



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ



ДЛЯ СТРАНЫ
И МИРА



КУРЧАТОВСКИЙ
ГЕНОМНЫЙ ФОРУМ **2023**



II Международная молодежная конференция
**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

19-20 октября 2023, Обнинск,
НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ



 **КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ
ДЛЯ СТРАНЫ
И МИРА** **МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**



**КУРЧАТОВСКИЙ
ГЕНОМНЫЙ ФОРУМ**



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

National Research Centre «Kurchatov Institute»
Russian Institute of Radiology and Agroecology
of National Research Centre «Kurchatov Institute»

GENETIC AND RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

**Proceedings
of the 2nd International Young Scientists Conference**

Obninsk, October 19-20, 2023

Obninsk
2023

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Национального исследовательского центра «Курчатowski институт»

Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве

**Сборник докладов
II Международной молодежной конференции**

Обнинск, 19-20 октября 2023 г.

Обнинск
2023

УДК 577+57.04
ББК 28.0
Г 34

Редакционная коллегия:
О.А. Шубина, к.б.н. (*отв. ред.*), **Е.В. Гордиенко**

Г 34 **Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве:** сборник докладов II международной молодежной конференции, Обнинск, 19–20 октября 2023. Обнинск: НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, 2023. – 295 с.: ил.

ISBN 978-5-903386-73-4

В сборнике представлены материалы II международной 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. В 2023 году конференция проходит на площадке Курчатовского геномного форума (КурчатовГенТех-2023), одного из ключевых мероприятий Международного форума природоподобных технологий. 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 2nd International Young Scientists Conference, Obninsk, October 19-20, 2023. Obninsk: NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE, 2023. – 295 p.

The collection contains materials from the 2nd 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 978-5-903386-73-4

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, 2023
© Авторы, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Секция	
ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	14
<i>Анисимова Е.А., Миргазов Д.А., Додонова Е.А., Панкова Е.В., Осянин К.А.</i> МАРКЕРНЫЕ ЛОКУСЫ ГЕНОМА <i>BRUCELLA</i> SPP. ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БРУЦЕЛЛЕЗА МЕЛКОГО РОГАТОГО СКОТА МЕТОДОМ ПЦР В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ	15
<i>Афонникова С.Д., Киселёва А.А., Федяева А.В., Афонников Д.А., Салина Е.А.</i> ПОЛНОГЕНОМНЫЙ АНАЛИЗ АССОЦИАЦИЙ ПРИЗНАКОВ ПРЕДУБОРОЧНОГО ПРОРАСТАНИЯ И ЦВЕТА ЗЕРНА У ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ	17
<i>Белова Н.И., Василик М.П., Федореева Л.И.</i> ВЛИЯНИЕ СТРЕССОВЫХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПРЕССИЮ ЦИТОЗИНОВЫХ МЕТИЛТРАНСФЕРАЗ В ПШЕНИЦЕ (<i>TRITICUM AESTIVUM</i>)	19
<i>Битаршивили С.В., Самад С., Болдырев С.В., Бен С., Волкова П.Ю., Бондаренко Е.В.</i> ВЫЯВЛЕНИЕ МАРКЕРОВ ИНФЕКЦИИ <i>COLLETOTRICHUM LUPINI</i> У ЛЮПИНА БЕЛОГО С ПОМОЩЬЮ МЕТАБОЛОМНОГО АНАЛИЗА	21
<i>Болотина А.А., Полховская Е.С., Киров И.В.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА VIGS В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГЕНОМИКЕ ОДНОДОЛЬНЫХ И ДВУДОЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ	24
<i>Ветох А.Н., Котова Т.О., Ларионова П.В., Волкова Н.А.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ SNP, СВЯЗАННЫХ С МЯСНОЙ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ У МОЛОДНЯКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ	26
<i>Власова А.В., Камараули Е.Д., Перевозчиков Д.В., Киров И.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ VIGS	28
<i>Гайсина Э.М., Тешич С., Кырова Е.И., Никитинская Е., Никитинский Д., Игнатов А.Н.</i> СООТНОШЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ЦИТОХРОМОВ P450 И СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ФИТОПАТОГЕННЫХ БАКТЕРИЙ РОДА <i>XANTHOMONAS</i>	30
<i>Горбунова М.Е., Шангараев Р.И., Хаммадов Н.И., Усольцев К.В.</i> ПОИСК ГЕНЕТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВИРУСА ЛЕЙКОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПО ГЕНУ GAG	31
<i>Груздев И.В., Москалев Е.А., Соловьев А.А., Киров И.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ NMW-GS ДЛЯ ОТБОРА КОНСТАНТНЫХ ФОРМ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ	34
<i>Душкин В.А., Клименко И.А.</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ SRAP-МАРКЕРОВ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕЛОГО ЛЮПИНА	36
<i>Егорова А.А., Зыкова Т.Е., Сабоев И.А., Костина Н.Е., Колошина К.А., Хоффи И., Хикель Ш., Хертиг К., Чамас С., Филипенко Е.А., Кумлен Й., Герасимова С.В., Кочетов А.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНОМНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ ДЛЯ НОКАУТА ГЕНА ВАКУОЛЯРНОЙ ИНВЕРТАЗЫ И ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ К ХОЛОДОВОМУ ОСАХАРИВАНИЮ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ	38
<i>Ефремова Д.О., Кротова О.Е.</i> ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ В РАЦИОНЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПТИЦ	40
<i>Ивахненко А.С., Киров И.В.</i> ДЕТЕКЦИЯ ВНЕХРОМОСОМНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МОЛЕКУЛ ДНК (вкДНК) ТРАНСПОЗОНОВ РАПСА (<i>BRASSICA NAPUS</i>)	43
<i>Казанцев М.Ю., Меркулов П.Ю., Абрамова А.С., Демурич Я.Н., Киров И.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛОМА ПОДСОЛНЕЧНИКОВ <i>HELIANTHUS ANNUUS</i> L., ПОДВЕРГНУТЫХ АКТИВАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕНОМЕ	45

<i>Камараули Е.Д., Власова А.В., Перевозчиков Д.В., Киров И.В.</i> ВИРУС-ИНДУЦИРОВАННЫЙ САЙЛЕНСИНГ ГЕНОВ, ВОВЛЕЧЕННЫХ В ПУТИ РНК-ЗАВИСИМОГО МЕТИЛИРОВАНИЯ ДНК У <i>ARABIDOPSIS THALIANA</i>	46
<i>Карабанов С.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ <i>BIFIDOBACTERIUM ADOLESCENTIS</i> НА СОСТАВ КИШЕЧНОЙ МИКРОБИОТЫ МЫШЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СТРЕССА	48
<i>Киров И.В., Казанцев М.Ю., Соловьёв А.А.</i> НА ПУТИ К БИОЛОГИЧЕСКОМУ МУТАГЕНЕЗУ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ СЕЛЕКЦИИ РАСТЕНИЙ	52
<i>Король М.Ю., Бабина Д.Д., Шестерикова Е.М., Празян А.А., Пишенин И.А., Бондаренко Е.В.</i> РОЛЬ СЕНСОРА АПОПЛАСТНОГО H ₂ O ₂ В ОТВЕТЕ <i>ARABIDOPSIS</i> НА ЗАСОЛЕНИЕ И ОСТРОЕ РЕДКОИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	53
<i>Логонова Н.Н., Минина Е.В., Михайлова П.Д., Базанов Т.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ISSR-ПРАЙМЕРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА КОНОПЛИ ПОСЕВНОЙ	56
<i>Макутина В.А., Донник И.М.</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМБРИОНОВ КРС С ЗАДАННЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В ГЕНОМЕ	60
<i>Mardini M., Kazantsev M.Y., Ivoilova E.A., Utkina V.V., Vlasova A.V., Kirov I.V.</i> OPTIMIZING AGROBACTERIUM-MEDIATED PROTOCOL FOR VIRUS INDUCED GENE SILENCING (VIGS) IN SUNFLOWER <i>HELIANTHUS ANNUUS</i>	62
<i>Меркулов П.Ю., Серганова М.А., Петров Г.А., Киров И.В.</i> АКТИВНЫЕ РЕТРОТРАНСПОЗОНЫ <i>SOLANUM LYCOPERSICUM</i> И ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЕ	63
<i>Минина Е.В.</i> ISSR-МАРКЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОРТОВ РЫЖИКА ПОСЕВНОГО	66
<i>Остренко К.С., Овчарова А.Н., Кутьин И.В., Невкрытая Н.В.</i> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОРМОВЫХ ДОБАВОК ЭФИРНЫХ МАСЕЛ КОРИАНДРА ПОСЕВНОГО И ФЕНХЕЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОБИОТЫ РУБЦА ТЕЛЯТ В МОЛОЧНОМ ПЕРИОДЕ	68
<i>Полховская Е.С., Болотина А.А., Соловьёв А.А., Киров И.В.</i> ТРАНСКРИПТОМНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЗЕРНОВКИ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ	72
<i>Polkhovskiy A.V., Eremina M.Yu., Parygina A.D., Kirov I.V.</i> ANALYSIS OF PROTEIN DOMAIN ARCHITECTURE, EVOLUTION AND CELLULAR LOCALIZATION OF <i>ARABIDOPSIS</i> DOMESTICATED GAG PROTEIN	75
<i>Пырских А.С., Крылова Е.В., Солтынская И.В., Гордеева В.Д., Прасолова О.В., Иванова О.Е.</i> АНАЛИЗ МОБИЛЬНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗОЛЯТАХ БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ПРИ ВЕТЕРИНАРНОМ МОНИТОРИНГЕ РЕЗИСТЕНТНОСТИ	76
<i>Саркисян Д.С., Кротова О.Е.</i> НОВЫЕ БИОТЕХНОЛОГИИ В РЫБОВОДСТВЕ И АКВАКУЛЬТУРЕ	78
<i>Саркисян Д.С.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ФЕРМЕНТЫ	81
<i>Sidorov L., Boldyrev S., Baik A., Martynova E., Bondarenko E., Volkova P., Bondarenko V., Lukashevich M., Gentzbittel L., Samad S., Ben C.</i> PROTEOMIC ANALYSIS OF WHITE LUPIN CULTIVARS INFECTED BY COLLETOTRICHUM LUPINI STRAINS TO REVEAL KEY BIOLOGICAL PATHWAYS FOR RESISTANCE TO ANTHRACNOSE	83
<i>Темралеева А.Д., Редькина В.В., Портная Е.А., Дидович С.В., Букин Ю.С.</i> ЦИАНОБАКТЕРИИ КОЛЛЕКЦИИ ACSSI КАК ПРОДУЦЕНТЫ ЦЕННЫХ МЕТАБОЛИТОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА: СИНТЕЗ КУЛЬТУРОМИКИ И ГЕНОМИКИ	87
Секция РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	91
<i>Алакбарова Ш.Э.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА АДЕНИНОВЫХ НУКЛЕОТИДОВ И НИКОТИНОВЫХ КОФЕРМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ХЛОПЧАТНИКА ПРИ РАДИАЦИОННЫХ И СОЛЕВЫХ СТРЕССАХ	92

