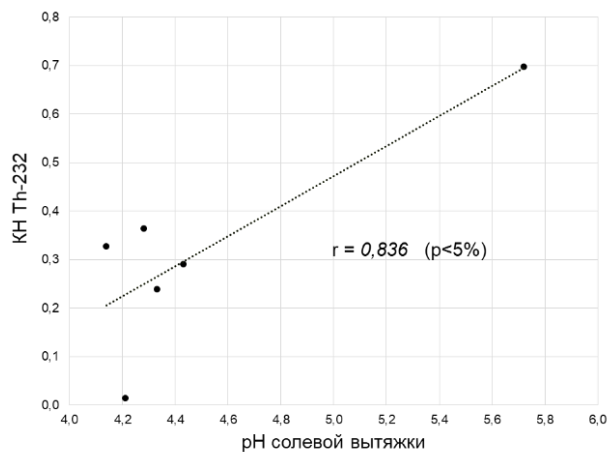
Оцененные значения коэффициентов корреляции K-40 показали, что значимыми являются корреляции для показателей гигроскопической влажности и содержания калия водорастворимого (рис. 3.).

Следует отметить, что накопление K-40 в сельскохозяйственных растениях для одного вида изменяется от 5 до 7 раз [2]. Уменьшение гигроскопической влажности на 0,57% ведет к снижению накопления радионуклида в 2 раза; увеличение содержания водорастворимого калия в 3,7 раз увеличивает содержание K-40 в растениях в 2,2 раза.

Корреляционный анализ показал отрицательную взаимосвязь между массовой долей органического вещества и ёмкостью катионного обмена почвы и КН Cs-137 в растительность (рис. 4).

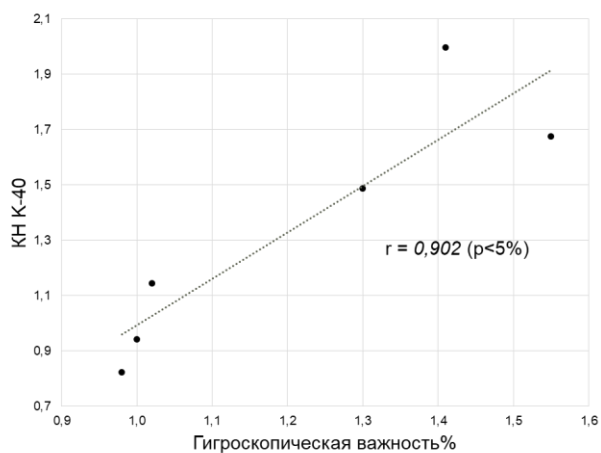


а)

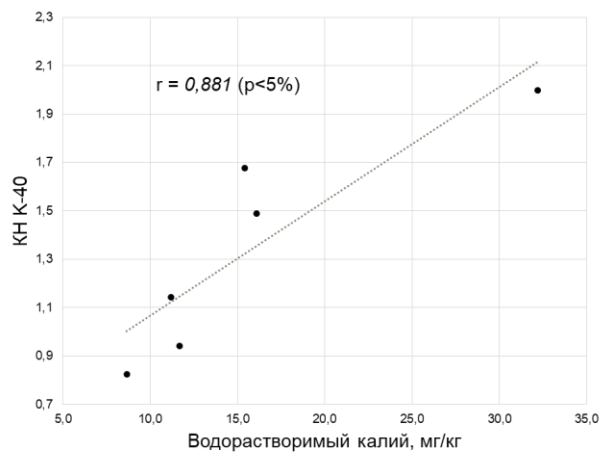


б)

Рисунок 2. Зависимость а) коэффициентов накопления Ra-226 от массовой доли органического вещества б) коэффициентов накопления Th-232 от рН солевой вытяжки

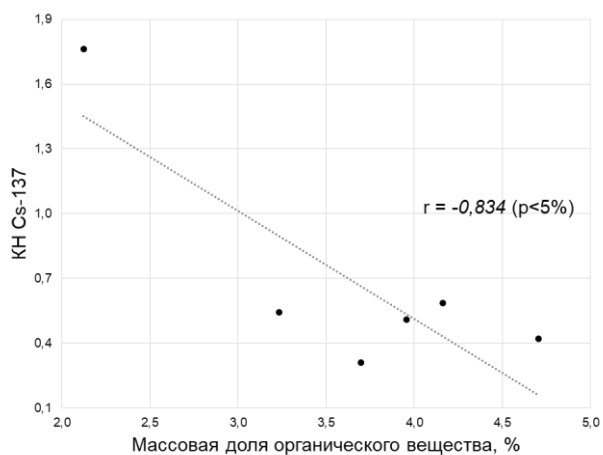


а)

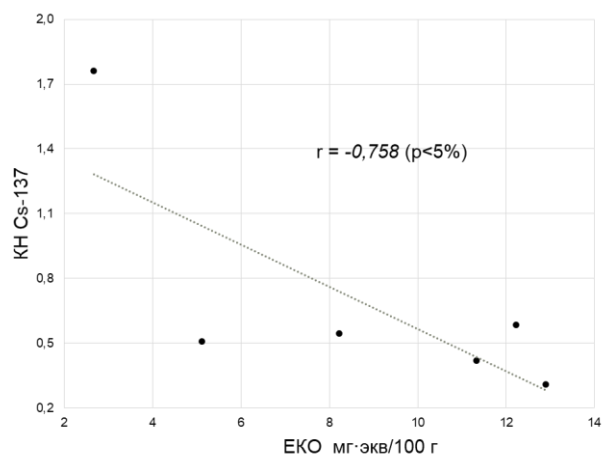


б)

Рисунок 3. Зависимость коэффициентов накопления К-40 а) от гигроскопической влажности б) от содержания водорастворимого калия



а)



б)

Рисунок 4. Графики зависимости коэффициентов накопления Cs-137 а) от массовой доли органического вещества б) от емкости катионного обмена

Увеличение органического вещества в почве от 2,12 до 4,71 приводит к уменьшению КН растениями радионуклида в 4 раза, а увеличение емкости катионного обмена от 2,67 до 12,89 – в 5,7 раза.

Учитывая литературные данные, повышение доли органического вещества в почвах снижает корневое поступление радионуклидов в растения. Наименьший переход радионуклидов в растения наблюдается в регионах, где преобладают чернозёмные почвы, наибольший – в регионах с торфяно-болотистыми почвами. Высокие коэффициенты перехода радионуклидов характерны также для песчаных почв [3]. По данным [4] подвижность и биологическая доступность Cs-137 снижается при увеличении содержания в почве обменных катионов.

Выводы

Полученные результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1 – на накопление K-40 в системе «почва – растение» оказывают влияние гигроскопическая влага и содержание водорастворимого калия;

2 – миграционные показатели Ra-226 в системе «почва-растения» изменяются в зависимости от показателя относительно массовой доли органического вещества;

3 – на миграционное поведение Th-232 в системе «почва – растение» оказывает влияние показатель pH;

4 – на накопление Cs-137 в системе «почва – растение» оказывают влияние массовая доля органического вещества, емкость катионного обмена.

Список литературы

1. *Богачев А.В.* миграция Cs-137 и калия в системе «почва–растение». факты, закономерности, гипотезы. учебное пособие. – Москва. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 1997. 35 с.

2. *Моисеев А.А., Иванов В.С.* Справочник по дозиметрии и радиоло-гии. 2 е из. М.: Атомиздат, 1974. 334 с.

3. *Бекман И.Н.* Радиоэкология и экологическая радиохимия: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2019. 497 с.

4. *Макаревич Т.А.* Радиоэкология: пособие. Минск: БГУ, 2013. 136 с.

5. *Бетенеков Н.Д.* Радиоэкологический мониторинг: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. унта, 2014. 208 с.

6. *Агрохимические методы исследования почв / Почвенный институт им. В.В. Докучаева. М. «Наука» 1975. 656 с.*

STUDY OF MIGRATION INDICATORS OF GAMMA-EMITTING RADIONUCLIDES IN THE "SOIL-PLANT" SYSTEM IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE L. Y. KARPOV NIFHI

Shavrina K.E.¹, Lavrentyeva G.V.^{1,2}, Oudalova A.A.¹, Shpilko M.A.¹, Melnikova T.V.¹

¹ OINPE NRNU MEPhI, Obninsk, Russian Federation

² BMSTU (KB), Kaluga, Russia

The paper presents the results of the influence of the physicochemical characteristics of soils on the migration of K-40, Th-232, Ra-226 and Cs-137 in the "soil-plant" system in the zone of influence of Karpov Institute of Physical Chemistry. The effect of total soil moisture capacity, actual and exchangeable acidity and mass fraction of organic matter on the migration of radionuclides in the "soil-plant" system has been established. At the same time, for Ra-226 the influence of the mass fraction of organic matter was established, for Th-232 - actual and exchangeable acidity, for K-40 - hygroscopic humidity. The accumulation of Cs-137 by plants is affected by the mass fraction of organic matter and the cation exchange capacity of the soil. There is also a significant change in the accumulation coefficient from the cation exchange capacity and the concentration of water-soluble potassium.

АНАЛИЗ ТРАНСКРИПЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГЕНОВ В ПОПУЛЯЦИЯХ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ (*ACHILLEA MILLEFOLIUM* L. И *CHELIDONIUM MAJUS* L.), ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ

Шестерикова Е.М., Бондаренко В.С., Битаршвили С.В., Празян А.А., Волкова П.Ю.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация EShesterikova89@gmail.com

Проведен анализ транскрипционной активности гомологов кандидатных генов радиоустойчивости для двух многолетних видов травянистых растений: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*) и чистотел большой (*Chelidonium majus*), произрастающих в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: экспрессия генов, АФК, АБК-сигналинг, гистоны, белки теплового шока, хроническое облучение, ПЦР в реальном времени

Популяции травянистых растений, произрастающие на радиоактивно загрязненных территориях зоны отчуждения Чернобыльской АЭС, являются перспективными экспериментальными объектами для изучения сочетанного действия техногенного загрязнения и климатических изменений, а также для установления молекулярных и биохимических процессов, связанных с адаптацией к данным воздействиям. Анализ транскрипционной активности генов для выявления кандидатных молекул устойчивости к хроническому облучению и климатическим воздействиям у дикорастущих популяций *Achillea millefolium* и *Chelidonium majus* Чернобыльской зоны отчуждения вносит вклад в изучение особенностей молекулярных путей ответа на длительный стресс.

В данной работе проведена сравнительная оценка транскрипционного ответа некоторых генов немодельных видов растений *Achillea millefolium* и *Chelidonium majus*, которые могут быть вовлечены в процессы адаптации растений к хроническому радиационному воздействию в Чернобыльской зоне отчуждения.

Отбор проб ткани листьев проводили на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГЭРЗ) Гомельской области Республики Беларусь на пяти участках с разным уровнем радиоактивного загрязнения. В качестве контрольных использовались участки Ломыш (Л) – 0,29 мкЗв/ч и Бабчин (Б) – 0,29 мкЗв/ч, где уровни радиоактивного воздействия были близки к фоновым; участки Кулажин (К) – 5,65-6,84 мкЗв/ч, Масаны (М) – 3 мкЗв/ч и Радин (Р) – 3,36 мкЗв/ч были радиоактивно загрязнены. Для каждого вида растений один образец состоял из ткани 5-10 растений весом примерно 0,5 г. Сразу после отбора образцы немедленно замораживали в жидком азоте до анализа. Всего со всех экспериментальных площадок были отобраны для анализа дифференциальной

экспрессии генов 38 образцов. Отбор проводили таким образом, чтобы обеспечить сохранность природной популяции и в то же время получить достаточное количество материала для лабораторных опытов. Все биологические образцы были отобраны в июне 2021 года.

Основываясь на известных закономерностях действия ионизирующего излучения и ранее полученных результатах, был составлен список кандидатных генов, продукты которых непосредственно связаны с работой ферментных и неферментных компонентов антиоксидантной системы, с трансдукцией сигналов, с процессами фотосинтеза и транспорта пероксида водорода, а также синтезом гистонов и шаперонов. Также для каждого вида растения в литературных источниках были подобраны несколько референтных генов.

Для разработки праймеров для гомологов кандидатных генов двух немодельных видов растений использовали следующие программы и информационные ресурсы: информационный портал для модельного растения *Arabidopsis thaliana* – ARAPORT.ORG; программа BLAST NCBI, программа для множественного выравнивания нуклеотидных последовательностей Clustal Omega 1.2.2 и программа для создания праймеров Primer BLAST.

Тестирование полученных праймеров проводили с использованием ДНК и кДНК экспериментальных растений. ДНК выделяли с использованием набора для колоночного выделения «DNeasy Plant Kit» (Qiagen). Для анализа экспрессии гомологов кандидатных генов выделяли тотальную РНК методом фенол-хлороформной экстракции с реагентом ExtractRNA (Евроген). Оценку концентраций и качества ДНК и РНК измеряли на спектрофотометре «NanoDrop ONE» (Thermo Scientific). После экстракции проводили обработку 1 мкг тотальной РНК ферментом ДНКазой I и далее использовали набор

«MMLV RT kit» (Евроген) для синтеза первой цепи кДНК. Полученную кДНК разводили в безнуклеазной воде в соотношении 1:10 и использовали как матрицу для реакции ПЦР в реальном времени. Для каждого вида растений на каждом экспериментальном участке анализировали 3-4 биологические повторности. Для каждого образца использовали две технические повторности и отрицательный контроль. Количественное изменение уровней экспрессии генов оценивали относительно контрольных образцов методом прямого сравнения графиков накопления

кДНК (Ср). Для расчетов изменения экспрессии генов (RQ) опирались на модель $\Delta\Delta C_r$ [1]. Значимым изменением экспрессии гена считали увеличение или уменьшение экспрессии в два раза по сравнению с контрольными показателями.

Результаты оценки дифференциальной экспрессии гомологов генов на радиоактивно загрязненных участках для двух популяций дикорастущих травянистых растений *A. millefolium* и *C. majus*, представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Усредненные значения экспрессии гомологов генов *A. millefolium* и *C. majus*

Гомолог гена	<i>A. millefolium</i>						<i>C. majus</i>					
	FC (Кулажин)		FC (Масаны)		FC (Радин)		FC (Кулажин)		FC (Масаны)		FC (Радин)	
	Б	Л	Б	Л	Б	Л	Б	Л	Б	Л	Б	Л
<i>PIP1</i>	2.40	1.80	11.68	8.78	3.23	2.43	1,12	1,32	1,06	1,25	1,41	1,19
<i>CAB1</i>	1.03	-1.22	2.18	1.74	1.09	-1.15	1,08	1,55	-1,44	1,00	-1,33	1,08
<i>APX1</i>	4.23	2.99	12.10	8.56	3.58	2.53	-2,07	-1,42	-1,22	1,19	-2,03	-1,39
<i>SnRK 2.4</i>	2.87	1.44	8.88	4.45	2.71	1.36	-2,05	-2,36	-2,15	-2,48	-1,43	-1,65
<i>RBOH-f</i>	13.53	5.56	3.31	1.36	3.09	1.27	-	-	-	-	-	-
<i>CPN60A</i>	4.55	-1.35	14.06	2.29	14.56	2.37	-1,45	-1,60	1,63	1,48	1,99	1,80
<i>H2A</i>	1.84	1.44	10.20	7.89	2.00	1.56	-3,01	-11,30	-2,65	-9,97	-2,34	-8,78

Результаты оценки дифференциальной экспрессии гомологов генов *A. millefolium* на радиоактивно загрязненных участках, показывают активную работу гомолога гена, кодирующего аквапорин PIP1. Для аквапоринов данного типа, помимо регуляции водного баланса, выявлено участие в трансмембранной диффузии пероксида водорода в клетке [2]. Таким образом, повышение экспрессии данного гена на трех радиоактивно загрязненных участках относительно двух контролей может свидетельствовать о том, что растение испытывает окислительный стресс. Данное соображение подкреплено увеличением экспрессии гомолога гена *APX1*, который кодирует один из основных антиоксидантных ферментов аскорбатпероксидазы APX, элиминирующую пероксид водорода.