<i>Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Браун А.В., Хмелевский О.Ю., Ухина П.М., Ипатова В.С., Никитченко А.Д., Черняев А.П., Юров Д.С., Родин И.А.</i>	
СРАВНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАТИВНУЮ СТРУКТУРУ БЕЛКА	95
<i>Зубрицкая Я.В., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Золотов С.А., Ипатова В.С., Чуликова Н.С., Черняев А.П., Малюга А.А., Юров Д.С.</i>	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАРТОФЕЛЯ, ЗАРАЖЕННОГО <i>RHIZOSTONIA SOLANI</i>	98
<i>Иванцова В.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Насибов Э.М., Никитина З.К., Черняев А.П., Юров Д.С.</i>	
ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МЭВ НА РОСТ И ВЫЖИВАЕМОСТЬ БАКТЕРИЙ <i>ESCHERICHIA COLI</i> И ГРИБОВ <i>ASPERGILLUS FUMIGATUS</i>	101
<i>Кайгородова И.М., Марчева М.М., Луканин В.И., Козарь Е.Г., Середин Т.М., Ушаков В.А., Данилейко Ю.К., Белов С.В.</i>	
ВЛИЯНИЕ АКТИВАЦИИ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПЛАЗМОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ЛУКА-БАТУНА	104
<i>Курбангалеев Я.М., Вагин К.Н., Гайнутдинов Т.Р., Усольцев К.В., Идрисов А.М.</i>	
КОНЦЕНТРАЦИЯ БЕЛКОВОСВЯЗАННОГО ЙОДА И ГОРМОНОВ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ В КРОВИ ПРИ ЙОДОДЕФИЦИТНОМ СОСТОЯНИИ КРОЛИКОВ	108
<i>Макаренко Е.С.</i>	
СТЕРИЛЬНОСТЬ ПЫЛЬЦЫ ЛЮПИНА ПРИ ОСТРОМ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	112
<i>Межетова И.Т., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Козлова Е.К., Черняев А.П.</i>	
КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕМОГЛОБИНА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ГОВЯДИНЫ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ	114
<i>Орлов П.М., Аканова Н.И., Ермаков А.А.</i>	
МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ, ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ И ГОДОВОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОЧИХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ	118
<i>Pishenin I.A., Smirnova A.S., Gorbatova I.V., Khanova A.S., Podobed M.Yu., Kazakova E.A., Shesterikova E.M., Babina D.D., Podlutskii M.S., Blinova Ya.A., Volkova P.Yu.</i>	
COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS METABOLITES CONCENTRATIONS IN EREM AND GRIS BARLEY SEEDLINGS IN RESPONSE TO LOW-DOSE GAMMA IRRADIATION	121
<i>Подлуцкий М.С., Воронежская В.С., Волкова П.Ю., Шестерикова Е.М., Король М.Ю., Бабина Д.Д., Блинова Я.А., Подлуцкая А.В., Казакова Е.А.</i>	
ПОИСК И АННОТАЦИЯ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНЫХ ПОЛИМОРФИЗМОВ У РАСТЕНИЙ <i>ARABIDOPSIS THALIANA</i> , ПРОИЗРАСТАВШИХ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ	123
<i>Празян А.А., Шестерикова Е.М., Гераськин С.А.</i>	
ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ РАЗДЕЛЬНОГО И СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И СВИНЦА	126
<i>Смирнова А.С., Празян А.А., Пишенин И.А., Гераськин С.А.</i>	
АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ РАЗДЕЛЬНОГО И СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ И СВИНЦА	129
<i>Ханова А.С., Король М.Ю., Празян А.А., Бабина Д.Д., Бондаренко Е.В.</i>	
АНАЛИЗ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОРОСТКОВ <i>L. ANGUSTIFOLIUS</i> ПОСЛЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН	133
<i>Ханова А.С., Крылова П.С., Бондаренко Е.В.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОРОСТКОВ <i>LUPINUS LUTEUS</i> ПОСЛЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН	137
Секция	
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	141
<i>Алексеев Ю.В., Кругляк А.И., Дорошкевич А.С.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО МУТАГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ	142

<i>Андреанов С.В., Павлов А.Н.</i> НОВЫЕ МЕТОДЫ РОСТРЕГУЛИРОВАНИЯ (ЭТИЛЕН, ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ) В ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ КАРТОФЕЛЯ	144
<i>Басова М.А., Снегирёв А.С., Козьмин Г.В.</i> УЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ СТАБИЛЬНОГО ЙОДА В РАЦИОНЕ КОРОВ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАБОЛИЗМА РАДИОАКТИВНОГО ЙОДА	146
<i>Гайнутдинов Т.Р.</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРОТИВОРАДИАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОИНАКТИВИРОВАННОЙ КУЛЬТУРЫ <i>STARHYLOCOCCUS AUREUS</i>	150
<i>Гусева Ю.Е., Смирнова П.А.</i> ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН САЛАТА (<i>LACTUCA SATIV L.</i>) НА СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА, ФОСФОРА И КАЛИЯ	154
<i>Ивановская Е.С., Гусева Ю.Е.</i> ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА (<i>LACTUCA SATIVA L.</i>)	157
<i>Ильяхин Р.В.</i> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВСХОЖЕСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ	161
<i>Ильяхина Ю.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУХОГО КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА	163
<i>Ипатов В.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Никитченко А.Д., Родин И.А., Хмелевский О.Ю., Черняв А.П., Юров Д.С.</i> ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНОЙ И РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ	166
<i>Кречетов Н.Д., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Золотов С.А., Соколов С.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАРИЯ GEANT4 DNA В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ БИООБЪЕКТОВ И МАТЕРИАЛОВ	170
<i>Кривоногова А.С., Соковнин С.Ю., Исаева А.Г.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ВИДОВ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ	172
<i>Кругляк А.И., Алексеёнок Ю.В., Бакирулы К.Б., Жалбыров А.Е., Аппазов Н.О., Дорошкевич А.С.</i> СЕЛЕКЦИЯ МУТАНТНЫХ ФОРМ СОРТОВ РИСА, УСТОЙЧИВЫХ К СТРЕССОВЫМ ФАКТОРАМ, ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ	175
<i>Кривоногова А.С., Вазиров Р.А., Логинов Е.А.</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНКУБАЦИОННОГО ЯЙЦА ОБЛУЧЕНИЕМ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ	177
<i>Меджидов И.М., Лой Н.Н., Басырова Д.В., Петрухина Д.И., Глущенко Н.В., Харламов В.А.</i> ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИЯ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ, ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ	179
<i>Московская К.А., Лой Н.Н., Сулова О.В., Воробьев М.С.</i> ДВУХФАКТОРНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУ РЕЖИМОМ, ДОЗОЙ ПРЕДПОСЕВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ И КАЧЕСТВЕННЫМИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ УРОЖАЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ	182
<i>Соколов С.А., Антипина Н.А., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Золотов С.А., Кречетов Н.Д., Никитченко А.Д., Николаева А.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПО ГЛУБИНЕ	186
<i>Сулова О.В., Лой Н.Н., Московская К.А., Воробьев М.С.</i> ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ И ПОРАЖЕННОСТЬ БОЛЕЗНЯМИ ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ	188

<i>Чибисова М.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Чуликова Н.С., Малюга А.А., Ипатов В.С., Зубрицкая Я.В., Никитченко А.Д., Черняев А.П., Юров Д.С.</i>	
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВСХОЖЕСТЬ И ФИТОПАТОГЕННЫЙ СТАТУС СЕМЯН	191
<i>Шишко В.И., Петрухина Д.И., Тхорик О.В.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГРИБКОВЫХ ФИТОПАТОГЕНОВ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ	195
Секция	
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ198	
<i>Бабина К.В., Амосова Н.В., Русинов Д.А., Азарова А.Б.</i>	
ИЗМЕНЕНИЕ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ <i>HORDEUM VULGARE</i> L. ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИРКОНА, Р И ДРУГИХ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ	199
<i>Батаева Ю.В., Григорян Л.Н.</i>	
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ АКТИНОБАКТЕРИЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ ДЛЯ БИОЛОГИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ	202
<i>Гусева О.А., Цыгвинцев П.Н., Гончарова Л.И.</i>	
ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО УФ- И ОСТРОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЯЧМЕНЯ ЯРОВОГО	204
<i>Дикарев А.В., Дикарев Д.В.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ЦИНКА И МЕДИ НА ТОКСИЧЕСКИЙ СТРЕСС, ВЫЗВАННЫЙ У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ КАДМИЕМ	207
<i>Евсеев Е.Б.</i>	
ВЫРАЩИВАНИЕ ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР (ГОЛУБИКИ ВЫСОКОРОСЛОЙ И ЖИМОЛОСТИ), КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ЗЕМЕЛЬ	210
<i>Ермакова Р.Г., Тлеуканова Ж.Е., Айдарханова А.К., Мамырбаева А.С.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТЕРРИТОРИИ СИП	214
<i>Жерненко А.О.</i>	
САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ВЕДЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЛЯХ: ПЕРЕХОД Cs-137 В КАРТОФЕЛЬ И ПРОДУКТЫ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ	216
<i>Журавлева Ю.С., Гречкина В.В.</i>	
СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗВЕНЕ «ПОЧВА-ВОДА-РАСТЕНИЕ»	217
<i>Иванова А.В., Немцова Ю.А., Воденев В.А., Гринберг М.А.</i>	
ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНДУЦИРОВАННУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ УСТОЙЧИВОСТЬ ФОТОСИНТЕЗА К ЗАСУХЕ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ	220
<i>Казыдуб Н.Г., Коцюбинская О.А., Коваленко А.Н.</i>	
АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ СОРТА ФАСОЛИ ОВОЩНОЙ ПАМЯТИ РЫЖКОВОЙ	223
<i>Квиткина А.К.</i>	
ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ВРЕМЕНИ ОБОРОТА ПУЛОВ ПОЧВЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА CO ₂	227
<i>Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.</i>	
БАЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ГЕОДАННЫХ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	230
<i>Кривина Е.С., Темралеева А.Д.</i>	
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ШТАММОВ CHLORELLA-ПОДОБНЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ, ИЗОЛИРОВАННЫХ ИЗ КОММЕРЧЕСКИХ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ «ЖИВОЙ ХЛОРЕЛЛЫ»	231