В популяции *A. millefolium* наблюдается тенденция к увеличению экспрессии гомологов генов *SnRK 2.4* и *RBOH-f*, играющих важную роль в процессах АБК-сигналинга. В частности, ферменты группы RBOH, локализующиеся на плазматической мембране клеток, участвуют в продуцировании внеклеточного супероксида путем переноса электронов от НАДФН или ФАДН₂ к O₂ [3]. Затем супероксид спонтанно или при действии супероксидсмутазы преобразуется в пероксид водорода, который попадает в растительные клетки с помощью аквапоринов в плазматической мембране [3], где далее происходит восстановление пероксида водорода. Таким образом, в

хронически облучаемых популяциях *A. millefolium* наблюдается увеличение активности антиоксидантной системы.

Ранее была отмечена важная роль синтеза гистонов и шаперонов в адаптации растений разных видов к хроническому облучению [4, 5]. Экспрессия гомолога гена, кодирующего белок теплового шока CPN60A, значимо увеличена на двух радиоактивно загрязненных участках Масаны и Радин относительно двух контролей, что может указывать на АБК-индуцированный ответ на стресс. В популяции *A. millefolium* наблюдается тенденция к увеличению экспрессии гомолога гена, кодирующего гистон H2A. Ранее в работах [4, 5] предполагалось, что увеличение экспрессии генов, кодирующих гистоны, может быть связано с радиопротекторной ролью этих белков в условиях хронического радиационного воздействия.

Анализ транскрипционной активности гомологов генов *C. majus* на радиоактивно загрязненных участках не выявил значимых изменений в экспрессии генов, связанных с поддержанием водного гомеостаза (*PIP1*) и с увеличением интенсивности фотосинтеза (*CAB1*). По результатам анализа дифференциальной экспрессии гомолога гена *APX1* наблюдается снижение его транскрипционной активности. Недавние исследования показали, что уровень аскорбата в клетке регулируется протеинкиназой SnRK 2.4 [6].

Экспрессия гомолога гена, кодирующего данную протеинкиназу, значимо снижена на двух радиоактивно загрязненных участках (Кулажин и Масаны), что может указывать на снижение пула аскорбата в хронически облучаемых популяциях *C. majus*. При этом экспрессия гомолога гена, кодирующего гистон H2A, значимо снижена на трех радиоактивно загрязненных участках относительно двух контрольных.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что для двух разных видов дикорастущих травянистых растений *A. millefolium* и *C. majus* характерен разный транскрипционный ответ гомологов одних и тех же генов на хроническое радиационное воздействие. Одной из рабочих гипотез, объясняющих подобный эффект, является разная плоидность изучаемых растений.

Работа была выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 20-74-10004).

Список литературы

1. Pfaffl, M. W. A new mathematical model for relative quantification in real-time RT-PCR // *Nucleic Acids*

Research. 2001. V. 29(9). e45. doi: 10.1093/nar/29.9.e45

2. Gautam, A., Pandey, A. K. Aquaporins Responses under Challenging Environmental Conditions and Abiotic Stress Tolerance in Plants// *The Botanical Review*. 2021. doi:10.1007/s12229-021-09249-z.

3. Postiglione, A.E., Muday, G.K. The Role of ROS Homeostasis in ABA-Induced Guard Cell Signaling// *Frontiers in Plant Science*. 2020. V.11.

4. Duarte, G.T., Volkova, P.Y., Geras'kin, S.A. The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone// *Environmental Pollution*. 2019. V. 250: P. 618-626.

5. Volkova, P.Y. et al. Radiosensitivity of herbaceous plants to chronic radiation exposure: field study in the Chernobyl exclusion zone// *Sci Total Environ*. 2021. V777. P. 146206.

6. Szymańska KP, Polkowska-Kowalczyk L, Lichocka M. et al. SNF1-related protein kinases SnRK2.4 and SnRK2.10 modulate ROS homeostasis in plant response to salt stress// *International Journal of Molecular Sciences*. 2019. V. 20(1): P. 143.

THE TRANSCRIPTIONAL ACTIVITY OF GENES IN POPULATIONS OF PERENNIAL HERBACIOUS PLANTS (*ACHILLEA MILLEFOLIUM* L. AND *CHELIDONIUM MAJUS* L.) FROM THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

Shesterikova E.M., Bondarenko V.S., Bitarishvili S.V., Prazyan A.A., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The analysis of transcriptional activity of the candidate genes in two perennial species of herbaceous plants *Achillea millefolium* and *Chelidonium majus* was carried out in populations growing in the Chernobyl Exclusion Zone.

Keywords: *gene expression, ROS, ABA signalling, histones, heat shock proteins, chronic radiation, RT-PCR in real time*

УДК 504.4.054

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ВБЛИЗИ АО НИФХИ ИМ. Л.Я.КАРПОВА (2021–2022 ГГ.)

Шпилько М.А.¹, Мельникова Т.В.¹, Шаврина К.Е.¹, Удалова А.А.¹, Лаврентьева Г.В.^{1,2}

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, кв-л Студенческий городок, 1, Российская Федерация

² Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, ул. Баженова, 2, Российская Федерация

e-mail: shpilkoma@oiate.ru

В работе были определены рН, минерализация, массовые концентрации тяжелых металлов и объемные активности (ОА) радионуклидов в воде, отобранной 2021–2022 гг. Проведен корреляционный анализ для изучаемых параметров.

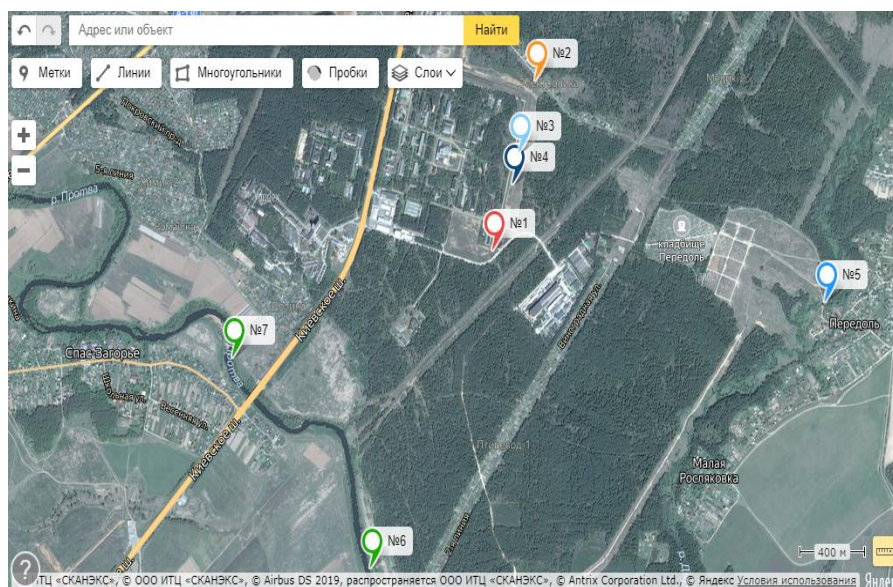
Ключевые слова: загрязнение, загрязняющие вещества, инверсионная вольтамперометрия, корреляция, медь, минерализация, радионуклиды, свинец, тяжелые металлы, физико-химические показатели, фоновое значение

Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова является ядерно- и радиационно-опасным объектом, поскольку на его территории находятся исследовательский атомный реактор типа ВВР-ц, ускорители электронов, кобальтовые установки [1].

В результате деятельности данного предприятия водные объекты, расположенные вблизи него, могут подвергаться загрязнению. Основными загрязнителями указанных объектов являются радионуклиды (РН) и тяжелые металлы (ТМ), которые оказывают негативное воздействие не только на окружающую среду, но и на здоровье человека.

Целью данной работы является исследование химического и радиоактивного загрязнения водных объектов вблизи АО «НИФХИ им. Л.Я.Карпова» (2021-2022гг).

Объект исследования – вода, отобранная из водоемов, расположенных вблизи АО «НИФХИ им. Л.Я.Карпова». Пробоотбор воды был проведен в период 2021-2022 гг. Летом 2021 года было отобрано 6 проб, осенью 2021 года – 12, весной 2022 года – 14 проб. Карта пробоотбора представлена на рисунке 1.



Источник: собственная разработка

Рисунок 1. Обзорная карта с точками пробоотбора воды вблизи НИФХИ им. Л.Я.Карпова

Исследовались пробы из 7 водных объектов. Водоем №1 состоит из двух водоемов: один непосредственно соединен с промлощадкой НИФХИ через трубу (точки 1.1-1.1/5), второй расположен через дорогу (точки 1.1/6-1.1/13). Водоемы соединены между собой трубой, проходящей под дорогой.

Водоемы 2-4 – водные объекты искусственного происхождения. Точка 5 – р.Дырочная, точка 6 – р.Протва после очистных сооружений НИФХИ, точка 7 – р.Протва до очистных сооружений.

ОА радионуклидов (Ra-226, K-40, Th-232, Cs-137) измерялись на гамма-спектрометре с программным обеспечением «Прогресс-гамма», массовые концентрации свинца и меди на вольтамперометрическом анализаторе типа Та-Lab, рН и минерализация на

кондуктометре/потенциометре Анион-4100. Обработка полученных данных, а также изучение корреляционных зависимостей проводились в программе Excel.

Значения измеренного водородного показателя за 2021-2022 гг. лежат в пределах 6,9-8,7 и соответствуют фоновому значению показателя для водного объекта рыбохозяйственного значения [2]. Исключение составляет водоем №1, в котором наблюдается превышение данного показателя ($pH > 8,5$), что может служить подтверждением техногенного воздействия НИФХИ на водные объекты [2;3]. Минерализация в отобранных пробах составляет 27,7–552,8 мг/л, следовательно, воды относятся к пресным и ультрапресным.

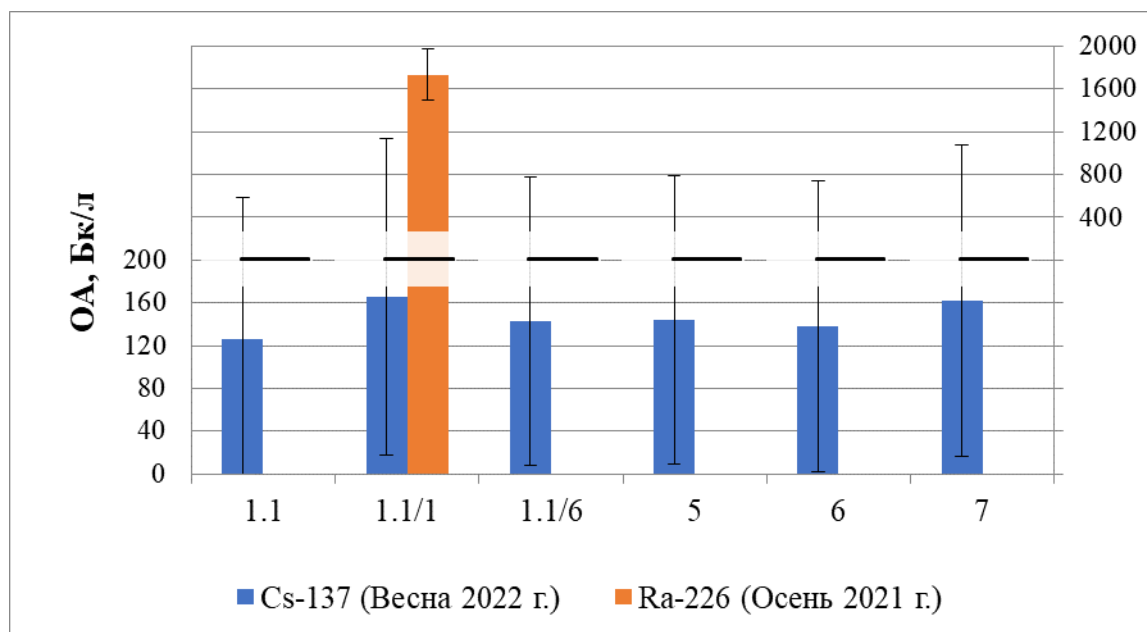
Массовые концентрации меди и свинца за 2021-2022 гг. изменяются в диапазоне 1,0-29,0 мкг/л, 0,28-16,00 мкг/л соответственно.

Осенью 2021 года в точке 4 (рисунок 1) концентрация свинца 1,1 превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК), что можно объяснить техногенным воздействием со стороны предприятия – сток с площадки предприятия с ливневыми водами, талым снегом и прочими осадками.

Наибольшее превышение значения ПДК для свинца наблюдается летом 2021 года в точке 5 –

река Дырочная (в 1,6 раза больше). Данное превышение может быть связано с антропогенными факторами, а также, с аномально-высокими температурами этим летом. Определенные концентрации меди в воде не превышают ее ПДК.

При гамма-спектрометрическом определении исследуемых радионуклидов значения их ОА были ниже предела обнаружения прибора. Исключение составили некоторые точки из водоема №1 (1.1, 1.1/1, 1.1/6) и речные пробы (точки 5, 6, 7). Значения ОА в этих точках представлены на рисунке 2.



Источник: собственная разработка

Рисунок 2. Результаты измерения ОА Cs-137 и Ra-226

Фоновое значение (ФЗ) для техногенного радионуклида Cs-137 в реках и озерах Европейской части России, не подвергшихся значимому загрязнению после Чернобыльской аварии, находится, по разным источникам, на уровне от 1 до 10 Бк/м³ [4;5]. На основании рисунка 2 можно сделать вывод, что ОА Cs-137 превышает его ФЗ во всех точках, что может быть связано с техногенным воздействием со стороны предприятия.

Значение ОА Ra-226 превышает его ФЗ (0,003 Бк/л) только в т.1.1/1. Предположительно, превышение может быть связано с процессами естественного происхождения.

Корреляционные связи между изученными показателями определены как нелинейные. Исключение составили связи между рН и ОА (Cs-137), минерализацией и ОА (Cs-137), которые являются линейными. Наименьшая корреляция наблюдается между минерализацией и С_{рб}, рН и С_{рб}.

Список литературы

1. Отчет по экологической безопасности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» за 2020 год: [Электронный ресурс]: http://www.karpovipc.ru/images/Articles_images/Ecology/Doc/otchet20.pdf (Дата обращения 29.04.2022).
2. Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.1.5.980-00. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – Взамен СанПиН 4630-88; введ. 2001 – 01 – 01. Москва: ФГБУ "ЦСП" ФМБА России, 2001. 18 с.
3. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2009): Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 года №40//Собрание законодательства Российской Федерации. 2010. №14, (26 апреля). С. 1–50.
4. Бахур А.Е. Измерение радиоактивности природных вод и существующие нормативные требования. М.: НПП «Доза», 1998.

5. Зозуль Ю.Н. Комплексная оценка радиационно-опасных объектов на речной бассейн Московского региона: Автореф. дис. ... канд.биол. наук. М., 2007.