<i>Мамырбаева А.С., Паницкий А.В., Базарбаева А.Б., Лещенко Н.А., Байгазы С.А.</i>	
ПЕРЕХОД $^{239+240}\text{Pu}$ В МЯСО ДОМАШНЕЙ ПТИЦЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИЕМЕ С ПОЧВОЙ, ВОДОЙ И ТРАВЯНОЙ МУКОЙ	234
<i>Микаилова Р.А., Спиридонов С.И.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕАКТОРОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	236
<i>Милейко А.А.</i>	
ВЛИЯНИЕ ЛИХЕНОМАССЫ НА ПЕРВИЧНЫЙ РОСТ <i>SORGHUM BICOLOR</i> (L.) MOENCH	239
<i>Немцова Ю.А., Гринберг М.А., Воденеев В.А.</i>	
ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКЦИЙ ФОТОСИНТЕЗА, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ У РАСТЕНИЙ ТАБАКА	242
<i>Петухов А.Д., Богачева В.В., Степаненко В.Ф.</i>	
ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ РАСПЫЛЕННЫМИ НЕЙТРОН-АКТИВИРОВАННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ МИКРОЧАСТИЦАМИ	245
<i>Пирогова П.А., Здобнова Т.А., Гринберг М.А., Воденеев В.А.</i>	
АНАЛИЗ ВКЛАДА КАЛИЕВЫХ КАНАЛОВ В ЭФФЕКТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ РАСТЕНИЙ	248
<i>Пролёттова Н.В., Зотова В.С.</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЗДАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ К АНТРАКНОЗУ ФОРМ ЛЬНА	250
<i>Прудников П.В., Пашковский А.А., Леянова Е.Н.</i>	
РАДИАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ АГРОМЕЛИОРАНТОВ И ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СЕЯННЫХ ТРАВАХ В ЮГО-ЗАПАДНЫХ РАЙОНАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ	251
<i>Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Сулов А.А., Петров К.В., Иванкин Н.Г., Баланова О.Ю.</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА ГУМИТОН ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОВСА В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ	255
<i>Середин Т.М., Баранова Е.В., Кайгородова И.М., Марчева М.М., Ушакова О.В., Солдатенко А.В.</i>	
МЕЖСОРТОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ В НАКОПЛЕНИИ ^{90}Sr В ЛУКЕ РЕПЧАТОМ	259
<i>Титов И.Е., Кречетников В.В., Кузнецов В.К., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.</i>	
КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕХОДА ^{137}Cs В ЗЛАКОВЫЙ ТРАВСТОЙ НА СЕТИ КОНТРОЛЬНЫХ УЧАСТКОВ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ЗА ДИНАМИКОЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА БЫВШИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ НА ОТЧУЖДЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ	261
<i>Тлеуканова Ж.Е., Айдарханова А.К., Мамырбаева А.С., Субботин С.Б.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ^{238}U В ВОДЕ, КАК ФАКТОРА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕРРИТОРИИ СИП	264
<i>Хохлова В.А., Безбородова О.Б., Трунова Г.В., Плотникова Е.А., Морозова Н.Б., Плютинская А.Д., Воронцова М.С., Венедиктова Ю.В., Немцова Е.Р., Панкратов А.А., Шегай П.В.</i>	
ПЕРСПЕКТИВЫ БИОБАНКИНГА ОПУХОЛЕВЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ	266
<i>Шаврина К.Е., Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Кузьменкова Н.В., Шупик А.А.</i>	
ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ ПЕРОМ ЛУКА, ВЫРАЩЕННОГО В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ	268
ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА «BIOSKILLS 2023: НАУКА КАК ОБРАЗ ЖИЗНИ»	272
<i>Вытова Е.Р., Купцова П.С., Лапенко А.К., Комарова Л.Н.</i>	
ИЗУЧЕНИЕ ДЕАНОЛА АЦЕГЛУМАТА, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИОКСИДАНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ, В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОЛУЧЕВОГО СРЕДСТВА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА	273
<i>Горбатов С.А., Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Басырова Д.В., Меджидов И.М., Харламов В.А., Петрухина Д.В.</i>	
НОВЫЙ ТИП СВЧ-ИСТОЧНИКА НЕТЕПЛОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	276

<i>Мельникова А.А.</i>	
БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНОГО КАЧЕСТВА: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА <i>IN VITRO</i>	279
<i>Михайлов А.В., Лукашенко С.Н., Эдомская М.А., Томсон А.В.</i>	
РЕЦЕПТУРА НОВОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КОКТЕЙЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ	282
<i>Сидоренко Е.А., Шаврина К.Е., Братухин Н.О., Саруханов А.В., Эдомская М.А., Сироткина Г.М.</i>	
СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЛОДОВЫХ ТЕЛАХ ВЫСШИХ ГРИБОВ Г. ОБНИНСК	284
<i>Степанова Е.А., Седрабян А.М., Акопян Ш.С., Рассказова М.М.</i>	
ПЛАЗМИД-ОПОСРЕДОВАННАЯ ПЕРЕДАЧА ФЕНОТИПА ПРОДУЦЕНТА БЕТА-ЛАКТАМАЗ РАСШИРЕННОГО СПЕКТРА В КОМПЕТЕНТНЫЕ КЛЕТКИ <i>E.COLI</i> DH5 α	288
<i>Шупик Д.А., Бейзак К.Н., Авраменко И.А., Лукашенко С.Н., Шаврина К.Е., Братухин Н.О., Саруханов А.В.</i>	
СОДЕРЖАНИЕ ВИТАМИНА «С» И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА РАБОТУ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА, В СОКАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА	292

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



Компания **Qvados-Bio** является поставщиком комплексных решений для национальных медицинских исследовательских центров, федеральных и региональных научно-исследовательских институтов, университетов, R&D лабораторий, медицинских организаций и фармкомпаний.

Портфель компании включает современное лабораторное оборудование и расходные материалы ведущих зарубежных и российских производителей по направлениям:

Биобанкинг – решения для организации биобанков и криобанков любого масштаба «под ключ» – от обычных морозильников и ручных криохранилищ, криопробирок, сканеров штрих-кодов для небольших лабораторий до полностью автоматизированных систем хранения.

Молекулярная генетика – станции для выделения нуклеиновых кислот и белков, амплификаторы для ПЦР в реальном времени, системы и наборы для SNP-генотипирования, капиллярные генетические анализаторы NGS-секвенаторы и решения для пренатального и неонатального скрининга, онкологии и молекулярной диагностики.

Преаналитика – системы для забора крови, устройства сортировки, маркировки и упаковки пробирок, многозадачные роботизированные платформы для выделения ДНК, постановки ПЦР, пробоподготовки для NGS, проведения ИФА и аликвотирования, а также пневматическая почта для мгновенной передачи образцов от места забора до аналитической лаборатории.

Клеточные технологии – современное оборудование и реагентика для наблюдения за клеточными процессами от культивации клеточных культур до пролиферации, ангио- и нейрогенеза и формирования 3D культур.

Общелабораторное оборудование – оборудование для обеспечения полного функционала лабораторий.

Многолетний опыт работы и высококвалифицированные специалисты позволяют нам оказывать широкий спектр услуг на самом высоком уровне, – от подбора оборудования под конкретные задачи, проведения обучающих мероприятий, до проектирования лабораторий в соответствии с международными стандартами.

<https://qvadosbio.ru>

Секция

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ**

GENETIC TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



МАРКЕРНЫЕ ЛОКУСЫ ГЕНОМА *BRUCELLA* SPP. ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БРУЦЕЛЛЕЗА МЕЛКОГО РОГАТОГО СКОТА МЕТОДОМ ПЦР В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Анисимова Е.А., Миргазов Д.А., Додонова Е.А., Панкова Е.В., Осянин К.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности», 420075, г. Казань, ул. Научный городок-2, Российская Федерация
e-mail: vnivi@mail.ru

В рамках данной работы были проанализированы нуклеотидные последовательности геномов видов *B. melitensis* и *B. ovis*. Определены специфические участки, позволяющие проводить обнаружение возбудителей бруцеллеза данных видов в мультиплексном формате. На основе проведенного биоинформационного анализа произведен дизайн праймеров и зондов для ПЦР в реальном времени. Показана 100 % специфичность разработанных олигонуклеотидных затравок при проведении ПЦР с ДНК штаммов *B. melitensis* 16М и *B. ovis* 90.

Ключевые слова: бруцеллез, мелкий рогатый скот, ПЦР, идентификация, биоинформационный анализ

Введение

Бруцеллез мелкого рогатого скота – это опасное инфекционное заболевание, вызываемое бактериями *Brucella melitensis* (козы, овцы) и *Brucella ovis* (бараны, овцы), которые являются патогенными и для человека [1, 2]. На сегодняшний день, к наиболее эффективным подходам лабораторной диагностики возбудителя бруцеллеза относят методики, основанные на амплификации их генома. Быстрая и точная идентификация вида возбудителя возможна при использовании ПЦР, основу которой составляет биоинформационный анализ [3]. Целью данной работы явился подбор оптимальных локусов геномов бруцелл, пригодных для обнаружения и дифференциации видов *B. melitensis* и *B. ovis* с помощью ПЦР в режиме реального времени (ПЦР-РВ).

Методика. Объектом исследования явились нуклеотидные последовательности геномов бруцелл, представленных в базе данных GenBank. Множественное выравнивание нуклеотидных последовательностей проводили с помощью приложения AlignX программного пакета «Vector NTI 9.1.0» (Invitrogen Corporation) и в программе «BLASTn».

Дизайн синтетических олигонуклеотидов праймеров и зондов проводили, используя программу «Vector NTI 9.1.0».

Для апробации разработанных праймеров использовали штаммы *B. canis* RM 6/66, *B. suis* 1330, *B. melitensis* 16М и *B. ovis* 90 из «Государственной коллекции штаммов возбудителей ООБ», используемых в ветеринарии и животноводстве ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ». ДНК бруцелл выделяли согласно методике, описанной нами ранее [4].