STUDY OF CHEMICAL AND RADIOACTIVE POLLUTION OF WATER OBJECTS NEAR JOINT-STOCK KARPOV RESEARCH AND DEVELOPMENT INSTITUTE FOR PHYSICAL CHEMISTRY (2021–2022)

Shpilko M.A.¹, Melnikova T.V.¹, Shavrina K.E.¹, Lavrentieva G.V.^{1,2}

¹ IATE NRNU MEPhI, Obninsk, Russian Federation

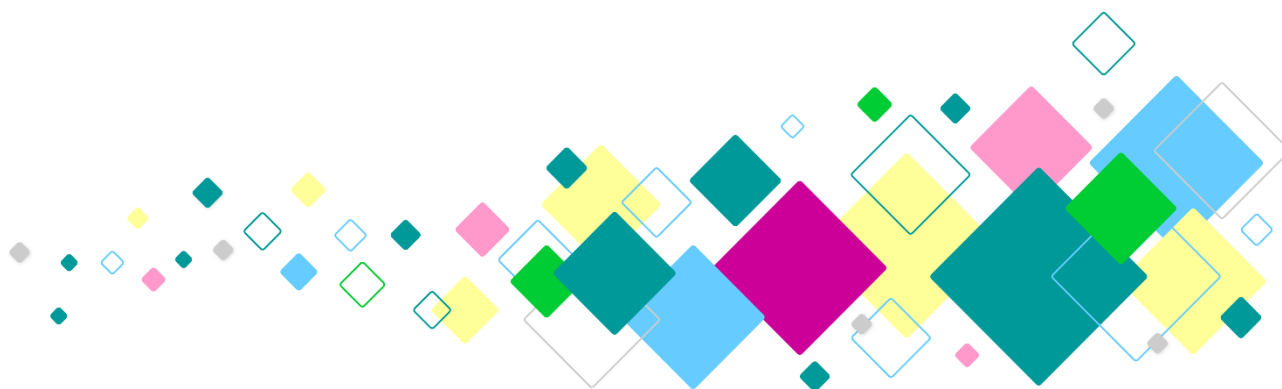
² Kaluga branch of MGTU named after N.E. Bauman, Kaluga, Russian Federation

The work determined the pH, mineralization, mass concentrations of heavy metals and volumetric activity (VA) radionuclides in water selected 2021–2022. A correlation analysis was carried out for the studied parameters.

Keywords: *pollution, pollutants, stripping voltammetry, correlation, copper, mineralization, radionuclides, lead, heavy metals, physical and chemical parameters, background value*

ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА

«BioSkills 2022: наука как образ жизни»



ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕТНЫХ РЕАКЦИЙ ЯЧМЕНЯ ПОСЕВНОГО ПОСЛЕ ДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Астахина С.О., Комарова Л.Н.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация

e-mail: astakhina@list.ru

Проведено исследование влияния гамма-излучения в диапазоне доз 2-50 Гр с мощностью дозы 58 Гр/ч на морфологические, биохимические и цитогенетические показатели ячменя посевного (*Hordeum sativum*) трех сортов. Показано стимулирующее действие гамма-облучения в диапазоне доз 15-20 Гр на морфометрические и биохимические показатели пророщенных семян ячменя. Статистически значимое изменение митотического индекса происходит в дозе гамма-облучения 50 Гр. Выявлено дозозависимое повышение частоты хромосомных aberrаций в клетках корневой меристемы ячменя посевного.

Ключевые слова: ячмень, *Hordeum sativum*, гамма-излучение, пролин, малоновый диальдегид, хлорофилл-а, хлорофилл-б, каротиноиды, митотический индекс, хромосомные aberrации

Актуальность

Анализ стрессовых механизмов у растительных организмов на воздействие низкими дозами ионизирующего излучения является важной задачей современной радиобиологии, решение которой позволит продвинуться в понимании реакций растений на слабые внешние воздействия. Существование такого феномена как радиационный гормезис не вызывает сомнений, но на сегодняшний день не существует единой концепции, объясняющей механизмы этого явления, что требует накопления новых экспериментальных данных в различных областях физиологии растений [0].

Материалы и методы

Объект исследования – ячмень посевной (*Hordeum sativum*) трех сортов: Витязь, Ладный и Бадьорий. Облучение семян проводили на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» на установке «ГУР-120» с источником излучения ^{60}Co . исследуемые дозы для биохимических показателей – 2 Гр, 5 Гр, 10 Гр, 15 Гр, 20 Гр, 25 Гр, 50 Гр; для морфологических и цитогенетических показателей – 2 Гр, 15 Гр, 17 Гр, 20 Гр, 50 Гр, при мощности дозы – 58 Гр/ч. После облучения семена проращивали в рулонных культурах по 30 семян в трех повторностях в термостате при температуре 24 °С в темноте. На 2-ой день прорастания корешки фиксировали в смеси 96%-го этилового спирта и ледяной уксусной кислоты (3:1), хранили в холодильнике при 4°С. Для определения митотического индекса (МИ) и частоты aberrантных клеток (ЧАК) использовали стандартный метод давленных препаратов. Препараты изучали с помощью светового микроскопа «Микмед-5». На каждом

препарате учитывали общее количество просмотренных клеток, количество делящихся клеток в разных фазах митоза и количество клеток с aberrациями. На 5 сутки проращивания рулоны помещали под фитолампу. На 7 сутки проводили измерение наземных побегов и длины главного корня. На 10 сутки по стандартным методикам измеряли концентрации хлорофилла-а, хлорофилла-б, каротиноидов, пролина и малонового диальдегида (МДА) в ростках ячменя посевного путем пересчета оптической плотности, которую определяли на фотометре «КФК-3-01».

Результаты

Показано, что концентрация хлорофилла-а у пророщенных семян ячменя посевного сорта Витязь статистически значимо снижается при облучении в дозах 2, 5, 10, 25 и 50 Гр, при облучении в дозах 15 Гр и 20 Гр выявлено стимулирующее действие гамма-излучения. У семян ячменя сорта Ладный доза гамма-излучения 15 Гр повышает содержание рассматриваемого пигмента, 10 и 20 Гр не показывают статистически значимые отличия, остальные рассматриваемые дозы ингибируют синтез хлорофилла-а. У сорта Бадьорий отрицательное действие оказывает гамма-облучение в дозах 2 и 50 Гр, активизирующее – 15 и 20 Гр. По содержанию хлорофилла-б отмечаются аналогичные результаты, что и по содержанию хлорофилла-а, только у сорта Ладный помимо гамма-облучения в дозе 15 Гр, стимулирующее действие оказывает облучение в дозе 10 Гр. Анализ содержания каротиноидов показал, что у сорта Витязь доза гамма-излучения 10 Гр не является угнетающей по содержанию каротиноидов, у сорта Ладный выявлены аналогичные результаты как по хлорофиллу-б, а у сорта Бадьорий помимо облучения в дозах 2 и 50 Гр отрицательное действие оказывает облучение в дозе 5 Гр.

В ходе эксперимента были получены данные о зависимости содержания МДА в растительном материале от дозы гамма-излучения и выявлено, что у семян сортов Витязь и Ладный статистически значимое повышение уровня малонового диальдегида происходит при дозах гамма-излучения 2, 5, 10, 25 и 50 Гр. Облучение в дозах 15 и 20 Гр, которое является стимулирующим по содержанию фотосинтетических пигментов, удерживают уровень МДА на уровне с контролем. Это свидетельствует о том, что при стимулирующих дозах процесс перекисного окисления липидов нормализуется. У семян сорта Бадьюрий процесс перекисного окисления липидов идет интенсивнее при облучении в дозах 2, 25 и 50 Гр.

Установлено, что при всех изученных дозах пролин проявляет себя достаточно остро в ответ на гамма-облучение. Исключением является облучение в дозе 15 Гр для сортов Витязь и Ладный.

Нами замечено, что чем выше содержание пролина в растительном материале, тем больше было МДА (коэффициент корреляции составил для сорта Витязь – 0,871; для сорта Ладный – 0,892; для сорта Бадьюрий – 0,886).

Исследование зависимости доза-эффект по показателям «длина главного корня» и «длина ростка» показало, что при облучении семян в дозе 2 Гр не происходит изменения длины проростка и главного корня по сравнению с контролем, доза в 50 Гр оказывает угнетающее действие. Облучение же в стимулирующих дозах – 15, 17 и 20 Гр приводит к увеличению длины проростков и главных корней всех трех сортов ячменя. Максимальное увеличение ростка было отмечено при облучении в дозе 17 Гр у сортов Ладный и Витязь (105,1 мм и 138,7 мм соответственно) и 20 Гр для сорта Бадьюрий (140,3 мм). Самые высокие показатели длины главного корня наблюдались для сорта Витязь – 124,4 мм при 17 Гр, для Ладного – 111,9 мм при 17 Гр, для Бадьюрия – 115,3 мм для 20 Гр.

Можно предположить, что при низких дозах с увеличением поглощенной дозы ионизирующего излучения увеличивается количество свободных радикалов, что является не только следствием нарушения антиоксидантно-прооксидантного гомеостаза, а представляет собой важный компонент фенотипической адаптации [0]. При облучении в дозах 15 Гр и 20 Гр формируются адаптационно-приспособительные признаки: модулируется антиоксидантная и фитогормональная системы, усиливается интенсивность работы пентозофосфатного пути окисления глюкозы, который участвует в защите клетки от радиационно-индуцированного апоптоза [0], а также увеличивается содержание каротиноидов, защищающих липиды от перекисного окисления. Дальнейшее увеличение поглощенной дозы ионизирующего излучения вызывает крупномасштабные повреждения в клетках, нарушая их функции и повышая содержание МДА и пролина. Подобный ответ на продукты радиолитиза воды влечет за собой деполяризацию

мембранного потенциала, синтез стрессовых белков [0] и снижение концентрации хлорофиллов.

Изменение митотического индекса происходило только при ингибирующей дозе гамма-облучения в 50 Гр. Из этого можно сделать вывод, что стимулирующий эффект облучения в дозах 15, 17 и 20 Гр, наблюдаемый по изменению морфометрических показателей, не связан со стимуляцией процессов деления клеток меристемы проростков ячменя. Увеличение длины наземного побега и главного корня, наблюдаемый у облученных растений, в сравнении с контрольной группой, следует в таком случае объяснять не через изменения в митотическом индексе, а через так называемый «кислый рост» [0].

Гамма-облучение семян привело к зависимому от дозы увеличению частоты клеток с хромосомными aberrациями в меристеме корней проростков ячменя посевного. Максимальная ЧАК обнаружена в клетках корневой меристемы после облучения в дозах 50 Гр для каждого из трех сортов. Выраженный ингибирующий эффект на клеточное деление после облучения семян в дозе 50 Гр, очевидно, может быть вызван многочисленными поломками в генетическом материале. Таким образом, можно прийти к выводу, что повышение частоты ХА при дозе гамма-облучения 50 Гр приводит к снижению МИ в корневой меристеме ячменя.

Заключение

Таким образом, формирование адаптивных реакций в ответ на низкодозовое облучение зависит от сочетанной работы фотосинтетической, антиоксидантной, фитогормональной систем и стрессовых белков.

Список литературы

1. Волкова П.Ю. Адаптивные реакции растений на действие ионизирующего излучения в низких дозах: дис. д. биол. н. Обнинск. 2020. 390 с.
2. Волкова П.Ю. и др. Анализ митотической активности в корневой меристеме проростков γ -облученных семян ячменя // Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. 2018. С. 120–124.
3. Кияк Н.Я. Действие свинца на интенсивность процессов ПОЛ на разных этапах развития гаметофита мха *Fumaria hygrometrica* Hedw // Современная физиология растений: от молекул до экосистем: тез. докл. науч. конференции. Сыктывкар. 2007. С. 187–189.
4. Чурюкин, Р. С. Закономерности формирования биологических эффектов при γ -облучении семян ячменя: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. биол. н. 2017. 24 с.
5. Шибарова А.Н. Анализ влияния малых доз ионизирующей радиации на протонную проницаемость и активность АТФазы плазмолеммы клеток высшего

PATTERNS OF FORMATION OF RESPONSES OF BARLEY AFTER THE ACTION OF GAMMA RADIATION

Astakhina S.O., Komarova L.N.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Studgorodok, 1, Obninsk, Russian Federation

The effect of gamma radiation in the dose range of 2-50 Gy with a dose rate of 58 Gy/h on the morphological, biochemical and cytogenetic parameters of barley seeds (*Hordeum sativum*) of three varieties was studied. The stimulating effect of gamma irradiation on morphometric and biochemical parameters of germinated barley seeds is shown. A statistically significant change in the mitotic index occurs at a gamma irradiation dose of 50 Gy. A dose-dependent increase in the frequency of chromosomal aberrations in the cells of the root meristem of barley was revealed.

Keywords: *barley, Hordeum sativum, gamma radiation, proline, malondialdehyde, chlorophyll-a, chlorophyll-b, carotenoids, mitotic index, chromosomal aberrations*

The study revealed the effect of stimulation in irradiated barley seeds of all studied varieties in terms of the content of photosynthetic pigments under gamma irradiation at doses of 15 and 20 Gy.

It was revealed that in barley seedlings of Vityaz and Ladny varieties, a significant increase in the level of malondialdehyde (MDA) occurs when irradiated at doses of 2, 5, 10, 25 and 50 Gy, in the Badiori variety – 2, 25 and 50 Gy.

It is shown that when irradiated seeds in the studied dose range, seedlings have a significant increase in the content of free proline. Irradiation at a dose of 15 Gy did not reveal a similar effect in seedlings of barley of the Vityaz and Ladny varieties.

It is noted that the higher the proline content in the plant material, the greater the MDA content (correlation coefficient «R» for the Vityaz variety = 0.871; for the Ladny variety = 0.892; for the Badiori variety = 0.886).

It can be assumed that at low doses, with an increase in the absorbed dose of ionizing radiation, the number of free radicals increases, which is not only a consequence of a violation of antioxidant-prooxidant homeostasis, but is an important component of phenotypic adaptation. When irradiated at doses of 15 Gy and 20 Gy, adaptive signs are formed: the antioxidant and phytohormonal systems are modulated, the intensity of the pentose phosphate pathway of glucose oxidation increases, which is involved in protecting the cell from

radiation-induced apoptosis, and the content of carotenoids protecting lipids from peroxidation increases. A further increase in the absorbed dose of ionizing radiation causes large-scale damage in cells, disrupting their functions and increasing the content of MDA and proline. Such a response to water radiolysis products entails the depolarization of the membrane potential, the synthesis of stress proteins and a decrease in the concentration of chlorophylls.

A change in the mitotic index occurred only with an inhibitory dose of gamma radiation of 50 Gy. From this it can be concluded that the stimulating effect of irradiation at doses of 15, 17 and 20 Gy, observed by changes in morphometric parameters, is not associated with stimulation of cell division processes of the meristem of barley seedlings, but with «acidic growth».

Gamma irradiation of seeds led to a dose-dependent increase in the frequency of cells with chromosomal aberrations in the meristem of the roots of barley seedlings. The maximum frequency of chromosomal aberrations was found in the cells of the root meristem after irradiation at doses of 50 Gy for each of the three varieties. The pronounced inhibitory effect on cell division after irradiation of seeds at a dose of 50 Gy, obviously, can be caused by numerous breakdowns in the genetic material. Thus, an increase in the frequency of chromosomal aberrations at a gamma radiation dose of 50 Gy leads to a decrease in mitotic activity in the root meristem of barley.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СОЛЕЙ РТУТИ НА ОРГАНИЗМЫ ГИДРОБИОНТОВ

Афонин А.А., Комарова Л.Н.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация
e-mail: afonin.alekse@gmail.com

Проведено исследование действия ионизирующего излучения и ионов ртути на одноклеточную водоросль *Chlorella vulgaris*, двустворчатых моллюсков родов *Unio* и *Anodonta*, и пресноводных живородящих рыб *Poecilia reticulata*. Было обнаружено, что небольшие концентрации ртути могут оказывать на моллюсков и рыб стимулирующий эффект. При гамма-излучении в дозах до 200 Гр у хлореллы преобладает гибель после первого деления, а при дозах свыше 200 Гр – гибель клеток до деления.

Ключевые слова: гамма-излучение, тяжёлые металлы, гидробионты, ртуть, *Chlorella vulgaris*, *Unio*, *Anodonta*, *Poecilia reticulata*, фильтрационная активность, МТТ-тест

Актуальность

Ионизирующее излучение оказывает сложное и многокомпонентное воздействие на живые организмы. Кроме прямого действия, выражающегося в повреждении чувствительных структур клеток, имеет место также косвенное воздействие радиации, связанное с образованием радиотоксинов – заряженных ионов, радикалов, высокоактивных веществ перекисного типа. При накоплении радиотоксинов в клетках изменяется проницаемость клеточных стенок, смещается ход биохимических и физиологических процессов в организме.

В реакции живого вещества на облучение задействованы сложные системы репарации повреждений, управляемые ферментами и некоторыми другими химическими веществами. Эта система позволяет до определенного предела поддерживать жизнеспособность организмов, несмотря на увеличение дозы. Дальнейшее увеличение дозы приводит к перегрузке и срыву работы защитных механизмов, возникает ряд побочных заболеваний, появляются летальные исходы [2].

Загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами – одна из актуальных проблем современного мира. Попадая в водоемы, тяжелые металлы оказывают токсическое действие на фитопланктон, который является первичным звеном в системе пищевых связей водных организмов и определяет состояние водной экосистемы в целом. Наиболее опасными для окружающей среды являются ртуть и ртуть-содержащие соединения [1, 3, 4].

Цель работы – изучение влияния ионов ртути и ионизирующего излучения на организмы гидробионтов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны одноклеточные зелёные водоросли *Chlorella vulgaris*, двустворчатые моллюски родов *Unio* и *Anodonta*, пресноводные живородящие рыбы гуппи (*Poecilia reticulata*).

В исследовании были использованы растворы ртути в концентрациях 1 и 10 ПДК.

Облучение проводили на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ), на установке «ГУР-120», исследуемые дозы – 10 Гр, 50 Гр, 100 Гр, 150 Гр, 200 Гр и 300 Гр при мощности дозы – 58 Гр/ч.

Эффекты действия оценивали по способности хлореллы образовывать микроколонию, фильтрационной активности моллюсков и метаболической активности клеток рыб. Каждая серия опытов повторялась 3-5 раз.

Результаты

В работе были получены следующие данные:

1. Выявлена кратковременная стимуляция фильтрационной активности двустворчатых моллюсков родов *Unio* и *Anodonta* на 26,9 % в течение первых 30 минут воздействия ртути в концентрации 1 ПДК.

2. Воздействие ионов ртути в концентрации 1 ПДК на клетки *Poecilia reticulata* так же вызывает стимуляцию метаболической активности на 25,6 % после часового воздействия и на 44,2 % после полуторачасового, что связано с активацией систем детоксикации и успешной работой антиоксидантной системы.

3. При воздействии ртути в концентрации 10 ПДК происходит ингибирование фильтрационной активности моллюсков на 19,9 % и снижение метаболической активности клеток *Poecilia reticulata* относительно контроля на 12,1 % и 21,1 % в течение 60 и 90 минут соответственно.

4. Способность клеток *Chlorella vulgaris* образовывать микроколонии снижается в 2 раза при воздействии ионов ртути в концентрации 1 ПДК в течение 30 минут и в 4 раза при 10 ПДК. Одновременно с этим наблюдается снижение способности клеток водоросли пройти хотя бы одну споруляцию на 15 % при действии ионов ртути в концентрации 10 ПДК.

5. Увеличение времени экспозиции и концентрации ионов ртути снижает работу адаптационных механизмов клеток водоросли и возможность образования колоний, причем при воздействии препарата в концентрации 10 ПДК в течение 90 минут выход клеток, погибших без деления, превышает 50 %. В концентрации 1 ПДК за это время погибает 30,5 % клеток.

6. При действии гамма-излучения в дозах от 10 до 200 Гр у клеток *Chlorella vulgaris* преобладает гибель после первого деления, а при дозах свыше 200 Гр – гибель клеток до деления, независимо от стадии роста. Это может быть связано с временной задержкой первого пострadiaционного деления в связи с «попытками» клеток репарировать появившиеся повреждения. В этом случае происходит уплотнение ядерного вещества, которое проявляется сморщиванием ядра, после чего клетка погибает, так и не поделившись.

Заключение

Проведенные исследования показали, что небольшие концентрации ртути могут оказывать на моллюсков родов *Unio* и *Anodonta* и рыб *Poecilia reticulata* стимулирующий эффект, что предположительно связано с эффективной работой антиоксидантной системы и, в том числе, белков-металлотионеинов при низких концентрациях загрязнителя.

Высокие концентрации исследуемого поллюганта оказывали угнетающее действие,

предположительно вызванное усиленной генерацией свободных радикалов и активных форм кислорода, а также «забивание» ионных каналов и нарушение работы митохондрий.

Было обнаружено, что ионы ртути оказывают ингибирующее действие на способность клеток *Chlorella vulgaris* образовывать микроколонии. Данный эффект можно объяснить взаимодействием ртути с белками цитоскелетных микротрубочек, что вызывает угнетение внутриклеточной подвижности, транспорта частиц, а также неправильное расхождение хромосом при делении клеток.

В ходе исследования было получено, что при дозах свыше 200 Гр у клеток *Chlorella vulgaris* преобладает гибель до деления, независимо от стадии роста, что, предположительно, связано с задержкой первого пострadiaционного деления в связи с «попытками» клеток репарировать появившиеся повреждения.

Список литературы

1. Крамар К.В., Кыров Д.Н., Содержание ртути в органах и тканях рыб // Символ науки, - Уфа, 2017.
2. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАт, 2010. 498 с.
3. Шувырденков И.А., Гремячих В.А., Зарипов, В.Н. Предварительные данные по содержанию ртути в органах и тканях некоторых видов рыб и млекопитающих Ивановской области // Ртуть и другие тяжелые металлы в экосистемах. Современные методы исследования содержания тяжелых металлов в окружающей среде. 2018. С.72-73.
4. Berzas Nevado J.J. et al. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: A review // Environment International, 2010. 36: 593–608.

REGULARITIES OF THE EFFECT OF IONIZING RADIATION AND HEAVY METAL SALTS ON HYDROBIONT ORGANISMS

Afonin A.A., Komarova L.N.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation

The effect of ionizing radiation and mercury ions on the unicellular algae *Chlorella vulgaris*, bivalve mollusks of the genera *Unio* and *Anodonta*, and freshwater viviparous fish *Poecilia reticulata* was studied. It has been found that small concentrations of mercury can have a stimulating effect on shellfish and fish. With gamma radiation in doses up to 200 Gy, chlorella is dominated by death after the first division, and at doses over 200 Gy, cell death before division.

Keywords: gamma radiation, heavy metals, hydrobionts, mercury, *Chlorella vulgaris*, *Unio*, *Anodonta*, *Poecilia reticulata*, filtration activity, MTT test

Introduction. Ionizing radiation has a complex and multicomponent effect on living organisms. The reaction of living beings to radiation involves complex

damage repair systems controlled by enzymes and some other chemicals. This system allows to maintain the viability of organisms up to a certain limit, despite

the increase in the dose. A further increase in the dose leads to overload and disruption of the protective mechanisms, a number of side diseases occur, fatal outcomes appear [2].

Pollution of the environment by heavy metals is one of the urgent problems of the modern world. Getting into reservoirs, heavy metals have a toxic effect on phytoplankton, which is the primary link in the system of food connections of aquatic organisms and determines the state of the aquatic ecosystem as a whole. Mercury and mercury-containing compounds are the most dangerous for the environment [1, 3, 4].

Materials and methods. Unicellular green algae *Chlorella vulgaris*, bivalve mollusks of the genera *Unio* and *Anodonta*, freshwater viviparous guppy fish (*Poecilia reticulata*) were selected as objects of research.

Mercury solutions in concentrations of 1 and 10 MPC were used in the study.

The irradiation was carried out on the basis of the Russian Institute of Radiology and Agroecology, on the installation "GUR-120", the studied doses were 10 Gy, 50 Gy, 100 Gy, 150 Gy, 200 Gy, 250 Gy at a dose rate of 58 Gy /h.

The effects of the action were evaluated by assessing the ability of *Chlorella* to form microcolonies, the filtration activity of mollusks and the metabolic activity of fish cells. Each series of experiments was repeated 3-5 times.

Results and discussion. The following data were obtained in the work:

1. Short-term stimulation of filtration activity of bivalve mollusks of the genera *Unio* and *Anodonta* was revealed by 26.9% during the first 30 minutes of exposure to mercury at a concentration of 1 MPC.

2. Exposure to mercury ions at a concentration of 1 MPC on *Poecilia reticulata* cells also causes stimulation of metabolic activity by 25.6% after an hour of exposure and by 44.2% after an hour and a half, which is associated with the activation of detoxification systems and the successful operation of the antioxidant system.

3. When exposed to mercury at a concentration of 10 MPC, the filtration activity of mollusks is inhibited by 19.9% and the metabolic activity of *Poecilia reticulata* cells decreases relative to the control by 12.1% and 21.1% for 60 and 90 minutes, respectively.

4. The ability of *Chlorella vulgaris* cells to form microcolonies decreases by 2 times when exposed to mercury ions at a concentration of 1 MPC for 30 minutes and by 4 times at 10 MPC. At the same time, there is a decrease in the ability of algae cells to undergo at least one sporulation by 15% under the action of mercury ions at a concentration of 10 MPC.

5. An increase in the exposure time and concentration of mercury ions reduces the work of the adaptive mechanisms of algae cells and the possibility of colony formation, and when exposed to the drug at a concentration of 10 MPC for 90 minutes, the yield of cells that died without division exceeds 50%. At a concentration of 1 MPC, 30.5% of cells die during this time.

6. Under the action of gamma radiation in doses from 10 to 200 Gy, *Chlorella vulgaris* cells are dominated by death after the first division, and at doses over 200 Gy, cell death before division, regardless of the growth stage. This may be due to the time delay of the first deviation division due to the "attempts" of cells to repair the damage that has appeared. In this case, the nuclear substance is compacted, which manifests itself by shrinking the nucleus, after which the cell dies without sharing.

УДК: 577.15:57.045:577.34

ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ СТРЕССОВЫХ ФАКТОРОВ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ *ARABIDOPSIS THALIANA*

Блинова Я.А.^{1,2}, Казакова Е.А.²

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» 249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация

e-mail: yana.manuhina@yandex.ru

² ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация

Изучено влияние абиотических стрессовых факторов – γ -излучения, гипертермии, метилвиологена – на семенное потомство *Arabidopsis thaliana* L. чернобыльского экотипа. Оценены площадь листовой поверхности проростков, параметры флуоресценции хлорофилла в листьях молодых растений. Проведена оценка активности антиоксидантных ферментов – аскорбатпероксидазы, каталазы, гваяколовой пероксидазы в листьях растений. Выявлена устойчивость к гипертермии и чувствительность к влиянию излучения и метилвиологена у растений с фонового участка. На радиоактивно загрязненном участке показано снижение устойчивости к действию стрессоров.

Ключевые слова: площадь поверхности листьев, флуоресценция хлорофилла, антиоксидантные ферменты, гипертермия, *Arabidopsis thaliana*

В силу прикрепленного образа жизни растения не способны избежать воздействия различных стрессовых факторов окружающей среды. К тому же, существуют растения, произрастающие на территориях, загрязненных радионуклидами. Отмечено, что такие растения могут быть более устойчивы к действию других стрессоров [1, 2]. Поэтому оценка реакции потомков хронически облучаемых растений на абиотические стрессоры позволит получить уникальные представления о механизмах адаптации растений к таким условиям.

Целью работы являлась оценка устойчивости потомков *Arabidopsis thaliana* L. чернобыльского экотипа по морфофизиологическим и биохимическим показателям после индукции абиотического стресса.

В качестве объектов исследования использовали семена *A. thaliana*. Семена собирали в июне 2021 года на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника Республики Беларусь Гомельской области. Были выбраны участки с разным уровнем радиоактивного загрязнения: радиоактивно загрязненный участок Масаны (мощность амбиентной дозы – 3,2 мкЗв/ч) и участок с фоновым

уровнем радиоактивного загрязнения Бабчин (мощность амбиентной дозы – 0,3 мкЗв/ч). На участках были собраны растения с семенами поколения F₁. Эти семена выращивали в лабораторных условиях с целью получения семян второго поколения F₂. Все дальнейшие действия выполнялись с семенами второго поколения.

В ходе работы мы оценили площадь листовой поверхности, используя программу Easy Leaf Area, параметры флуоресценции хлорофилла проростков с помощью флуориметра Junior-PAM после воздействия острого γ -излучения в дозе 150 Гр, гипертермии (50°C) и метилвиологена в концентрации 0,01 мкМ на семена. Также проведено определение активности антиоксидантных ферментов – каталазы, аскорбатпероксидазы и гваяколовой пероксидазы в листьях растений после воздействия стрессоров на спектрофотометре NanoDrop OneC.

Показано, что γ -облучение семян привело к статистически значимому ($p = 0,02$) уменьшению площади поверхности листьев потомков *A. thaliana* чернобыльского экотипа с участков Бабчин и Масаны (Рис.1).

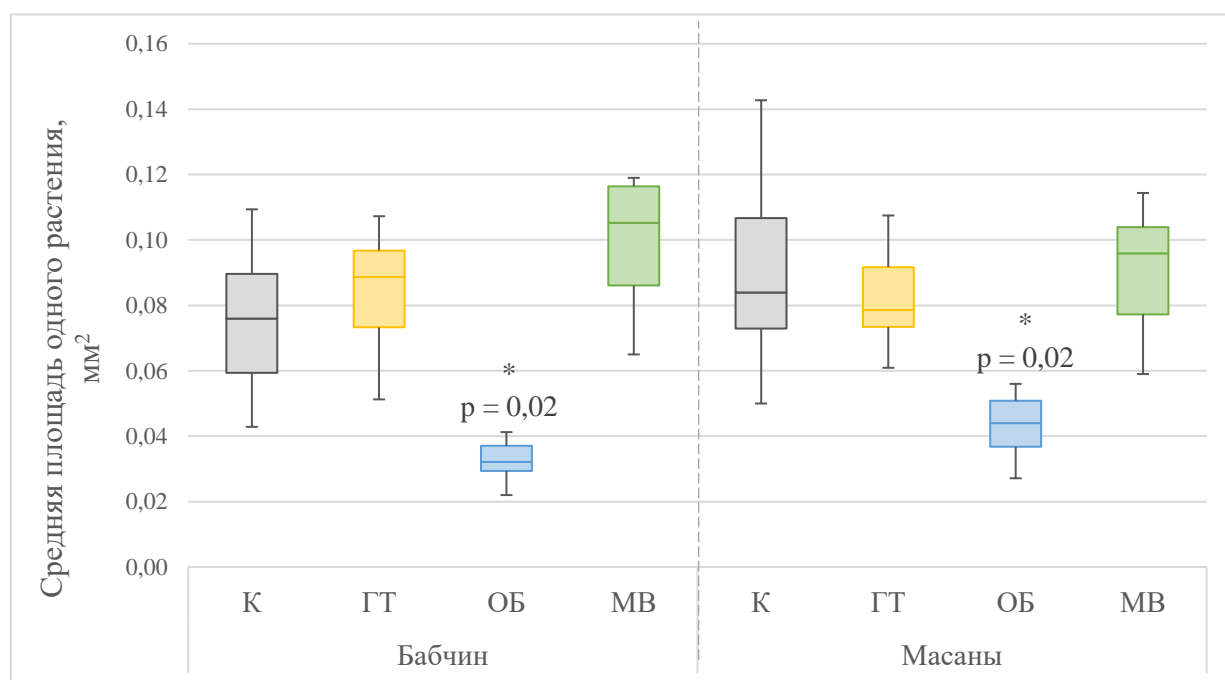


Рисунок 1. Площадь поверхности листьев контрольных растений (К) и растений после обработки стрессорами: гипертермией (ГТ), облучением (ОБ), метилвиологеном (МВ).