Результаты и их обсуждение

В банке данных GenBank найдено 70 полногеномных сиквенса штаммов *B. melitensis* и три – *B. ovis*. По результатам биоинформационного анализа были подобраны локализованные на второй хромосоме локусы «COR52_12390» (GenBank CP026006.1: 906042-906524) и «BOV_A0504» (GenBank CP000709.1:523428-525023), пригодные для обнаружения и дифференциации видов *B. melitensis* и *B. ovis* соответственно.

В пределах представленных выше локусов произведен дизайн праймеров (прямой и обратный) и зондов для ПЦР. Температура отжига для всех сконструированных праймеров составила 60 °С, а зондов 64 °С. Данное условие необходимо для возможности одновременного проведения ПЦР в одной пробирке. Данные о подобранных локусах, красителях и гасителях флуоресценции представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика специфических локусов, подобранных для индикации видов *B. canis*, *B. melitensis*, *B. abortus* и *B. ovis*

Вид	Локус	Канал детекции	Комбинация зонда и гасителя флуоресценции
<i>B. melitensis</i>	COR52_12390	FAM/Green	FAM- BHQ1
<i>B. ovis</i>	BOV_A0504	JOE/HEX	R6G- BHQ1

Корректировку условий ПЦР проводили на штаммах *B. melitensis* 16М и *B. ovis* 90. Для определения точной температуры отжига праймеров были проведены моноплексные реакции с использованием температурного градиента. Режим амплификации включал в себя диапазон температур от 58 °С до 65 °С. На основании полученных результатов была определена оптимальная температура отжига праймеров (61 °С) и составлена программа амплификации.

Определение специфичности разработанных праймеров проводили путем амплификации ДНК штаммов бруцелл *B. melitensis* 16М, *B. ovis* 90, *B. canis* RM 6/66 и *B. suis* 1330. Результаты показали, что при проведении ПЦР-РВ с ДНК *B. melitensis* 16М и *B. ovis* 90 происходит стабильное нарастание уровня флуоресценции по каналам FAM и R6G соответственно. Для штаммов *B. suis* 1330 и *B. melitensis* 16М, выбранных нами в качестве отрицательного контроля, флуоресценция не регистрировалась ни по одному из каналов.

Выводы

Разработанные в рамках данного исследования праймеры и зонды могут быть использованы в качестве основы для построения мультиплексной ПЦР тест-системы, пригодной для детекции и одновременной дифференциации представителей видов *B. melitensis* и *B. ovis*. Полученная тест-система ускорит процесс обнаружения возбудителя бруцеллеза

мелкого рогатого скота, что позволит в короткие сроки принять необходимые мероприятия по ликвидации данного заболевания в овцеводческих хозяйствах и на козьих фермах.

Список литературы

1. Бруцеллез: его распространение и профилактика / Р.Ю. Насибуллин [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 1. С. 38-43.

2. Бруцеллез: тенденции развития ситуации в мире и прогноз на 2022 г. в Российской Федерации / Д.Г. Пономаренко [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. 2022. № 2. С. 36-45.

3. Маркерные локусы генома бруцелл для дифференциальной ПЦР индикации патогенных штаммов / Н.И. Хаммадов [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. 2018. № 3. С. 88-93.

4. Использование кривых плавления ампликонов VNTR-локусов для идентификации бруцелл / Е.А. Анисимова [и др.] // Перспективы развития современной ветеринарной науки: Сборник научных трудов по итогам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 55-летию Прикаспийского зонального научно-исследовательского ветеринарного института – филиал ФГБНУ «ФАНЦ РД», Махачкала, 22-23 сентября 2022 года. Махачкала: Изд во АЛЕФ, 2022. С. 22-26.

MARKER LOCI IN BRUCELLA SPP. GENOME FOR INDICATION OF SMALL CATTLE BRUCELLOSIS PATHOGENS BY REAL-TIME PCR METHOD

Anisimova E.A., Mirgazov D.A., Dodonova E.A., Pankova E.V., Osyanin K.A.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety»,
Nauchny Gorodok-2 st., Kazan, Russian Federation, 420075
e-mail: vnivi@mail.ru

In the present study, the nucleotide sequences of the genomes of *B. melitensis*, and *B. ovis* were analyzed. Specific sites for the indication of brucellosis pathogens of these species in a multiplex format were identified. Based on the performed bioinformatics analysis, primers and probes for real-time PCR were designed. 100 % specificity of the developed oligonucleotide primers was shown when performing PCR with DNA of strains *B. melitensis* 16M and *B. ovis* 90.

Keywords: brucellosis, small cattle, PCR, identification, bioinformatics analysis

The GenBank database contains 70 genome-wide sequences of *B. melitensis* and three *B. ovis* strains. Based on the results of bioinformatics analysis for detection of strains *B. melitensis* and *B. ovis* were selected the loci «COR52_12390» (GenBank CP026006.1: 906042-906524) and «BOV_A0504» (GenBank CP000709.1:523428-525023), respectively.

Based on the loci were designed primers (forward and reverse) and PCR probes. The annealing temperature for all designed primers was 60 °C, and for probes,

64 °C. This condition is necessary for the possibility of a one-time PCR in one microtube.

PCR conditions were adjusted on *B. melitensis* 16M and *B. ovis* 90 strains. To determine the exact primer annealing temperature, reactions were performed using a temperature gradient. The amplification mode included a temperature range from 58 °C to 65 °C. Based on the results obtained, the optimal primer annealing temperature was determined (61 °C), and the amplification program was compiled.

The specificity of the developed primers was determined by amplifying the DNA of the *B. melitensis* 16M, *B. ovis* 90, *B. canis* RM 6/66, and *B. suis* 1330. Brucella strains. The results showed that during real-time PCR

with *B. melitensis* 16M and *B. ovis* 90 DNA, a stable increase occurs through the FAM and R6G channels, respectively. For strains *B. suis* 1330 and *B. melitensis* 16M was not recorded fluorescence in any of the channels.

УДК 575.167

ПОЛНОГЕНОМНЫЙ АНАЛИЗ АССОЦИАЦИЙ ПРИЗНАКОВ ПРЕДУБОРОЧНОГО ПРОРАСТАНИЯ И ЦВЕТА ЗЕРНА У ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

Афонникова С.Д.^{1,2,3,а}, Киселёва А.А.^{1,2}, Федяева А.В.^{1,2}, Афонников Д.А.^{1,2}, Салина Е.А.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 10, Российская Федерация

² Курчатковский геномный центр – Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 10, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, Российская Федерация
e-mail: ^а afonnikovasvetlana@yandex.ru

Одним из экономически важных признаков пшеницы *Triticum aestivum* является цвет зерна. Помимо вклада в питательную ценность продуктов, этот признак связан с предотвращением предуборочного прорастания зерна в условиях повышенной влажности, которое приводит к снижению качества конечного продукта и урожая. К настоящему времени не было выявлено конкретных механизмов формирования данного признака. Поэтому поиск генетических вариантов, связанных с ним, является актуальной задачей.

Была произведена оценка цвета зерна мягкой краснозерной озимой пшеницы, а также измерены признаки прорастания: число падения и индекс прорастания (ИП) на молочной/восковой стадии (М/В) и стадии полной спелости. Корреляционный анализ между характеристиками цвета и прорастания не показал значимой взаимосвязи между ними. Полногеномный анализ ассоциаций позволил обнаружить 26 маркеров, значимо ассоциированных с цветом зерна. Два локуса объясняли довольно большой процент вариабельности цветовых характеристик – до 50 % и 31 %. Для признаков прорастания полногеномный анализ ассоциаций выявил 12 значимых маркеров. Два из обнаруженных локусов объясняли до 25 % фенотипической изменчивости для ИП М/В каждый.

Таким образом, для коллекции краснозерной озимой пшеницы были выявлены локусы, вносящие значительный вклад в изменчивость признаков предуборочного прорастания и цвета зерна.

Ключевые слова: предуборочное прорастание зерна, цвет зерна, полногеномное исследование ассоциаций, озимая пшеница, гексаплоидная пшеница, зерновые культуры

Гексаплоидная пшеница *Triticum aestivum* представляет собой одну из важнейших продовольственных культур [5]. Однако создание более совершенных сортов по-прежнему необходимо для удовлетворения потребностей растущего населения планеты в объеме и питательной ценности продовольствия.

Цвет зерна, являясь экономически важным признаком, характеризуется наличием пигментов с антиоксидантными свойствами, важными для роста растений, их адаптации и устойчивости к предуборочному прорастанию. Считается, что красная пшеница в целом более устойчива к предуборочному прорастанию, чем белая [3]. Процесс раннего прорастания зерна в условиях повышенной влажности запускает

каскад различных реакций, в том числе расщепление крахмала и белков эндосперма с целью высвобождения энергии. Такое преждевременное прорастание приводит к ухудшению качества урожая, снижению качества конечного продукта и урожая в целом. Продукты, изготовленные из проросшего на корню зерна, как правило, липкие, высокопористые и не имеют желаемого цвета [6].

Процесс преждевременного прорастания очень сложен и зависит от различных факторов, включая условия окружающей среды, степень покоя семян, структуру колоса, форму ости и многое другое. Поэтому выявление конкретных механизмов формирования данного признака и поиск аллелей,

обеспечивающих устойчивость к нему, является актуальной задачей.

Данное исследование было проведено на коллекции мягкой красной озимой пшеницы в количестве 159 генотипов. Для них была произведена оценка цвета зерна с помощью приложения SeedCounter [4], которое позволяет охарактеризовать цвет в четырех цветовых пространствах. Вдобавок были измерены признаки прорастания, которые включали число падения и индекс прорастания (ИП) на молочной/восковой стадии (М/В) и стадии полной спелости. Генотипирование материала было проведено с использованием SNP чипа Illumina Wheat 25K. С помощью plink2.0 осуществляли контроль качества сырых данных генотипирования [2]. Далее, используя Beagle 5.2 [1], восстановили пропущенную генетическую информацию и уже с полученными данными проводили полногеномный анализ ассоциаций.

Корреляционный анализ между характеристиками цвета и параметрами прорастания не показал значимой взаимосвязи между ними. Полногеномный анализ ассоциаций позволил обнаружить 26 маркеров, значимо ($-\log(p\text{-value}) > 4$) ассоциированных с цветом зерна. Локус на 1D хромосоме объяснял от 23 до 50 % вариативности таких цветовых параметров, как яркость, краснота и синева. От 16 до 31 % изменчивости компонентов яркости объясняют два локуса на 3В хромосоме.

Для признаков прорастания полногеномный анализ ассоциаций выявил 12 маркеров с уровнем значимости $-\log(p\text{-value}) > 4$. Полиморфизмы, расположенные на хромосомах 1В и 7D, объясняли около 25 % фенотипической изменчивости для ИП М/В. Как и ожидалось, мы не получили локусов, значимо связанных как с параметрами цвета, так и с прорастанием.