* – различия значимы в сравнении с контролем (U-критерий Манна-Уитни)

По изменениям параметров флуоресценции хлорофилла установлено, что влияние γ -излучения и гипертермии на семена привело к снижению эффективности фотосинтеза у потомков *A. thaliana* чернобыльского экотипа с участка Масаны. Метилвиологен оказал ингибирующее действие на фотосинтез

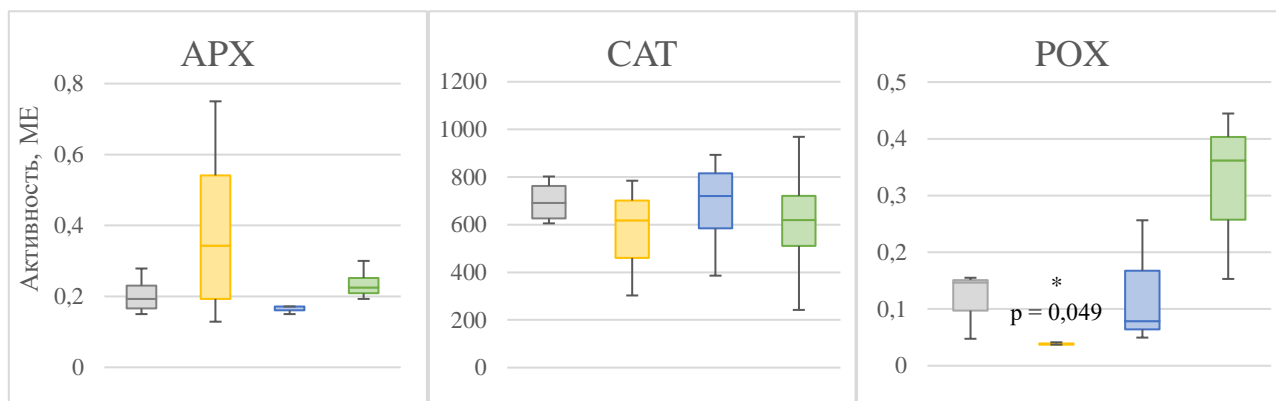
растений с участка Бабчин. Гипертермия в целом не повлияла на фотосинтетические процессы, происходящие в листьях потомков.

По результатам спектрофотометрического анализа активности антиоксидантных ферментов выявлены значимые изменения, связанные с понижением

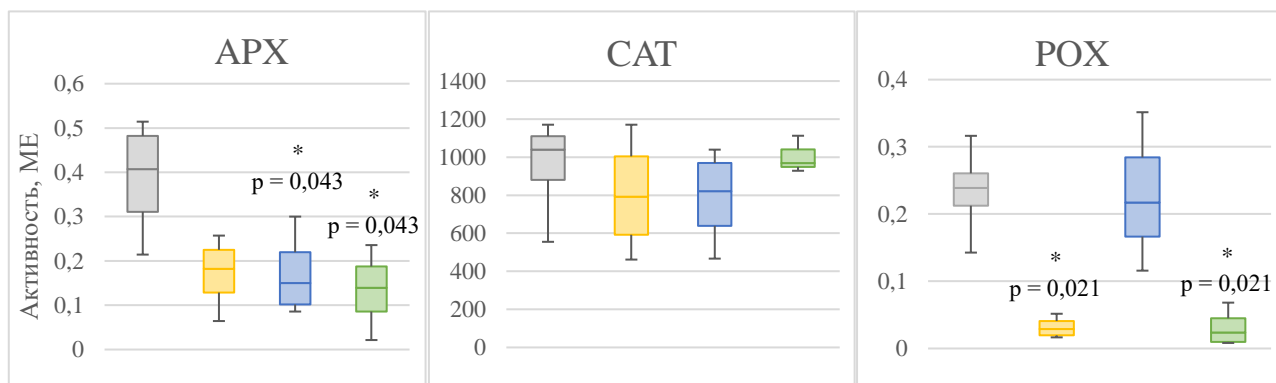
показателей активности после действия стрессоров как на участке с фоновым уровнем радиоактивного

загрязнения Бабчин, так и на радиоактивно-загрязненном участке Масаны (Рис. 2).

А



Б



■ Контроль ■ Гипертермия ■ Облучение ■ Метилвиологен

Рисунок 1. Активность APX, CAT, POX в листьях потомков с участков Бабчин (А), Масаны (Б) после обработки стрессорами.

* – различия значимы по отношению к контролю на том же участке (U-критерий Манна-Уитни)

Адаптивная реакция потомков растений с участка Бабчин указывала на сохранение устойчивости к гипертермическому воздействию, при этом растения оказались чувствительны к влиянию облучения и метилвиологена. Потомки *A. thaliana* с участка Масаны по ряду морфофизиологических и биохимических параметров показали снижение устойчивости к действию гипертермии, γ -излучения и метилвиологена.

При поддержке гранта РФФ № 20-74-10004.

Список литературы

1. Шевченко Г.В., Талалаев А.С., Дунав Д. Стойкость проростков *Arabidopsis thaliana* из зоны Чернобыльской АЭС к действию ДНК-повреждающих факторов // Доповіді НАН України. 2012. № 12. с. 157–162.
2. Kovalchuk I. et al. Molecular Aspects of Plant Adaptation to Life in the Chernobyl Zone // Plant Physiology. 2004. № 1 (135). pp. 357–363.

INFLUENCE OF ABIOTIC STRESS FACTORS ON MORPHO-PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF ARABIDOPSIS THALIANA

Blinova Ya.A.^{1,2}, Kazakova E.A.²

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation

² Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

We studied the effect of abiotic stress factors – γ -irradiation, hyperthermia, methyl viologen – on the seed progeny of *Arabidopsis thaliana* L. of the Chernobyl ecotype. We estimated the leaf surface area of the seedlings, the parameters of chlorophyll fluorescence in the leaves of young plants. We also evaluated the activity of antioxidant enzymes – ascorbate peroxidase, catalase, guaiacol peroxidase in plant leaves. In this way, we revealed resistance to hyperthermia and sensitivity to the influence of radiation and methyl viologen in plants from the background area, and in the radioactively contaminated area – a decrease in resistance to stressors.

Keywords: leaf area, chlorophyll fluorescence, antioxidant enzymes, hyperthermia, *Arabidopsis thaliana*

УДК: 574.472

ДИНАМИКА ЗАРАСТАНИЯ ПЕСЧАНОГО КАРЬЕРА НА ТЕРРИТОРИИ БОРОВСКОГО РАЙОНА

Домнин И.А.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация

e-mail:domni3174@gmail.com

Первичные сукцессии – удобная модель для выяснения закономерностей этапов формирования наземных экосистем. В нашем исследовании анализировалась динамика вторичной сукцессии антропогенно-нарушенных экосистем карьера. В ходе данной работы были проанализированы данные двух ранних исследований, а также предложены группы растений, которые можно использовать для более быстрой рекультивации песчаных карьеров.

Ключевые слова: вторичная сукцессия, динамика зарастания, антропогенное изменение, биогеоценоз, растительный покров, экосистемы, рекультивация, инвазионные виды, песчаный карьер

Цель работы: изучить динамику смены растительного покрова песчаного карьера с 2012 по 2019 гг.

Задачи работы:

1. Произвести геоботаническое описание дна карьера.
2. Сравнить видовой состав растений 2019 и 2012 года.
3. Сравнить доминирующие виды и семейства растений.
4. Выделить инвазионные виды, жизненные формы, экологические, а также систематические группы растений.
5. Предложить группы растений, которые можно использовать для более быстрой рекультивации песчаных карьеров.

Работа выполнена летом 2019 г. Нами изучен видовой состав карьера около деревни Совьяки. 30 лет назад в нем велась разработка песка открытым способом. Площадь карьера составляет около 660 тысяч

кв.м. Глубина около 3 метров. Склоны низкие, преобладает широкое дно.

Геоботаническое описание дна произведено методом трансект [1]. Анализировали сходство систематических групп, жизненных форм и экологических групп растений карьера в 2019 и 2012 гг.

По формуле Жаккара производили сравнение видового состава растений карьера в 2012 и 2019 гг.

За 7 лет исследований видовое разнообразие растений карьера выросло с 25 до 38. Увеличилась доля травянистых растений с 80 до 86% (при этом видовой состав и возраст деревьев сильно отличались), выросла доля многолетних с 72 до 84%, повысилось количество мезофитов до 61% и появились гидрофиты. Систематический анализ показал доминирование астровых (44% в 2012 и 35% в 2019 г), увеличение доли мотыльковых (с 4% до 18%) и мятликовых (с 8 до 14%). Количество инвазионных видов уменьшилось с 14 до 5%. Коэффициент Жаккара составил 31%. Очевидно, по нему можно судить

о том, насколько быстро идет сукцессионный процесс. Таким образом, зарастание карьера идет по развитию сукцессии первичного типа.

В течение 7 лет исследований повысилась экологическая гетерогенность территории карьера, что привело к увеличению видового разнообразия за счет заселения большим числом видов с разными экологическими требованиями. На дне оврага нами выделены участки с преобладанием древесной растительности, участок с повышенной влажностью, где доминировал рогоз широколистный, несколько участков со сплошным покрытием Вейника тростникового, участки с преобладанием Мать-и-мачехи обыкновенной, а также небольшие участки с доминированием Галинзоги четырехлучевой и Мелколепестника канадского. Общая площадь проективного покрытия дна оврага растениями составила 60 %. Естественно, что зарастание нарушенных мест обитаний по типу первичной сукцессии идет, в первую очередь, за счет аборигенных видов растений. В наших исследованиях такими пионерными аборигенными

видами являются, древовидные - Ива серебристая и Береза поникшая.

Заключение

Неграмотно организованные работы после выработки недр становятся причиной образования оврагов, нарушения почв, загрязнения воздуха; при транспортировке добытого материала страдают дороги. Мы считаем, что использование пионерных аборигенных видов растений для рекультивации карьеров ускорит процесс их зарастания и не требует больших затрат. Флора исследованных карьеров в Калужской области своеобразна, и ее динамика нуждается в дальнейшем изучении.

Список литературы

1. Решетникова Н.М., Телеганова В.В. Значение карьеров Калужской области для сохранения и адвентизации флоры региона//Ботанический журнал, т.101, №5, 2016// <https://clck.ru/3223QV>

БИОРАЗНООБРАЗИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ МАКРОЗООБЕНТОСА НА УЧАСТКЕ РЕКИ ИПУТЬ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Исаев Д.В.

МБОУ "СОШ №11 им. Подольских курсантов" г. Обнинска,
Калужская область, г. Обнинск, ул. Комарова, дом 10, Российская Федерация
e-mail: school11obn@mail.ru

Было изучено биоразнообразие и особенности распространения видов макрозообентоса на участке реки Ипуть, подвергнувшейся радиационному загрязнению. В ходе экспедиции были изучены пробы макрозообентоса на р.Ипуть, выявлены доминирующие и индикаторные виды и создана база данных водных беспозвоночных для реки Ипуть. В результате исследования были выявлены 36 таксономических групп макрозообентоса, выявлены доминирующие, референтные и редко встречаемые виды, а также определен класс качества воды.

Ключевые слова: биоразнообразие, макрозообентос, радионуклиды, биомониторинг, пробоотбор, эквивалентная доза

В настоящее время в мире много территорий, пострадавших от радиоактивного загрязнения. В юго-западных районах Брянской области отмечены довольно высокие уровни загрязнения радионуклидами. Ионизирующая радиация является постоянно действующим фактором внешней среды, что требует изучения процессов взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой их обитания в условиях радиоактивного загрязнения [1]. Для понимания процессов, протекающих в биоценозах, наиболее эффективным является длительный биомониторинг, в течение которого можно проследить процессы динамики биоразнообразия макрозообентоса. В результате загрязнения рек происходит снижение

биологического разнообразия, и меняется структура зооценозов [2].

Цель работы: Изучить биоразнообразие и особенности распространения видов макрозообентоса на участке реки Ипуть, подвергнувшейся радиационному загрязнению.

Данное исследование является частью мониторинговых работ, которые проводятся с 2012 г., на участке р.Ипуть, расположенном на территории Брянской области, пострадавшей в результате аварии на ЧАЭС. Материал отбирался в ходе водных экспедиций 2019–2021 гг., на протяжении маршрута, общей длиной около 70 км, где установлены 5 станций пробоотбора.

Для оценки степени радиоактивного загрязнения в исследуемых точках пробоотбора проведено измерение эквивалентной дозы (Дозиметр-радиометр МКС-15Д «Снегирь»).

Отборы проб макрозообентоса проводились гидробиологическими скребками со дна водоема на глубине от 0,7–1,5 метра в зоне прибрежной растительности. Организмы были определены до вида, отдельные – до рода или до семейства (в соответствии с группами по Вудивису).

При анализе удельной активности ^{137}Cs в образцах грунта и донных отложений выявлено, что загрязнение носит неравномерный, остаточный характер и снижается с годами, при этом вода на исследуемых точках умеренно-загрязненная. В пяти точках пробоотбора на реке Ипуть было зафиксировано 36 видов. За 10 лет исследований была составлена база данных, которая отражает доминантные, редко встречаемые виды и приуроченность видов к точкам. Разнообразие видов объясняется крупными размерами акватории, и связанное с этим разнообразием условий обитания и кормовой базы. Подсчет особей в каждой пробе позволил выделить доминирующие и редко встречаемые виды.

Анализ видового разнообразия по данным экспедиции 2021 года показал, что большинство представителей доминирующих групп относятся к типу моллюски, поскольку они приурочены к растительному

субстрату и они могут участвовать в миграции радионуклидов. Сравнение данных с материалами прошлых экспедиций выявило тенденцию к смене доминирующих групп в точках с повышенным радиационным фоном. По данным нашего мониторинга установлено, что *Herpobdella octoculata* заменила *Haemopis sanguisuga* L, в качестве доминирующего вида. Наиболее уязвимыми являются малочисленные виды, подтверждением этого служит отсутствие в пробах последней экспедиции крупного жука-плавуна *Cybister lateralimarginalis*.

Таким образом, проведенный мониторинг, созданные БД по обнаруженным таксонам и реакции выявленных референтных видов позволят создать необходимые предпосылки для восстановления хозяйственной деятельности данной местности и развития экологического туризма.

Список литературы

1. Публикация 91 МКРЗ. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека. М.: Комтехпринт, 2004. 74 с.

2. Кириллов, А. Ф., Салова, Т. А., Ходулов, В.В. Гидробионты среднего течения реки Лены в системе мониторинга // Гидробиологический журнал. 2008. № 6. С. 49–53.

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ФУМАРОВОЙ КИСЛОТЫ И ФУМАРАТА 3-ОКСИПИРИДИНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНОГО КАЧЕСТВА НА КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

Купцова П.С.^{1,2}, Выпова Е.Р.¹, Берсенева А.А.¹, Комарова Л.Н.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» 249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация

² Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Российская Федерация
e-mail: kuptsova_apollinaria@mail.ru

Проведено исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на нормальные и опухолевые клетки человека при действии гамма-излучения и излучения ионов ^{12}C . Показан радиозащитный эффект исследуемых соединений, который оценен по показателям клоногенной активности и времени удвоения.

Ключевые слова: радиопротекторы, гамма-излучение, ионы ^{12}C , фибробласты, нейробластома, выживаемость, клоногенный анализ, время удвоения, фумаровая кислота, фумарат 3-оксипиридина

Актуальность

По данным Минздрава в 2021 г. в Российской Федерации выявлено 580 415 случаев злокачественных новообразований [1]. Для лечения онкологических заболеваний применяются различные методы и подходы. В современной онкологии лучевая терапия

является одним из ведущих методов лечения злокачественных новообразований. Однако, большой трудностью в проведении лучевой терапии является то, что между опухолью и источником излучения чаще всего находятся здоровые ткани. Адронная терапия (в т. ч. протонами и углеродными пучками)

является на сегодняшний день наиболее эффективной формой лучевой терапии неоперабельных, глубоко расположенных опухолей, в том числе радиорезистентных [2]. Значительным недостатком использования тяжелых заряженных частиц в лечении онкологии является их деление на осколки, которые имеют большой пробег по отношению к первичным ионам, из-за чего растет дозовая нагрузка на здоровые ткани.

Радиозащитные соединения имеют важное значение в клинической лучевой терапии, поскольку нормальные ткани должны быть защищены от действия ионизирующего излучения разного качества. Одним из основных направлений в радиобиологии является поиск новых соединений, которые могут проявлять радиозащитные свойства. Например, представляет интерес изучение радиопротекторных свойств соединений, обладающих антиокислительными, антиоксидантными и антирадикальными свойствами. К таким препаратам относится фумаровая кислота и фумарат 3-оксипиридина.

Следовательно, **цель работы** – изучение радиопротекторных свойств фумаровой кислоты фумарата 3-оксипиридина при действии гамма-излучения и излучения ионов ^{12}C на опухолевые (нейробластома SK-N-BE) и нормальные (фибробласты hTERT) клетки человека.

Материалы и методы

Объект исследования - клеточные линии: фибробласты hTERT (нормальные клетки соединительной ткани) и нейробластома SK-N-BE (эмбриональная опухоль стволовых нервных клеток нейробластов). Клетки культивировали по стандартной методике [3]. *Исследуемые соединения* - фумаровая кислота и фумарат 3-оксипиридина. Клетки инкубировали с исследуемыми веществами в концентрации 0,05 мг/мл в течение 24-х часов.

Облучение ионами ^{12}C проводили на каскаде ускорителя «У-70» Института физики высоких энергий (ИФВЭ) ФГБУ ГНЦ РФ «Курчатовский институт» (г. Протвино). Облучение осуществлялось в водном фантоме со средней энергией 455,8 МэВ/нуклон. Дозы облучения: 1, 2, 4, 6 Гр.

Источником гамма-излучения служила гамма-установка «ГУР-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{\text{ср}} = 1,25$ МэВ). Мощность дозы составила 0,9 Гр/мин. Дозы облучения: 1, 4, 6, 10 Гр.

Эффекты действия ионизирующего излучения на клетки оценивали с помощью расчёта времени удвоения и анализа клоногенной активности. Каждая серия опытов повторялась 3–5 раз.

Результаты

В данной работе было исследовано действие ионизирующего излучения разного качества, фумаровой кислоты, фумарата 3-оксипиридина и

совместное действие облучения и соединений на две клеточные линии. Контролем служили интактные клетки.

Показано, что фумаровая кислота и фумарат 3-оксипиридина оказывает радиозащитное действие на клеточные линии фибробластов и нейробластомы человека при облучении их гамма излучением в дозах 1, 4, 6 и 10 Гр. Проявление радиопротекторных свойств у фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина по отношению к действию γ -излучения не только на нормальные клетки, но и на опухолевые клетки человека объясняется тем, что исследуемые препараты не обладают селективностью по отношению к фибробластам человека.

Также показано, что применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина в качестве радиопротекторов не оказывает радиозащитное действие на опухолевые клетки при облучении их ионами ^{12}C . Это объясняется высокой ОБЭ ионного излучения. Полученные данные представляют большой интерес, так как нормальные ткани, находящиеся за пиком Брэгга, могут быть защищены от вторичных продуктов ионно-углеродной терапии (например, гамма-квантов), в то время как опухолевые клетки не будут подвергаться радиозащитному действию препаратов.

При проведении сравнительного анализа результатов действия препаратов с гамма-квантами и ионами ^{12}C была выявлена существенная зависимость проявления модифицирующих свойств от качества излучения.

Также в работе было оценено влияние облучения, препаратов и их комбинированного действия на время удвоения клеток. Присутствие в контроле препаратов не увеличивало время удвоения клеток, что подтверждает проведенные ранее исследования об отсутствии токсичности препаратов в исследуемой концентрации. Напротив, при действии гамма-излучения препараты существенно снижали время удвоения фибробластов более, чем в два раза при дозе 10 Гр и время удвоения клеток нейробластомы почти в 1,5 раза. Также время удвоения клеток нейробластомы снижалось в 1,3 раза при действии ионов ^{12}C в дозе 10 Гр.

Заключение

Полученные данные позволяют говорить о том, что фумаровая кислота и фумарат 3-оксипиридин проявляют радиозащитные свойства и могут быть исследованы далее в качестве радиопротекторов на других видах ионизирующего излучения, а также на более широком спектре культур клеток человека.

В конечном счете это открывает новые возможности уменьшения лучевой нагрузки на здоровые ткани человека, в том числе снижение поражающего действия вторичных продуктов на здоровые клетки за пиком Брэгга при действии ионно-углеродной терапии.

Список литературы

1. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2021 году // М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. 2022. 239 с.

2. Hwang E. J., Gorayski P., Le H., et al. Particle therapy tumour outcomes: An updated systematic review //

Journal of medical imaging and radiation oncology. 2020. Vol. 64(5). P. 711–724. DOI:10.1111/1754-9485.13021.

3. Прилепский А.Ю., Дроздов А.С., Богатырев В.А., Староверов С.А. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2019. 43 с.

STUDYING THE RADIOPROTECTIVE PROPERTIES OF FUMARIC ACID AND 3-OXYPYRIDINE FUMARATE UNDER THE ACTION OF IONIZING RADIATION OF DIFFERENT QUALITIES ON HUMAN CELLS

Kuptsova P.S.^{1,2}, Vyova E.R.¹, Berseneva A.A.¹, Komarova L.N.¹

¹ Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation

² A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (A. Tsyb MRRC), Obninsk, Russian Federation

A study was made of the radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on normal and tumor human cells under the action of gamma radiation and radiation of ¹²C ions. The radioprotective effect of the studied compounds was shown, which was assessed in terms of clonogenic activity and doubling time.

Keywords: radioprotectors, gamma radiation, ¹²C ions, fibroblasts, neuroblastoma, survival, clonogenic analysis, doubling time, fumaric acid, 3-oxypyridine fumarate

Radioprotective compounds are important in clinical radiotherapy, since normal tissues must be protected from the action of ionizing radiation of varying quality. One of the main directions in radiobiology is the search for new compounds that can exhibit radioprotective properties. For example, it is of interest to study the radioprotective properties of compounds with antioxidant, antioxidant, and antiradical properties. These drugs include fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate.

Therefore, the aim of this work is to study the radioprotective properties of 3-hydroxypyridine fumarate fumarate under the action of gamma radiation and radiation of ¹²C ions on tumor (SK-N-BE neuroblastoma) and normal (hTERT fibroblasts) human cells.

It has been shown that fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate have a radioprotective effect on human fibroblast and neuroblastoma cell lines when exposed to gamma radiation at doses of 1, 4, 6, and 10 Gy. The manifestation of radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate in relation to the action of γ -radiation not only on normal cells, but also on human tumor cells is explained by the fact that the studied preparations do not have selectivity with respect to human fibroblasts.

It has also been shown that the use of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate as radioprotectors does not have a radioprotective effect on tumor cells when they are irradiated with ¹²C ions. This is due to

the high RBE of ion radiation. The data obtained are of great interest, since normal tissues located beyond the Bragg peak can be protected from secondary products of carbon ion therapy (for example, gamma rays), while tumor cells will not be exposed to the radioprotective effect of drugs.

Also in the work, the influence of irradiation, drugs and their combined action on the time of cell doubling was evaluated. The presence of drugs in the control did not increase the doubling time of cells, which confirms previous studies on the absence of toxicity of drugs in the studied concentration. On the contrary, under the action of gamma radiation, the preparations significantly reduced the doubling time of fibroblasts by more than two times at a dose of 10 Gy and the doubling time of neuroblastoma cells by almost 1.5 times. Also, the doubling time of neuroblastoma cells decreased by 1.3 times under the action of ¹²C ions at a dose of 10 Gy.

The data obtained allow us to state that fumaric acid and 3-oxypyridine fumarate exhibit radioprotective properties and can be further investigated as radioprotectors on other types of ionizing radiation, as well as on a wider range of human cell cultures.

Ultimately, this opens up new possibilities for reducing radiation exposure to healthy human tissues, including reducing the damaging effect of secondary products on healthy cells beyond the Bragg peak under the action of carbon ion therapy.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ДОКСОРУБИЦИНА НА КЛЕТОЧНЫЕ ЛИНИИ SK-N-BE(2) И hTERT

Мельникова А.А.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
249040, Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д.1, Российская Федерация
e-mail: angelik_melnikova@mail.ru

Данное исследование посвящено изучению эффектов комбинированного взаимодействия антибиотика антрациклинового ряда и ионов ^{12}C клеточной линии нейробластомы человека. Микроокружение опухоли играет важную роль в прогрессии и метастазировании. Оно включает в себя строму с фибробластами и эндотелиальными клетками сосудов. В связи с этим в рамках исследования дополнительно была выбрана клеточная линия фибробластов человека для цитотоксической оценки влияния химиопрепарата на здоровые клетки. В ходе проведения исследования получены новые результаты о проявлении синергического характера применяемых агентов на опухолевых клетках *in vitro*, что имеет важное практическое и теоретическое значение для понимания механизма сочетанного воздействия ионизирующего излучения и химиопрепарата доксорубицина.

Ключевые слова: адронная терапия, ионы углерода, доксорубицин, синергизм, клеточные линии, фибробласты человека, нейробластома

Введение

Нейробластома является распространенным онкологическим заболеванием детского возраста, имеющим значительный риск смерти. Эта солидная опухоль проявляет различное клиническое поведение, варьирующееся от спонтанной регрессии до широко распространенного метастатического заболевания. Отсутствие многообещающих методов лечения требует новых исследовательских подходов, которые могут улучшить понимание молекулярной основы нейробластомы.

В настоящее время острой задачей экспериментальной и медицинской радиологии является поиск новых перспективных методов лечения опухолевых заболеваний. Доксорубицин относится к группе противоопухолевых лекарственных средств антрациклинового ряда и является одним из самых востребованных в медицине антибиотиком, применяемым в лечении онкологических заболеваний [1].

Доксорубицин применяется в протоколах лечения гиперплоидных опухолей, нейробластом групп низкого и промежуточного риска, и может сочетаться с циклофосфамидом, карбоплатином и этопозидом, а также в комбинации с лучевой терапией.

Для лечения детей с 4S стадией (является уникальной и гетерогенной метастатической формой нейробластомы) предложено множество химиотерапевтических режимов, включающих монотерапию циклофосфамидом, комбинацию карбоплатин/этопозид, циклофосфамид/доксорубицин/винкристин.

Препараты используют в минимально эффективных дозах с пересчетом на вес пациентов для того, чтобы избежать развития острых и отдаленных побочных эффектов лечения. В протоколе COG-P9641, где проанализированы данные 90 таких пациентов, 5-летняя общая выживаемость и бессобытийная выживаемость составила 91% и 77% соответственно [2].

Целью научно-исследовательской работы является выявление закономерностей комбинированного действия ионизирующего излучения (ионы ^{12}C) и противоопухолевого антибиотика антрациклинового ряда на опухолевых и неопухолевых клетках человека.

Материалы и методы

Клетки культивировали в пластиковых культуральных флаконах (Corning, США) в виде монослоя в полной питательной среде DMEM (ПанЭко, Россия), содержащей 10 % фетальной сыворотки крупного рогатого скота (Gibco, USA), пенициллин (50000 ед/л) («ПанЭко», РФ), стрептомицин (50 мг/л) («ПанЭко», Россия) и глютамин (292 мг/л) («ПанЭко», Россия). Поддерживали жизнеспособность культур в CO_2 -инкубаторе (CB 53 Binder, Германия), при 5 % содержания CO_2 .

Облучение ионами ^{12}C проводили на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий (ИФВЭ) ФГБУ ГНЦ РФ «Курчатовский институт» (г. Протвино). Облучение осуществлялось в водном фантоме со средней энергией 450 МэВ/ нуклон. Средняя ЛПЭ

излучения на начальном участке составила 11 кэВ/мкм, в пике 120–140 кэВ/мкм.

В ходе работы проводили тест на колониеобразование, который представляет собой оценку выживаемости клеток *in vitro* и отражает выживаемость клеток после воздействия ионизирующего излучения и цитотоксических средств. При проведении экспериментальной работы оценивалось влияние химиопрепарата доксорубина на исследуемые клеточные линии по показателю – время удвоения. Для описания выживаемости клеточных культур, а также генетических и канцерогенных эффектов совместного действия ионизирующего излучения и повреждающих факторов существует концепция синергизма.

Заключение

В ходе проведенной научно-исследовательской работы дана оценка влияния антибиотика антрацилинового ряда доксорубина на исследуемых клеточных линиях. Для клеток фибробластов человека линии hTERT действие доксорубина оказывает выраженное цитотоксическое действие и проявляется в виде двукратного увеличения времени, за которое популяция клеток увеличится вдвое.

Продемонстрировано, что комбинированное действие тяжелых ионов и доксорубина на клетки нейробластомы носит антагонистический характер

при дозах 1 и 2 Гр. Причина такой зависимости может заключаться в формировании летальных и сублетальных повреждений преимущественно только посредством воздействия доксорубина.

Проанализированы результаты предыдущих исследований на опухолевых клетках аденокарциномы молочной железы линии MCF-7, гепатокарциномы линии HUH-7, а также клетках рака шейки матки Hela. Показано, что клетки нейробластомы наиболее устойчивы к тяжелым ионам углерода и доксорубину по показателю клоногенной активности, времени удвоения по сравнению с остальными злокачественными клетками.

Список литературы

Рукавицын О.А., Поп В. П. Современные возможности применения пегилированного липосомального доксорубина (келикс) в онкогематологии // Онкогематология. 2008. Т. 3 (1-2). С. 75–84.

Urtasun A., Olivera G.G., Sendra L. et al. Pharmacogenetics in Neuroblastoma: What Can Already Be Clinically Implemented and What Is Coming Next? // Int J Mol Sci. 2021. Vol. 22(18):9815. DOI:10.3390/ijms22189815.

Петин В. Г., Жураковская Г. П., Комарова Л. Н. Радиобиологические основы синергических взаимодействий в биосфере. Москва: ГЕОС. 2012. 219 с.

ANALYSIS OF THE USE OF THE COMBINED ACTION OF HEAVY CHARGED PARTICLES AND DOXORUBICIN ON SK-N-BE(2) AND hTERT CELL LINES

Melnikova A.A.