Таким образом, на материале коллекции красных сортов мы показали, что вариация окраски

таких сортов не коррелирует с устойчивостью к предуборочному прорастанию. Также в результате полногеномного анализа ассоциаций мы выявили локусы, вносящие значительный вклад в изменчивость признаков прорастания и цвета зерна.

Финансирование исследования осуществлялось Российским научным фондом, проект № 21-76-30003.

Список литературы

1. Browning B.L., Zhou Y., Browning S.R. A One-Penny Imputed Genome from Next-Generation Reference Panels // *The American Journal of Human Genetics*. 2018. № 3 (103). PP. 338-348.
2. Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets / C.C. Chang [et al.] // *GigaScience*. 2015. № 1(4). P. 7.
3. Study of the relationship between pre-harvest sprouting and grain color by quantitative trait loci analysis in a whitexred grain bread-wheat cross / C. Groos [et al.] // *Theoretical and Applied Genetics*. 2002. № 1(104). PP. 39-47.
4. Komyshev E., Genaev M., Afonnikov D. Evaluation of the SeedCounter, a mobile application for grain phenotyping // *Frontiers in Plant Science*. 2017. (7). P. 1990.
5. Loskutov I.G., Khlestkina E.K. Wheat, Barley, and Oat Breeding for Health Benefit Components in Grain // *Plants*. 2021. Vol. 10. P. 86.
6. Moot D.J., Every D. A comparison of bread baking, falling number, α -amylase assay and visual method for the assessment of pre-harvest sprouting in wheat // *Journal of Cereal Science*. 1990. № 3(11). PP. 225-234.

GENOME-WIDE ASSOCIATION ANALYSIS OF PRE-HARVEST SPROUTING AND GRAIN COLOR IN WINTER COMMON WHEAT

Afonnikova S.D.^{1,2,3,a}, Kiseleva A.A.^{1,2}, Fedyaeva A.V.^{1,2}, Afonnikov D.A.^{1,2}, Salina E.A.^{1,2}

¹ Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Akademika Lavrentieva Avenue 10, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

² Kurchatov Genomic Center, Institute of Cytology and Genetics SB RAS, Akademika Lavrentieva Avenue 10, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

³ Novosibirsk State University, Pirogova st. 2, Novosibirsk, Russian Federation, 630090
e-mail: ^aafonnikovasvetlana@yandex.ru

One of the economically important traits of *Triticum aestivum* is grain color. Contributing to human nutrition grain color has also been linked to the prevention of pre-harvest sprouting (PHS) under high moisture conditions, which leads to reduced final product quality and yield. Yet, the search for genetic mechanisms associated with this highly complex trait is a task of high interest.

The grain color and germination traits (fall number and germination index (GI) at the late milk/hard dough (M/D) and hard grain stage) were assessed for the collection of red-grained common winter wheat. Correlation analysis between color parameters and PHS showed no significant relationship. Genome-wide association analysis detected 26 markers significantly associated with grain color. Two loci explained a rather large percentage of variability in color traits – up to 50 % and 31 %. Regarding germination traits, the association analysis identified 12 markers. Two of the detected loci explained up to 25 % of the phenotypic variability for GI M/D, each.

Thus, loci contributing significantly to variability in germination traits and grain color were identified for the red-grain winter wheat collection.

The study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 21-76-30003.

Keywords: pre-harvest sprouting, grain color, genome-wide association study, winter wheat, hexaploid wheat, cereal crops

УДК 577.21:631.523:633.11

ВЛИЯНИЕ СТРЕССОВЫХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПРЕССИЮ ЦИТОЗИНОВЫХ МЕТИЛТРАНСФЕРАЗ В ПШЕНИЦЕ (*TRITICUM AESTIVUM*)

Белова Н.И.^а, Василик М.П., Федореева Л.И.

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация
e-mail: ^аbelova.ni@phystech.edu*

В связи с большим количеством пахотных земель с высоким уровнем засоления и развивающимся осваиванием ранее не возделываемых угодий, изучение механизмов солеустойчивости сельскохозяйственных культур является одной из приоритетных задач отечественных исследователей. Важным регуляторным элементом служит эпигенетическая модификация ДНК, в числе ферментов, вовлеченных в метилирование у растений, значатся цитозиновые метилтрансферазы. В настоящей работе мы рассмотрели различия экспрессии основных групп метилтрансфераз на фоне солевого и темнового стресса на примере сорта Оренбургская 22. Уровни экспрессии некоторых членов семейства *CMT* и *MET* значительно снижались в ответ на солевой стресс.

Ключевые слова: пшеница мягкая, солевой стресс, метилтрансферазы, экспрессия генов

Пшеница – одна из наиболее широко возделываемых продовольственных культур, однако повышенная засоленность почвы приводит к подавлению роста и урожайности сельскохозяйственных культур (нарушается ионно-осмотический баланс). Даже незначительное превышение содержания солей в почве способно привести к ухудшению качества и количества сельскохозяйственной продукции. Изучение молекулярной основы реакции растений на засоленность имеет важное значение для поиска подходов к повышению устойчивости растений к стрессу. Одним из способов бороться со стрессовыми факторами окружающей среды у растений является регуляция генов посредством эпигенетических модификаций. Такие модификации могут быть обратимыми и могут быть связаны с инактивацией и активацией генов. Деметилирование функционально неактивных генов вследствие воздействия абиотических стрессов может инициировать их экспрессию. Растения содержат относительно высокие уровни 5-метилцитозина (5-мС), от 6 % до 25 % от общего цитозина, в зависимости от вида. Метилирование ДНК у

растений происходит во всех трех цитозинных контекстах: CG, CHG и CHH (H = A, T или C). Среди основных классов метилтрансфераз растений выделяются *DRM*, *MET*, *CMT* [3]. Метилирование *de novo* устанавливается *domains rearranged methyltransferase2 (DRM2)* через РНК-направленный путь метилирования ДНК и поддерживается ДНК-метилтрансферазой1 (*MET1*) и хромометилазой3 (*CMT3*) для контекстов CG и CHG соответственно [4].

В ходе эксперимента нам удалось стабильно амплифицировать гены ДНК-метилтрансфераз: *DRM2*, *MET1*, *CMT1*, *CMT2*, *CMT3*. После нормализации и статистического обсчета данных относительной экспрессии, полученных в ходе ПРЦ-ПВ, была показана значимая разница в экспрессии *DRM2.1*, *DRM2.2* и *CMT2*. Статистически значимого влияния факторов условий и частей растений, из которых была получена РНК, на экспрессию генов метилтрансфераз обнаружено не было, что может быть объяснено особой солеустойчивостью сорта Оренбургская 22. Обнаружено влияние факторов освещенности и засоления. Экспрессивность *DRM2.1* выше в воде, чем при

солевом стрессе. Относительный уровень экспрессии *CMT2* на свету и в воде составил 45,503, а в темноте и в солевом растворе – 0,465. Полученные данные объясняются тем, что при стрессе потребность в общем сайленсировании генома снижается, в то время как при благоприятных факторах возрастает.

Материалы и методы

В данном исследовании мы использовали растения мягкой пшеницы сорта Оренбургская 22, известного своей солеустойчивостью. Мы отбирали пятидневные проростки, выращенные рулонной культурой при следующих вариантах условий: на свету в солевом растворе и на свету в воде, с теми же вариантами в темноте. Концентрация солевого раствора 150 мМ. Из полученной биомассы мы выделяли РНК и ДНК по протоколам «РНК-Экстран» (ООО «Синтол», Россия) и «ДНК-Экстран», соответственно, экстракция проводилась из корней, листьев и coleoptilya. Оценка качества и количества выделенных нуклеиновых кислот проводилась спектрометрически. Дизайн праймеров к генам метилтрансфераз проводился при помощи NCBI Primer-BLAST. Реакцию обратной транскрипции ставили по стандартному протоколу, используя реактивы ООО «Синтол». Реакцию ПЦР-РВ проводили в присутствии Sybr Green на

амплификаторе CFX 96 Real-Time System (BIO- 96 Real-Time System (BIO- Real-Time System (BIO- -Time System (BIO- Time System (BIO- Time System (BIO- System (BIO RAD).

Список литературы

1. Saibi W, Brini F. Ion transporters and their molecular regulation mechanism in plants // J Plant Sci Phytopathol. 2021. Vol. 5. PP. 028-043.
2. Comparative characterization and adaptive mechanisms of salt tolerance of different wheat genotypes / L.I. Fedoreyeva [et al.] // Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]. 2023. Vol. 58. PP. 510-524.
3. Expression profiling of DNA methyltransferase genes in wheat genotypes with contrasting drought tolerance / V. Vassileva [et al.] // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Vol. 25(5). PP. 845-851.
4. Salt-Induced tissue-specific cytosine methylation downregulates expression of HKT genes in contrasting wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes / K. Suresh [et al.] // DNA and cell biology. 2017. Vol. 36. № 4. PP. 283-294.

INFLUENCE OF SALT STRESS ON THE EXPRESSION OF THE GENES OF K⁺/NA⁺-TRANSPORTERS HKT AND METHYLTRANSFERASES IN COMMON WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM*)

Belova N.I.^a, Vasilik M.P., Fedoreyeva L.I.

All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550
e-mail: ^abelova.ni@phystech.edu

Due to the large amount of arable land with high salinity level and developing development of previously uncultivated lands, the study of mechanisms of salt tolerance in crops is one of the priority tasks of domestic researchers. Epigenomic modification of DNA serves as an important regulatory element, and cytosine methyltransferases are among the enzymes involved in methylation in plants. In the present work, we examined the differences in the expression of the main groups of methyltransferases on the background of salt and dark stress on the example of the variety *Orenburgskaya 22*. The expression levels of some members of the CMT and MET families were significantly decreased in response to salt stress.

Keywords: *common wheat, salt stress, methyltransferases, gene expression*

One of the ways to combat environmental stress factors in plants is the regulation of genes through epigenetic modifications carried out by methyltransferases, among which there are several main classes of DRM, MET, CMT. In this study, we used soft wheat plants of the *Orenburgskaya 22* variety, known for its salt tolerance. The influence of illumination and

salinity factors was discovered. DRM2.1 expressivity is higher in water than under salt stress. The relative expression level of *CMT2* in light and water was 45.503, and in the dark and in saline solution it was 0.465. The data obtained are explained by the fact that under stress the need for general genome silencing decreases, while under favorable factors it increases.