Obninsk Institute of Atomic Energy of the National Research University MEPhI, Obninsk, Russian Federation

This research is devoted to the study of the effects of the combined interaction of anthracycline antibiotics and ^{12}C ions of the human neuroblastoma cell line. The tumor microenvironment plays an important role in progression and metastasis. It includes a stroma with fibroblasts and vascular endothelial cells. In this regard, as part of the study, a human fibroblast cell line was additionally selected for cytotoxic evaluation of the effect of the chemotherapy drug on healthy cells. In the course of the study, new results were obtained on the manifestation of the synergistic nature of the agents used on tumor cells *in vitro*, which is of great practical and theoretical importance for understanding the mechanism of the combined effects of ionizing radiation and the chemotherapy drug doxorubicin.

Keywords: *hadron therapy, carbon ions, doxorubicin, synergism, cell lines, human fibroblasts, neuroblastoma*

Neuroblastoma is a common childhood cancer with a significant risk of death. This solid tumor exhibits various clinical behaviors ranging from spontaneous regression to widespread metastatic disease. The lack of promising treatments requires new research approaches that can improve understanding of the molecular basis of neuroblastoma. Doxorubicin is used in protocols for the treatment of hyperploid tumors, neuroblastoma of low and intermediate risk groups, and can be combined with cyclophosphamide, carboplatin and

etoposide, as well as in combination with radiation therapy.

The object of the study was the SKIN-BE(2) cell line (neuroblastoma). The aim of the work was to identify the regularities of the combined action of ionizing radiation (^{12}C ions) and an antitumor antibiotic of the anthracycline series on human tumor cells.

The research assessed the effect of the anthracycline antibiotic doxorubicin on the studied cell lines. For human fibroblast cells of the hTERT line, the effect of doxorubicin has a pronounced cytotoxic effect and

manifests itself in the form of a two-fold increase in time, during which the cell population will double.

It has been demonstrated that the combined effect of heavy ions and doxorubicin on neuroblastoma cells is antagonistic at doses of 1 and 2 Gy. The reason for this dependence may be the formation of lethal and sublethal injuries mainly only through the effects of doxorubicin.

The results of previous studies on breast adenocarcinoma tumor cells of the MCF-7 line, hepatocarcinoma of the HUH-7 line, as well as Hela cervical cancer cells were analyzed. It has been shown that neuroblastoma cells are most resistant to heavy carbon ions and doxorubicin in terms of clonogenic activity, doubling time compared to other malignant cells.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШТАММА *Bacillus subtilis* 168 pNKlexA ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ГЕНОТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВЕ (НА ПРИМЕРЕ ПОЧВ О. ОЛЕНЕВСКИЙ)

Степанова Е. А., Рассказова М. М., Манухов И. В., Новоятлова У.С.

МБОУ «СОШ №11 им. Подольских курсантов» г. Обнинска,
Калужская область, г. Обнинск, ул. Комарова, дом 10, Российская Федерация
e-mail: school11obn@mail.ru

Была проведена проверка эффективности биосенсорного штамма *Bacillus subtilis* 168 pNKlexA при измерении токсикантов в почве в полевых условиях (на примере почв о. Оленевский). В работе использовался цельноклеточный lux-биосенсор на основе почвенной типовой грамположительной бактерии *B. subtilis* 168. Исследуемый биосенсорный штамм *B. subtilis* 168 pNKlexA сконструирован в лаборатории молекулярной генетики МФТИ. Он содержит в себе плазмиду с генами люминесценции *luxABCDE* из *Photobacterium luminescens* с измененной последовательностью генов под контролем промотора к гену *upeA*. В качестве контрольных генотоксичных веществ использовались: Mitomycin C, перекись водорода и метилметансульфат. Было выявлено, что биосенсорный штамм *Bacillus subtilis* 168 pNKlexA можно потенциально использовать для детекции генотоксичных веществ в почве с поправкой на экранирование люминесценции более темными почвенными частицами. Наибольшую чувствительность изучаемый штамм проявляет к таким токсичным агентам, как Mitomycin C и перекиси водорода.

Ключевые слова: молекулярная генетика, биосенсорный штамм, биосенсор, генно-модифицированная плазмида, гены люминесценции, генотоксичные вещества, повреждения ДНК, SOS-ответ, почвы

Преимущество биосенсоров перед другими методами определения наличия загрязняющих веществ в том, что они проще и быстрее в эксплуатации, экономически выгоднее. Подобные lux-биосенсоры применяются в областях генетической инженерии и биотехнологии, пищевой промышленности, а также в качестве детектора токсических агентов [1].

Цель работы: проверка эффективности биосенсорного штамма *Bacillus subtilis* 168 pNKlexA при измерении токсикантов в почве в полевых условиях (на примере почв о. Оленевский). Также была исследована применимость биосенсора для детекции окисляющих и алкилирующих агентов. Подобную работу была выполнена мной в 2021 году, но с другим биосенсорным штаммом - *Bacillus subtilis* 168 pNKdinC [2].

В работе использовался цельноклеточный lux-биосенсор на основе почвенной типовой грамположительной бактерии *B. subtilis* 168. Исследуемый биосенсорный штамм *B. subtilis* 168 pNKlexA сконструирован в лаборатории молекулярной генетики МФТИ. Он содержит в себе плазмиду (рис. 1) с генами люминесценции *luxABCDE* из *Photobacterium luminescens* с измененной последовательностью

генов под контролем промотора к гену *upeA*, индуцирующегося при повреждениях ДНК.

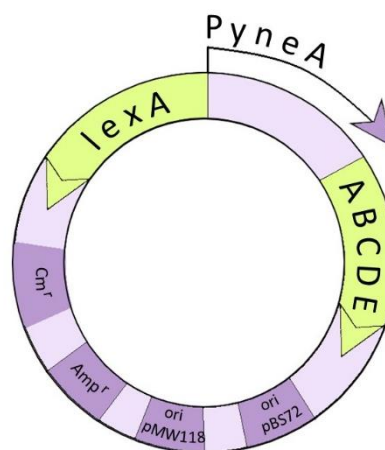


Рисунок 1. Карта плазмиды pNKlexA

В качестве контрольных генотоксичных веществ использовались: Mitomycin C (MitC), который приводит к образованию внутринитевых и межнитевых

сшивок ДНК; перекись водорода (НР) – окисляющий агент, который в том числе приводит к окислению ДНК; метилметансульфанат (ММС), который вызывает алкилирование ДНК. Измерения люминесценции проводились на люминометре БИОТОКС-7.

Отбор проб и исследования проводились на базе научно-исследовательской экспедиции «Полярный круг 2022» на о. Оленевский (Чернореченская губа, Кандалакшский залив, Белое море) в рамках проекта «Молодёжные образовательные экспедиции» в июле 2022 года [4].

Исследования показали, что биосенсорный штамм *B. subtilis* 168 рНКlexA можно эффективно использовать для исследований почвы с поправкой на рассеивание и поглощение света частицами почвы. Так, например, мы можем наблюдать (рис. 2), что показатели у биосенсорных клеток с добавлением гумусной почвы из леса (№3), у биосенсорных клеток с

добавлением гумусной почвы из леса и Mitomycin C в концентрации 10^{-6} М (№3+MitC -6) сравнительно ниже показателей других образцов, так как частицы гумусной почвы больше и темнее, следовательно, их светопоглощающая способность выше. Подобные различия биосенсорных клеток с добавлением разных почв объясняется разницей в количестве и размере почвенных частиц в исследуемых пробах.

Следует отметить, что несмотря на экранирование люминесценции почвенными частичками, амплитуда ответа биосенсора составляет как минимум 9,2 раз, что является достаточным для определения генотоксичных соединений непосредственно в почве.

В ходе исследования было выявлено, что наибольшую чувствительность изучаемый штамм проявляет к Mitomycin C и слабую чувствительность к перекиси водорода (НР), что подтверждает высокая амплитуда ответа – 100,8 и 14,3 раз соответственно.

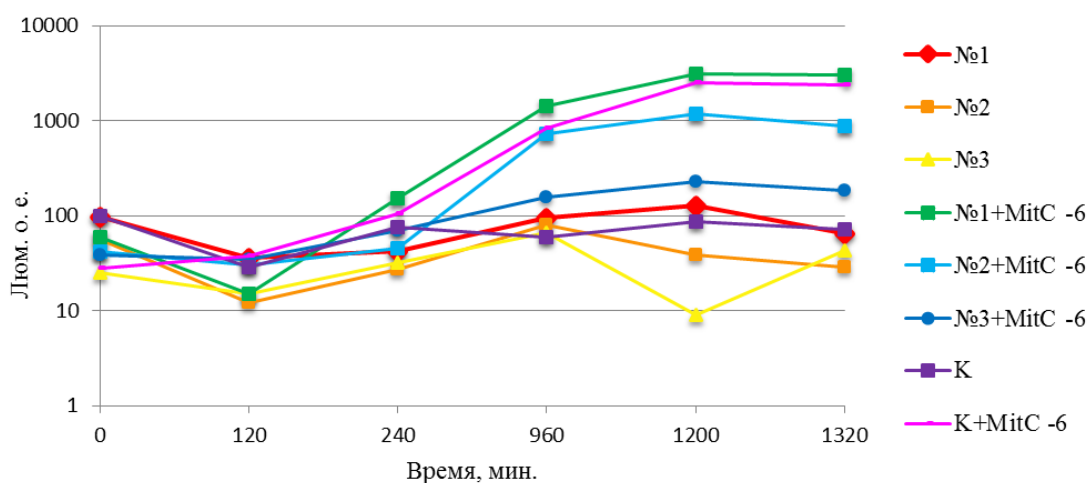


Рисунок 2. Графики зависимости люминесценции от времени

К – отрицательный контроль, т. е. биосенсорные клетки; К+MitC -6 – биосенсорные клетки с добавлением Mitomycin C в концентрации 10^{-6} М. Значения вычислены с учётом фоновых значений люминесценции.

Таким образом, биосенсорный штамм *Bacillus subtilis* 168 рНКlexA можно потенциально использовать для детекции генотоксичных веществ в почве с поправкой на экранирование люминесценции более темными почвенными частицами. Было выявлено, что наибольшую чувствительность изучаемый штамм проявляет к таким токсичным агентам, как Mitomycin C и перекиси водорода.

Список литературы

1. Jouanneau S., Durand M.J., Thouand G. Online detection of metals in environmental samples: Comparing two concepts of bioluminescent bacterial biosensors // Environ. Sci. Technol, 2012.
2. A. G. Kessenikh, U. S. Novoyatlova, S. V. Bazhenov, E. A. et al/ «Constructing of Bacillus subtilis-Based Lux-Biosensors with the Use of Stress-Inducible Promoters», International Journal of Molecular Sciences, 2021.
3. Проект «Молодёжные образовательные экспедиции» - <https://www.expeditions.ru>.

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ УЧАСТКА РЕКИ ИПУТЬ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ СЛЕДА АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Суворова С.Ю., Рассказова М.М.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Калужская область, г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация
e-mail: svetlanasuvorova2000@rambler.ru

Создана база данных (БД) состояния водной экосистемы участка реки Ипуть, протекающей в Брянской области в районе следа аварии на ЧАЭС. БД содержит информацию о маршруте мероприятий по радиоэкологическому мониторингу, полное гидробиотическое описание исследуемых участков, данные об определенных таксономических группах макрозообентоса, значения мощностей амбиентного эквивалента доз, значения удельной активности ^{137}Cs в грунте и показатели фертильности пыльцы сусака зонтичного (*Butomus umbellatus*).

Ключевые слова: база данных, радиоэкологический мониторинг, радионуклидное загрязнение, ЧАЭС, водная биота

Проведение радиоэкологического мониторинга требует создания соответствующей базы данных, назначением которой является не только компактное хранение полученных данных, но и использование в вопросах радиационно-экологической безопасности и мероприятиях по восстановлению территорий, пострадавших в результате радионуклидного загрязнения. Накопление данных по радиационному воздействию на биоту и применение современных методик обработки и анализа позволяет устанавливать оценки допустимых дозовых нагрузок и улучшать методические подходы к радиационному нормированию защиты окружающей среды [1].

В БД были занесены данные полевых и лабораторных исследований, проводимых в рамках биомониторинговых экспедиций по участку реки Ипуть. Информация представлена сведениями о маршруте экспедиции, значениями измеренных мощностей амбиентного эквивалента доз, описанием видового разнообразия высшей водной и прибрежной растительности и макрозообентоса, данными о фертильности исследуемого растения сусака зонтичного (*Butomus umbellatus*) и удельными значениями ^{137}Cs в грунте.

База создана с использованием системы управления базами данных (СУБД) Microsoft Access 2016. Основными объектами БД являются таблицы для хранения информации, на основе которых создаются формы, запросы и отчеты, упрощающие работу с массивами данных. Связи между таблицами имеют вид

«один ко многим», что является самым удобным и функциональным видом связей в реляционной модели баз данных. Информация БД в среде Microsoft Access хранится в одном файле, что упрощает хранение и передачу данных. Структура базы данных водной экосистемы участка реки Ипуть Брянской области в районе следа аварии на ЧАЭС представлена на рис. 1.

Анализ имеющейся в БД информации позволил определить, что показатели мощности гамма-излучения на исследуемом участке реки не снижаются существенно, а в речной экосистеме наблюдается тенденция к смене доминирующих таксономических групп макрозообентоса. Анализ соотношения фертильной и стерильной пыльцы сусака зонтичного (*Butomus umbellatus*) показал, что фертильность пыльцы варьирует в диапазоне 50–80 %. По результатам гидробиотического описания половина исследуемых ценозообразующих видов сохранила свои показатели жизнеспособности и обилия на высоком уровне. Таким образом, можно судить о сохранении видового состава и устойчивости фитоценоза.

Информация представленной базы данных может быть использована в других исследованиях. Она также имеет большой потенциал при ежегодном пополнении новой информацией, что в результате позволит провести оценку изменения состояния данного участка реки Ипуть на протяжении нескольких лет.

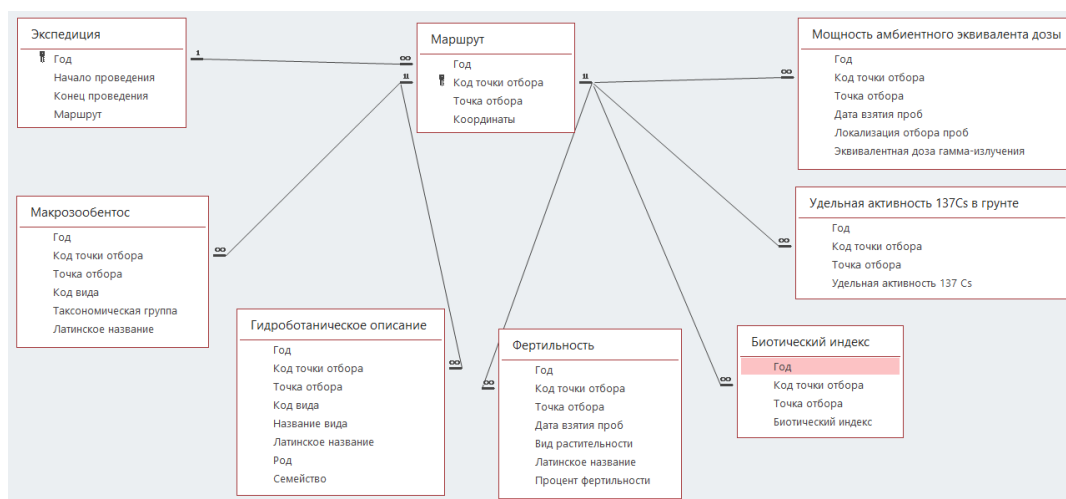


Рисунок 1. Схема данных созданной БД

Данные, представленные в БД, могут быть хорошим материалом для радиоэкологического мониторинга и оценки радиационных рисков, а выбранный участок реки Ипуть может быть представлен как модельный объект восстановления водной и прибрежной экосистемы.