ВЫЯВЛЕНИЕ МАРКЕРОВ ИНФЕКЦИИ *COLLETOTRICHUM LUPINI* У ЛЮПИНА БЕЛОГО С ПОМОЩЬЮ МЕТАБОЛОМНОГО АНАЛИЗА

Битаршвили С.В.^{1,a}, Самад С.², Болдырев С.В.², Бен С.², Волкова П.Ю.³, Бондаренко Е.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

² Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», 121205, г. Москва, Большой Бульвар, д. 30, стр. 1, Российская Федерация

³ Независимый исследователь, 2440, провинция Антверпене, г. Гел, Бельгия
e-mail: ^a bitarshvili.s@gmail.com

В этом исследовании были проанализированы метаболические профили двух сортов люпина белого с различной восприимчивостью к первичной инфекции, вызванной двумя штаммами *Colletotrichum lupini*, чтобы выявить ключевые метаболиты, участвующие в защитном ответе проростков на патоген. Было показано, что устойчивый к антракнозу сорт «SN 5-19» имел более выраженный защитный ответ против инфекции, чем чувствительный сорт «Мичуринский». Фумаровая кислота и гамма-аминомасляная кислота (ГАМК) предложены в качестве потенциальных маркеров инфекции, вызванной *C. lupini*.

Ключевые слова: *Lupinus albus*, антракноз, биотический стресс, метаболомный профайлинг, ГХ-МС

Инфекционные заболевания растений являются одной из глобальных проблем мировой продовольственной безопасности. *C. lupini*, вызывающий антракноз, серьезно угрожает выращиванию люпина по всему миру [1]. Применение геномного редактирования для создания новых линий с повышенной устойчивостью к антракнозу – это перспективное высокотехнологичное направление в селекции люпина, чтобы обеспечить устойчивость его производства. Для изучения потенциала использования геномного редактирования необходимо понимание молекулярных механизмов ответа растений на *C. lupini* и механизмов, лежащих в основе устойчивости к патогену. Метаболомный подход позволяет одновременно проанализировать множество соединений в одном образце и предоставляет глобальный взгляд на метаболические перестройки [2]. В настоящем исследовании было проведено метаболическое профилирование проростков двух сортов белого люпина с различной восприимчивостью к первичной инфекции, вызванной двумя агрессивными штаммами *C. lupini*, чтобы выявить метаболические изменения, лежащие в основе защитного ответа.

Материалы и методы

Штаммы *C. lupini* были выделены из семян и стручков белого люпина, собранных в 2021 году в Брянске (Россия). Инфицированный растительный материал стерилизовали 75 % этанолом и 10 % гипохлоритом натрия. Семена высевали на картофельно-декстрозный агар (39 г/л PDA, Scharlab, Испания) с добавлением антибиотиков (ампициллин – 50 мкг/мл, стрептомицин – 50 мкг/мл, тетрациклин – 50 мкг/мл) в контролируемой среде (Binder, KB240,

Германия; 22,5 °C, 70% ВЛ, темнота). Мицелий из одной колонии переносили на свежую питательную среду и выращивали при тех же условиях. Процедура повторили дважды для получения моноспорных культур, которые исследовали микроскопическими методами. Штаммы были молекулярно характеризованы с помощью трех наборов праймеров, а также оценены по агрессивности на всходах. Из коллекции *C. lupini*, созданной для текущего исследования, были выбраны два наиболее агрессивных штамма *Col.l 3/1* и *Col.l 139/1*.

Два сорта белого люпина были созданы Российским научно-исследовательским институтом люпина (Брянск, Россия). Сорт «Мичуринский» восприимчив к антракнозу, сорт «SN 5-19» – это раннеспелый, высокоурожайный линейный гибрид, устойчивый к антракнозу. Семена двух сортов стерилизовали хлорным газом в течение 48 часов, облучили УФ-лучами в ламинарном шкафу (Lamsystems, Германия) в течение 10 минут и хранили при +4 °C до использования. Семена инокулировали 1 час в растворе спор (10^5 спор в 2,5 мл стерильной ddH₂O и 0,1 % Tween20). Затем семена перенесли в стерильные боксы с влажной фильтровальной бумагой (~5 мл стерильной ddH₂O) и инкубировали в темноте в течение 10 дней при 24±2 °C и ~70 % относительной влажности. На 7-й день отобрали целые проростки для метаболомного анализа.

Экстракцию метаболитов, дериватизацию и анализ ГХ-МС проводили, как описано ранее [3]. Для каждого условия использовали три повтора по 50 мг ткани проростков белого люпина. Разделение метаболитов проводили с помощью системы ГХ/МС Agilent 6850 (Agilent, США) с колонкой Restek Rxi-Sil-

5ms (Agilent, США). Масс-спектры анализировали с использованием AMDIS и библиотек NIST20, GOLM, MONA и IN-HOUSE.

Статистический анализ проводили с помощью веб-платформы Metaboanalyst 5.0 с использованием подходов мультивариантной статистики и иерархической кластеризации.

Результаты

Мы проанализировали метаболические профили 7-дневных проростков люпина белого двух сортов «Мичуринский» и «SN 5-19», зараженных двумя штаммами грибов *Col.l 3/1* и *Col.l 139/1*. Полученные профили включали 137 соединений, около половины из них были идентифицированы до класса (пентозы,

гексозы, дисахариды и сахарные спирты). Чтобы визуализировать метаболические изменения в результате грибковой инфекции, топ 50 метаболитов были использованы для построения тепловой карты и иерархической кластеризацией. Тепловая карта показала разные метаболические паттерны у контрольных и инфицированных проростков (рис. 1). Контрольные образцы обоих сортов образовали кластер, отделенный от всех зараженных образцов. Кроме того, образцы «SN 5-19», инокулированные штаммом *Col.l 3/1*, содержали наибольшее количество дифференциально распространенных метаболитов по сравнению с другими инфицированными образцами, что указывает на наиболее выраженный метаболический ответ на инфекцию.

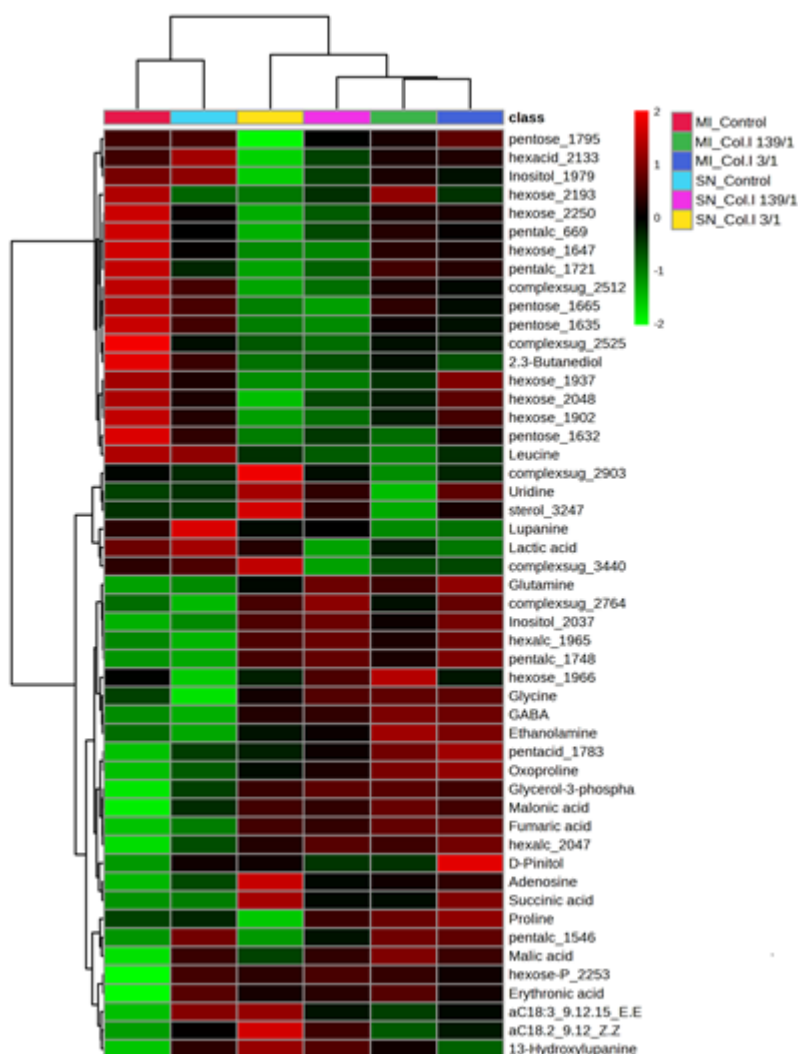


Рисунок 1. Тепловая карта с иерархической кластеризацией топ 50 метаболитов в образцах люпина белого (MI – «Мичуринский»; SN – «SN 5-19») инфицированных двумя штаммами *C. lupini* – *Col.l 3/1* и *Col.l 139/1*

Для оценки изменений, вызванных каждым штаммом в отдельности, был проведен Volcano plot анализ (рис. 2). Зараженные проростки одного и того же сорта показали схожую картину метаболических изменений, однако накопление фумаровой кислоты

и ГАМК было очевидным во всех вариантах сравнений. Действительно, содержание ГАМК растет в ответ на биотический стресс, обеспечивая устойчивость растений к патогенам за счет балансировки метаболических потоков между метаболизмом углерода и

азота, поддержания цикла трикарбоновых кислот (ЦТК) и активации антиоксидантных ферментов [4]. С другой стороны, фумаровая кислота является промежуточным метаболитом в цикле ЦТК, который регулирует рН во время ассимиляции нитратов и

действует как альтернативный поглотитель углерода для фотосинтата [5]. На основании этих результатов фумаровую кислоту и ГАМК можно рассматривать в качестве маркеров инфекции, вызванной *S. lupini*.