Список литературы

1. Удалова А.А., Гераськин С.А., Дубынина М.А. База данных по действию ионизирующих излучений на растения: опыт создания и перспективы использования / Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. № 5, т. 52. С. 517–533.

УДК 502/504

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ Fe, Zn, Mn ВНУТРИ ОДНОГО СОРТА С/Х КУЛЬТУРЫ НА ПРИМЕРЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА СОРТА «НАДИН АГРО»

Шупик Д.А.¹, Лукашенко С.Н.², Рассказова М.М.¹

¹ МБОУ «Средняя общеобразовательная школа №11», г. Обнинск, Россия, e-mail: denisshupik2007@gmail.com

² ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», г. Обнинск, Россия

В статье представлены результаты исследования вариабельности накопления Fe, Zn, Mn внутри одного сорта с/х культуры на примере листового салата сорта «Надин Агро», обусловленного индивидуальными особенностями. Показано, что величину коэффициентов накопления можно представить в следующем ряду: Fe < Zn < Mn. Минимальные значения коэффициентов накопления Fe, Mn, Zn отличаются от максимальных в 2,1, 7,8 и 7,5 раз. Диапазоны коэффициентов накопления листовым салатом при гидропонном выращивании составляют 0,18-2,3 для Fe, 9,0-70 для Mn и 1,5-12 для Zn.

Ключевые слова: Fe, Zn, Mn, коэффициент накопления, листовый салат, гидропонное выращивание

Введение

Минеральное питание является основой для роста и развития живых организмов. Однако, в большом количестве тяжелые металлы (ТМ), являются токсичными для всех живых организмов. Поэтому изучение миграции таких элементов по трофическим путям, является важной экологической задачей, одна из

которых - накопление микроэлементов растениями [1,2].

Несмотря на множество работ, посвященных изучению аккумуляции микро и макроэлементов растениями [3-8], четкого понимания границ возможного накопления металлов внутри одного определённого вида нет.

Цель настоящей работы изучить вариабельность накопления Fe, Zn, Mn внутри одного сорта с/х культуры на примере листового салата сорта «Надин Агро», обусловленного индивидуальными особенностями.

Материалы и методы

Исследование вариабельности накопления Fe, Zn, Mn растениями проводили при гидропонном выращивании на растворе Кнопа с концентрацией Fe 50 мг/л, Mn – 3,6 мг/л, Zn – 8,05 мг/л. По окончании вегетационного периода надземную часть салата срезали ножницами, промывали водопроводной водой, ополаскивали дистиллированной водой и высушивали при 75°C. Высушенные растения растворяли азотной кислотой. Анализ проб проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Liberty Ax Series II.

Результаты и их обсуждение

Для оценки параметров переноса использовали коэффициент накопления (Кн), рассчитанный как отношение содержания элементов в сухой биомассе растений (мг/кг) к содержанию их в питательном растворе (мг/л). Расчетные данные Кн представлены на рисунке 1.

Полученные результаты показывают, что диапазоны Кн листовым салатом составляют 0,18–2,3, при среднем значении 1,0 для Fe, 9,0–31, при среднем значении 25 для Mn и 1,5–6,2, при среднем значении 4,7 для Zn. Следовательно, Кн рассматриваемых тяжелых металлов листовым салатом располагаются в следующем ряду: Fe < Zn < Mn.

В литературных данных крайне мало работ по Кн данных элементов при выращивании гидропонным методом, что делает затруднительным анализ полученных данных. Тем не менее есть несколько работ для которых расчетные Кн (Fe) ячменем составляют 1,6–61, при среднем значении 19 [14], для листового салата среднее значение Кн (Fe) оценивается в 11 [15].

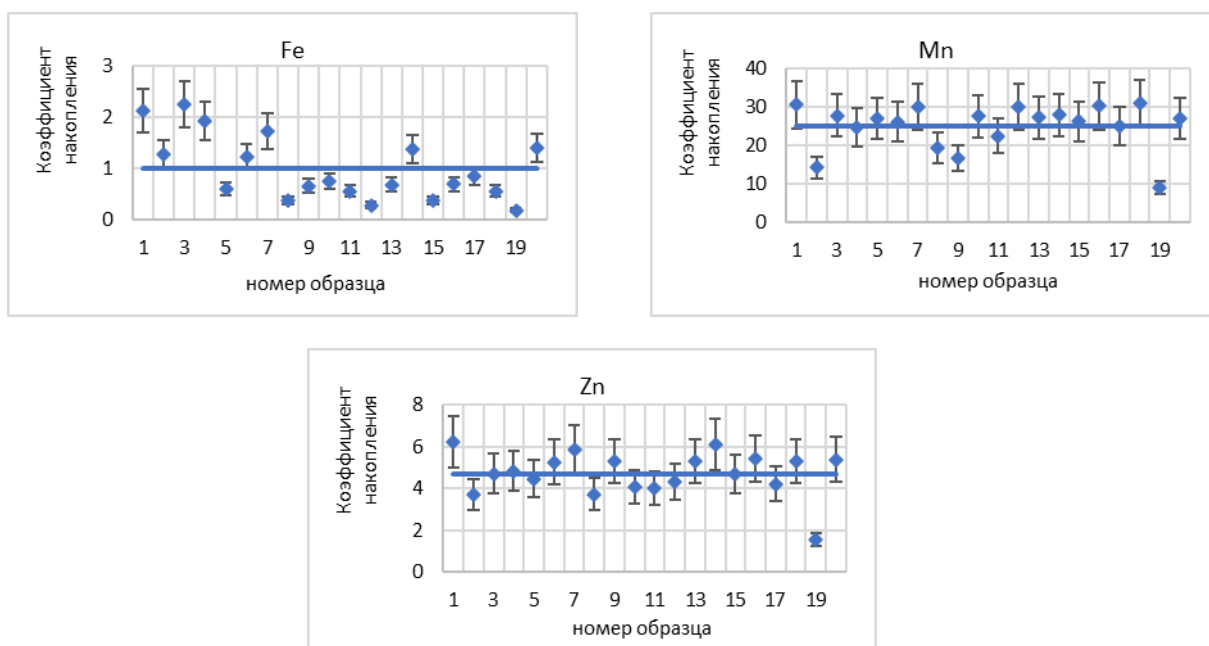


Рисунок 1. Коэффициенты накопления Fe, Mn, Zn листовым салатом

Для анализа полученных данных в настоящей работе были рассмотрены распределения частоты встречаемости значений концентраций рассматриваемых тяжелых металлов (рисунок 2).

Распределение частоты встречаемости имеет вид близкий к нормальному распределению, наиболее часто встречающегося в природе.

Вид распределения Кн(Fe) имеет более широкую площадь. Четко выражены границы моды в 0,5–1,0. Размах выборки составляет 2,1. Минимальное

значение отличается от его максимальных значений в 13 раз. Среднее арифметическое не входит в границы моды, но находится очень близко к ее верхней границе, составляя 1,1.

Площадь распределения Кн(Mn) уже, чем для Fe. Границы моды определяются в 20–30, среднее значение, равное 27, входит в границы моды. Размах выборки составляет 61. Минимальное значение меньше максимального в 7,8 раз.

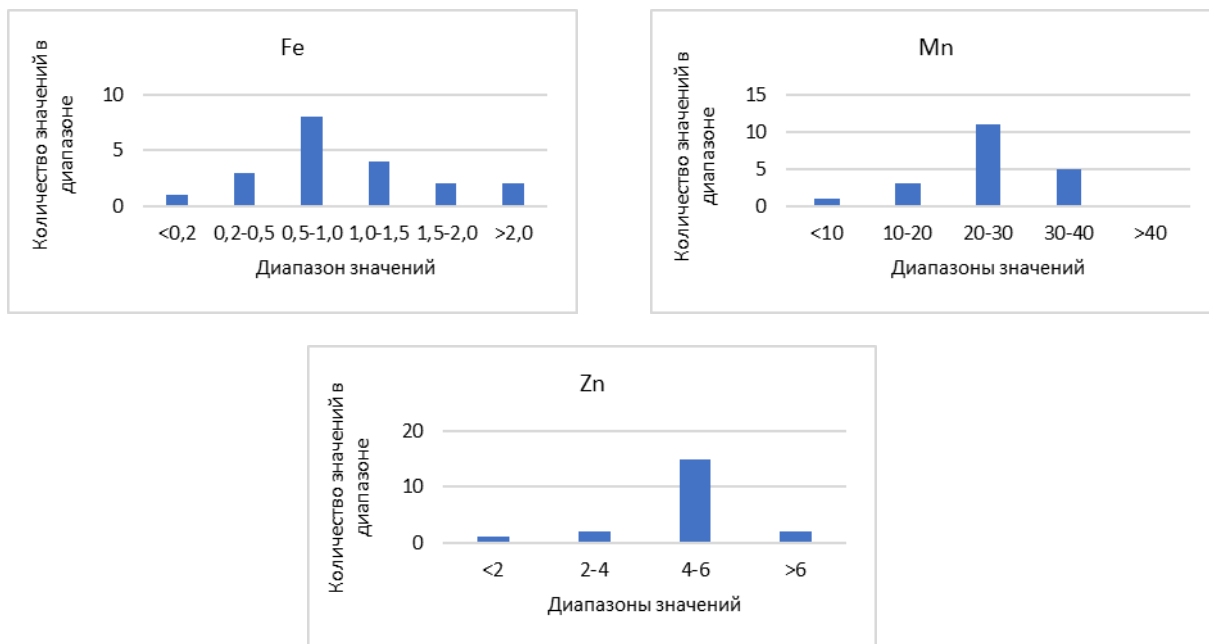


Рисунок 2. Распределение частоты встречаемости значений коэффициентов накопления Fe, Mn, Zn листовым салатом

Вид распределения Кн(Zn) имеет ярко выраженный пик моды в 4,0-6,0. Среднее значение в 5,1 входит в границу моды. Размах выборки составляет 10. Минимальное значение меньше максимального в 7,5 раз.

Несмотря на наименьшую вариабельность Кн(Fe), значения Кн более равномерно представлены по всему диапазону. Совершенно другая картина наблюдается у Zn. При большем размахе выборки, прослеживаются четкие границы моды, включающие 71 % всех значений Кн(Zn).

Заключение

Таким образом, диапазоны Кн тяжелых металлов листовым салатом при гидропонном выращивании составляют 0,18–2,3, при среднем значении 1,1 для Fe, 9,0-70, при среднем значении 27 для Mn и 1,5-12, при среднем значении 5,1 для Zn.

Среднее арифметическое значение Кн(Fe) не входит в границы моды в 0,5-1,0, но находится очень близко к ее верхней границе, составляя 1,1.

Границы моды Кн(Mn) составляют в 20-30, среднее значение, равное 27, входит в границы моды.

Вид распределения Кн цинка имеет ярко выраженный пик моды в значениях 4,0-6,0, включающие 71 % всех значений Кн(Zn). Среднее значение в 5,1 входит в границу моды.

Величина Кн рассматриваемых тяжелых металлов внутри одного сорта с/х культуры, обусловленная индивидуальными особенностями располагается в следующем ряду: Fe < Zn < Mn. Минимальные

значения коэффициентов накопления Fe, Mn, Zn отличаются от максимальных в 2,1, 7,8 и 7,5 раз.

Список литературы

1. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
2. Медведев И.Ф., Деревягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах / Саратов: «Ракурс», 2017. 178 с.
3. Торшин С.П. Влияние естественных и антропогенных факторов на формирование микроэлементного состава продукции растениеводства. Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.б.н. Москва, 1998. 34 с.
4. Битюцкий Н. Микроэлементы высших растений. Litres, 2022.
5. Дмитриева Г., Кузнецов В. Физиология растений в 2 т. Том 2 4-е изд., пер. и доп. Учебник для академического бакалавриата. Litres, 2022.
6. Голубкина Н.А., Агафонов А.Ф., Дудченко Н.С. Содержание микроэлементов в многолетних луках //Гавриш. 2009. №. 5. С. 18–21.
7. Симонова О.А., Симонов М.В., Товстик Е.В. Сортовые особенности биоаккумуляции железа в растениях ячменя //Таврический вестник аграрной науки. 2020. №. 3. С. 142–151.
8. Олива Т.В. и др. Экологизация тепличного производства салата на беспочвенном субстрате с использованием системы капельного полива //Современные проблемы науки и образования. 2014. №. 6. С. 1644–1644.

ACCUMULATION VARIABILITY OF Fe, Zn, Mn WITHIN A SAME VARIETIES OF AGRICULTURAL CROPS ON THE EXAMPLE OF LEAFY SALAD VARIETIES "NADIN AGRO"

Shupyk D.A.¹, Lukashenko S.N.², Rasskazova M.M.¹

¹Secondary school No. 11, Obninsk, Russian Federation,

²Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russian Federation

The article presents the results of the accumulation variability of Fe, Zn, Mn within same variety of agricultural crops on the example of leafy salad variety "Nadin Agro", due to individual characteristics. It is shown that the variability of the transfer factor is in the following series: Fe < Zn < Mn. The minimum values of Fe, Mn, Zn transfer factors differ from the maximum by 2.1, 7.8 and 7.5 times. The ranges of transfer factors in hydroponic cultivation are 0.18-2.3 for Fe, 9.0-70 for Mn and 1.5-12 for Zn.

Keywords: Fe, Zn, Mn, transfer factor, leafy SALAD, hydroponic cultivation

1. Introduction. Mineral nutrition is the basis for the growth and development of living organisms. However, in large quantities, heavy metals (HM) are toxic to all living organisms. Therefore, the study of the migration of HM along trophic routes is an important ecological task, one of which is the accumulation of trace elements by plants [1, 2]. Despite the many works devoted to the study of the accumulation of micro and macro elements by plants [3-8], there is no clear understanding of the boundaries of the possible accumulation of metals within one particular species. The purpose of this work is to study the variability in the accumulation of Fe, Zn, Mn within same variety of agricultural crops on the example of leafy salad variety "Nadin Agro", due to individual characteristics.

2. Materials and methods. The study of the variability of the accumulation of Fe, Zn, Mn by plants was carried out during hydroponic cultivation on a Knop solution with a concentration of Fe 50 mg/l, Mn - 3.6 mg/l, Zn - 8.05 mg/l. At the end of the growing season, the

aerial part was cut, washed with tap water, rinsed with distilled water, and dried at 75°C. Dried plants were dissolved with nitric acid. Samples were analyzed by inductively coupled plasma atomic absorption spectrometry on a Liberty Ax Series II spectrometer.

3. Results and discussion. To assess the transfer parameters, we used the transfer factor (TF). The obtained results are show that the ranges of TF are 0.18-2.3, with an average of 1.0 for Fe, 9.0-31, with an average of 25 for Mn, and 1.5-6.2, with an average of 4.7 for Zn. The frequency distribution has a form close to the normal distribution, the most common in nature. The minimum TF values of Fe, Mn, Zn differ from the maximum by 2.1, 7.8 and 7.5 times.

4. Conclusion. The TF ranges for heavy metals in hydroponically grown leafy salad are 0.18-2.3 for Fe, 9.0-70 for Mn and 1.5-12 for Zn. The variability TF of the considered heavy metals within the same variety of agricultural crops, due to individual characteristics, are in the following series: Fe < Zn < Mn.

Научное издание

Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве

Сборник докладов
I Международной молодежной конференции
(Обнинск, 18-21 октября 2022 г.)

ISBN 978-5-903386-49-9



Компьютерная верстка Шубина О.А.

Подписано в печать 14.10.2022 г.
Формат 60x90 1/8. Гарнитура PT Sans, AGLetterica.
Усл. печ. л. 35,12. Тираж 350 экз. Заказ № 60.

Издательство ФГБНУ ВНИИРАЭ
249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км
www.rirae.ru