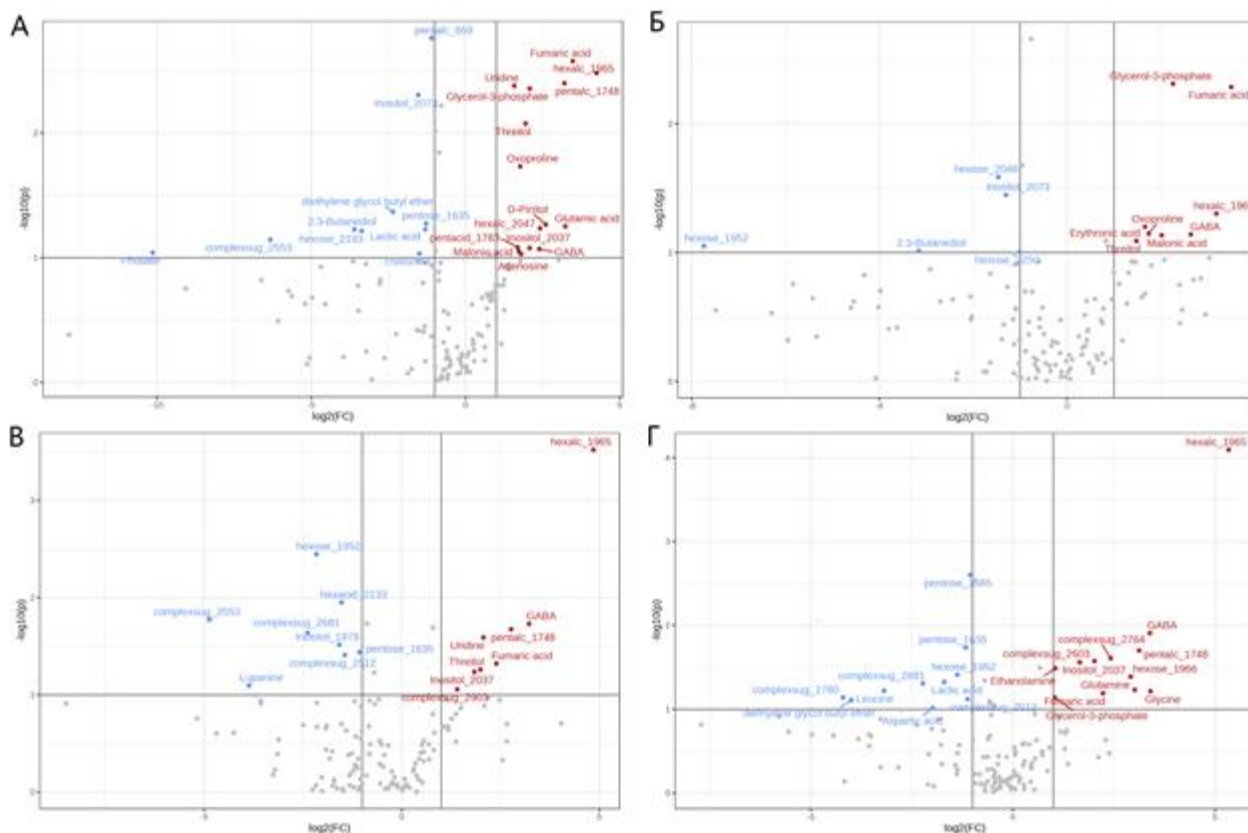


Рисунок 2. График Volcano показывает дифференциально представленные метаболиты в образцах люпина белого (MI – «Мичуринский»; SN – «SN 5-19») с $|FC| > 2$ и $p < 0,05$.

А – сравнение MI Col.l 3/1 с MI контроль; Б – MI Col.l 139/1 с MI контроль; В – SN Col.l 3/1 с SN контроль; Г – SN Col.l 139/1 с SN контроль. Голубой цвет – метаболиты со сниженным содержанием, серый цвет – не значимые, красный цвет – метаболиты с повышенным содержанием

Настоящее исследование дает ценную информацию о реакции сортов люпина белого с различной восприимчивостью к первичной инфекции, вызванной двумя штаммами *S. lupini*. Результаты выявили ключевые метаболиты, связанные с защитным ответом на антракноз, которые могут быть использованы в разработке эффективных стратегий борьбы с антракнозом.

Работа выполнена 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. Genetic diversity of *Colletotrichum lupini* and its virulence on white and Andean lupin / J.A. Alkemade, M.M. Messmer, R.T. Voegelé [et al.] // Sci Rep. 2021.

Vol. 11. P. 13547. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92953-y>.

2. Chen F., Ma R., Chen X.L. Advances of metabolomics in fungal pathogen-plant interactions // Metabolites. 2019. Vol. 15,9(8). P. 169. <https://doi.org/10.3390/metabo9080169>.

3. Mycorrhiza-induced alterations in metabolome of *Medicago lupulina* leaves during symbiosis development / A.P. Yurkov, R.K. Puzanskiy, G.S. Avdeeva [et al.] // Plants. 2021. Vol. 10. P. 2506. <https://doi.org/10.3390/plants10112506>.

4. The versatile GABA in plants / L. Li, N. Dou, H. Zhang, C. Wu // Plant Signal Behav. 2021. Vol. 16(3). P. 1862565. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1862565>.

5. Araujo W.L., Nunes-Nesi A., Fernie A.R. Fumarate: multiple functions of a simple metabolite // Phytochemistry. 2011. Vol. 72. PP. 838-843. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02/028>.

DETECTION OF MARKERS OF COLLETOTRICHUM LUPINI INFECTION IN WHITE LUPINE USING METABOLOMIC ANALYSIS

Bitarishvili S.V.^{1,a}, Samad S.², Boldyrev S.V.², Ben C.², Volkova P.Yu.³, Bondarenko E.V.¹

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, Russian Federation, 121205

³ Independent Researcher, Geel, Belgium, 2440

e-mail: ^abelova.ni@phystech.edu

In this study, we analyzed metabolic profiles of two white lupin cultivars with different susceptibility to primary infection caused by two *C. lupini* strains to reveal key metabolites involved in the defense response of seedlings to the pathogen. It was shown that anthracnose-resistant cultivar «SN 5-19» had a more pronounced defense response against the infection than the sensitive «Michurinskij» cultivar. Fumaric acid and gamma-aminobutyric acid (GABA) are proposed as potential markers of *C. lupini* infection.

Keywords: *Lupinus albus*, anthracnose, biotic stresses, metabolic profiling, GC-MS

УДК 577.29

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА VIGS В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГЕНОМИКЕ ОДНОДОЛЬНЫХ И ДВУДОЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ

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

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

e-mail: ^aboloti.anya@yandex.ru

В настоящее время существуют различные методы для исследования функций генов растений. В качестве одного из прогрессивных методов функциональной геномики выступает вирус-опосредованный сайленсинг генов (VIGS), геномы многочисленных вирусов были модифицированы в качестве векторов для данной технологии. Например, вирус погрешности табака (TRV) может активно распространяться по всему растению и имеет большой диапазон растений-хозяев. Однако применение TRV-VIGS на однодольных растениях является малоизученным. Нами были созданы конструкции для VIGS гена фитоен-десатуразы *Nicotiana benthamiana* (*NbPDS*) и *Triticum aestivum* L. (*TaPDS*). У растений *N. benthamiana*, зараженных TRV RNA2-NbPDS, проявились фотообесцвечивание и деформация листьев, а у зараженных TRV RNA2-TaPDS, проявились только симптомы вирусного заражения. В свою очередь у растений *T. aestivum*, зараженных TRV RNA2-TaPDS, фотообесцвечивания и симптомов заражения вирусом детектировано не было.

Ключевые слова: вирус-опосредованный сайленсинг генов, вирус погрешности табака, пшеница

Активное исследование геномов различных растений стало возможным благодаря использованию технологий секвенирования нового поколения. Такой подход позволил накопить огромный объем знаний о последовательности геномов, а также об их взаимосвязи с фенотипом. Однако обладать только информацией о последовательностях генов недостаточно для полного понимания их роли и влияния на фенотип растений. Для определения биологической функции, а также возможного практического

применения ранее идентифицированных генов необходимо проведение функционального анализа [1]. В настоящее время существуют различные методы для исследования функций генов растений. Одним из них является метод вирус-опосредованного сайленсинга генов (VIGS), основанный на пост-транскрипционном и транскрипционном подавлении экспрессии генов. Этот метод основан на использовании вирусных векторов, несущих целевой фрагмент гена, что приводит к производству дцРНК и РНК-

опосредованному подавлению экспрессии генов. Существует ряд вирусов, которые были модифицированы для эффективного подавления интересующего гена с помощью специфической последовательности. В настоящее время многие векторы, полученные из вирусов, оптимизированы для подавления активности более чем одного растения-хозяина, например вирусные векторы, полученные из вируса погрешности табака (TRV), которые используются для *Arabidopsis* и *Nicotiana benthamiana*. Однако использование TRV-VIGS на однодольных растениях, и, в частности на пшенице, является малоизученным [2, 3].

Ранее в нашей работе для идентификации новых генов, потенциально вовлечённых в развитие зерновки злаковых, нами был проведён комплексный анализ транскриптома с использованием нанопорового секвенирования кДНК и РНК на разных стадиях развития зерновки. Полученные нами данные демонстрируют, что 17 % (7128) генов, экспрессирующихся во время развития семян, находятся в областях геномов А, В и R тритикале, которые не были аннотированы в геномах пшеницы и ржи как транскрипционно активные. Нами было показано, что более 10 % транскриптома развивающихся семян тритикале представлено днРНК, что позволяет предположить об их важной роли в данном биологическом процессе [4]. Для выявления биологической функции данных генов и их практического использования мы применили метод TRV-VIGS. В данной работе нами были произведены сборка и клонирование конструкций для VIGS гена фитоен-десатуразы PDS *Nicotiana benthamiana* (*NbPDS*) и *Triticum aestivum* L. (*TaPDS*). Созданные конструкции были использованы для заражения растений, используя вакуумную инфильтрацию наклюнувшихся зерновок и 3-дневных проростков пшеницы агробактериями и вирусными частицами, наработанными в растениях табака, *Nicotiana benthamiana*. Агробактериальная инфильтрация проводилась на 25-дневных растениях табака с использованием конструкций TRV RNA2-NbPDS и TRV RNA2-TaPDS. Только растения *N. benthamiana*, зараженные TRV RNA2-NbPDS, проявляли системное

фотообесцвечивание и деформацию листьев, в то время как растения, зараженные TRV RNA2-TaPDS, проявляли только симптомы вирусного заражения. У растений *T. aestivum*, зараженных TRV RNA2-TaPDS отсутствовали как фотообесцвечивание, так и симптомы заражения вирусом. Анализ с помощью ПЦР обратной транскрипцией (ОТ-ПЦР) свидетельствовал о репликации и системном распространении рекомбинантного TRV у *N. benthamiana*. В то же время РНК вируса в растениях пшеницы не была детектирована как после агроинфильтрации, так и после заражения вирусными частицами. Инокулированные растения демонстрировали отсутствие симптомов заражения и, соответственно репликации вируса, что было также подтверждено анализом ОТ-ПЦР.

В ходе данного исследования было показано, что применение векторов TRV для VIGS на пшенице не приводит к заражению растений, что может быть связано с невосприимчивостью *T. aestivum* к агробактериям или самому вирусу TRV.

Список литературы

1. Henry, Robert J. Progress in plant genome sequencing // Applied Biosciences. 2022. Т. 1. №. 2. С. 113-128.
2. Mellado-Sanchez M. et al. Virus-mediated transient expression techniques enable gene function studies in black-grass // Plant Physiology. 2020. Т. 183. №. 2. С. 455-459.
3. Zhang J. et al. Vacuum and co-cultivation agroinfiltration of (germinated) seeds results in tobacco rattle virus (TRV) mediated whole-plant virus-induced gene silencing (VIGS) in wheat and maize //Frontiers in plant science. 2017. Т. 8. С. 393.
4. Polkhovskaya E. et al. Long-Read cDNA Sequencing Revealed Novel Expressed Genes and Dynamic Transcriptome Landscape of Triticale (x Triticosecale Wittmack) Seed at Different Developing Stages //Agronomy. 2023. Т. 13. №. 2. С. 292.

APPLICATION OF THE VIGS METHOD IN FUNCTIONAL GENOMICS OF MONOCOTYLEDONOUS AND DICOTYLEDONOUS PLANTS

Bolotina A.A.^{2,a}, **Polkhovskaya E.S.**¹, **Kirov I.V.**^{1,2}

¹ All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

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

e-mail: ^a boloti.anya@yandex.ru

Now there are various methods for studying the functions of plant genes, such as the virus-induced gene silencing (VIGS) method. To date, the genomes of numerous viruses have been modified as VIGS vectors. For example, the Tobacco rattle virus (TRV) can actively spread throughout the plant, has a wide range of host plants. However, the use of TRV-VIGS on monocotyledonous plants is poorly studied. We have created constructs for the VIGS gene of phytoendesaturase genes

of *Nicotiana benthamiana* (NbPDS) and *Triticum aestivum* L. (TaPDS). *N. benthamiana* plants infected with TRV RNA2-NbPDS showed photobleaching and deformation of leaves, while those infected with TRV RNA2-TaPDS showed only symptoms of viral infection. While in *T. aestivum* infected with TRV RNA2-TaPDS, neither photobleaching nor symptoms of infection with the virus were detected.

Keywords: *virus-induced gene silencing, tobacco rattle virus, wheat*

Active research of genomes of various plants has become possible thanks to the use of new generation sequencing technologies. This approach has allowed us to accumulate a huge amount of knowledge about the sequence of genomes, as well as about their relationship with the phenotype. However, having only information about gene sequences is not enough to fully understand their role and influence on plant phenotype. To do this, it is necessary to carry out a functional analysis of already identified genes in order to determine their biological function and possible practical applications [1]. Currently, there are various methods for studying the functions of plant genes. One of them is the virus-induced gene silencing (VIGS) method based on post-transcriptional and transcriptional suppression of gene expression. This method is based on

the use of viral vectors carrying the target gene fragment to produce dsRNAs that trigger RNA-mediated gene suppression. There are a number of viruses that have been modified to effectively suppress the gene of interest using a specific sequence. Currently, many vectors derived from viruses are optimized to suppress the activity of more than one host plant, for example, viral vectors derived from Tobacco rattle virus (TRV), which are used for *Arabidopsis* and *Nicotiana benthamiana*. However, the use of TRV-VIGS on monocotyledonous plants, and in particular on wheat, is poorly studied [2,3].

In the course of this study, it was shown that the use of TRV vectors for VIGS on wheat does not lead to infection of plants, which may be due to the immunity of *T. aestivum* to agrobacteria or the TRV virus itself.

УДК 636.5:636.082:577.2

ИДЕНТИФИКАЦИЯ SNP, СВЯЗАННЫХ С МЯСНОЙ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ У МОЛОДНЯКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПТИЦЫ

Ветох А.Н.^а, Котова Т.О., Ларионова П.В., Волкова Н.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», 142132, Московская обл., г.о. Подольск, пос. Дубровицы, д. 60, Российская Федерация
e-mail: ^а anastazuya@mail.ru

В данной работе были изучены весовые и линейные показатели телосложения молодняка сельскохозяйственной птицы модельной ресурсной популяции второго поколения, связанных с мясной продуктивностью, для проведения полногеномного анализа ассоциаций с целью идентификации геномных вариантов, связанных с проявлением данных признаков.

Ключевые слова: *ресурсная популяция, сельскохозяйственная птица, фенотипирование, генотипирование, ассоциативные исследования*

Определение мясной продуктивности является одним из ключевых показателей при разведении сельскохозяйственной птицы. Идентификация SNP (single nucleotide polymorphisms), связанных с мясной продуктивностью, является перспективным направлением в современной генетике. Мясная продуктивность определяется множеством генов, ответственных за рост, развитие, структуру мышц и качество мяса птицы. Это исследование направлено на выявление SNP и изучение достоверности их влияния на показатели роста и развития, связанные с мясной продуктивностью, у молодняка сельскохозяйственной птицы ресурсных популяций. Модельные особи ресурсных популяций второго поколения (F2)

были получены посредством серии межпородных скрещиваний яичных и мясных пород. Родительские формы кур были представлены породами русская белая и корниш. Снятие фенотипических показателей осуществляли в возрасте 2, 4, 6 и 8 недель. Было выявлено, что показатель живой массы в ресурсных популяциях характеризовался высокой изменчивостью. Генотипирование кур проводилось с использованием ДНК-чипа Chicken SNP60K BeadChip (Illumina Inc., США), содержащего ~60000 SNP. В ходе данного исследования были проанализированы данные о генотипах и фенотипах более 100 особей. В среде R с использованием программного обеспечения PLINK 1.9 были изучены ассоциации между данными

полногеномного генотипирования с живой массой и линейными промерами, отражающими физическое развитие птицы. На основании проведенного GWAS-анализа у кур было найдено 3072 SNP достоверно связанных с живой массой, 2115 SNP – ассоциированных с длиной туловища, 2538 – связанных с шириной таза, а также 1552 достоверно значимых SNP для показателя глубина груди на всех исследуемых хромосомах. При этом с учетом коэффициента значимости $p < 0,00001$ у всех изучаемых показателей во всех исследованных возрастах количество

мутаций на всех хромосомах составляло 160, 109, 270 и 108 SNP соответственно. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов селекции сельскохозяйственных птиц, а выявленные SNP могут быть в дальнейшем изучены в качестве генетических маркеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № 0445-2021-0005.

IDENTIFICATION OF SNPs ASSOCIATED WITH MEAT PRODUCTION IN YOUNG POULTRY

Vetokh A.N.^a, Kotova T.O., Larionova P.V., Volkova N.A.

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Dubrovitsy 60, Podolsk, Moscow region, Russian Federation, 142132

e-mail: ^a anastezuya@mail.ru

In this work, the weight and linear body parameters of young poultry of the model resource population of the second generation, associated with meat productivity, were studied in order to conduct a genome-wide analysis of associations in order to identify genomic variants associated with the manifestation of these traits.

Keywords: *resource population, poultry, phenotyping, genotyping, association studies*

Determination of meat productivity is one of the key indicators in the breeding of poultry. The identification of SNPs (single nucleotide polymorphisms) associated with meat productivity is a promising direction in modern genetics. Many genes responsible for the growth, development, muscle structure and quality of poultry meat determine meat productivity. This study is aimed at identifying SNPs and studying the reliability of their impact on growth and development indicators associated with meat productivity in young poultry of resource populations. Model individuals of the second-generation resource populations (F2) were obtained through a series of interbreeding of egg and meat breeds. The Russian White and Cornish breeds represented parental forms of chickens. Phenotypic measurements were performed at 2, 4, 6, and 8 weeks of age. It was found that the indicator of live weight in resource populations was characterized by high variability. Chicken genotyping was carried out using a Chicken SNP60K BeadChip DNA chip (Illumina Inc., USA) containing ~60,000 SNPs. In the course of this study, data on the genotypes and phenotypes of more than 100

individuals were analyzed. In the R environment, using the PLINK 1.9 software, the associations between genome-wide genotyping data with live weight and linear measurements reflecting the physical development of the bird were studied. Based on the GWAS analysis, 3072 SNPs were found significantly associated with body weight, 2115 SNPs associated with body length, 2538 SNPs associated with pelvic width, and 1552 significantly significant SNPs for chest depth on all studied chromosomes. At the same time, taking into account the significance coefficient $p < 0.00001$, for all the studied parameters at all studied ages, the number of mutations on all chromosomes was 160, 109, 270, and 108 SNPs, respectively. The results of the study can be used to develop new breeding methods for poultry, and the identified SNPs can be further studied as genetic markers.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 0445-2021-0005.

ИЗУЧЕНИЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ VIGS

Власова А.В.^{1,2,а}, Камараули Е.Д.^{1,2}, Перевозчиков Д.В.³, Киров И.В.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация

e-mail: ^а vlasova.nactia@yandex.ru

Мобильные элементы (МЭ) обнаружены почти во всех организмах и часто составляют основную часть генома. Они представляют собой последовательность ДНК, способную перемещаться и реплицироваться в геноме, увеличивая его размер и порождая новые мутации, тем самым обеспечивая эволюцию новым генетическим материалом. Однако в организмах при нормальных условиях чаще всего мобильные элементы неактивны благодаря эпигенетическим защитным механизмам. Из-за этого возникают огромные проблемы в изучении МЭ. В нашей работе в качестве инструмента для подавления эпигенетического контроля над мобильными элементами предлагается вирус-индуцированный сайленсинг генов (VIGS), который позволит снизить экспрессию генов репрессии мобильных элементов и, тем самым, активировать их.

Ключевые слова: Метилирование, эпигеном, мобильные элементы, VIGS

Мобильные элементы играют центральную роль в эволюции растений и могут быть мощным эндогенным источником генетической и эпигенетической изменчивости для селекции сельскохозяйственных культур [1, 2]. Однако, чтобы ограничить мутационное воздействие и защитить от летальных мутаций растение, транспозиционная активность мобильных элементов находится под жестким контролем с помощью механизмов эпигенетического молчания. Высокопроизводительные методы и последние исследования в области мобилома растений значительно продвинули понимание механизмов регуляции мобильных элементов путем метилирования ДНК. В частности, в работе Cuerda-Gil and Slotkin (2016) [3] был описан уникальный механизм РНК-зависимого ДНК метилирования (RdDM), в котором участвуют РНК-полимеразы IV и V, RDR2 и RDR6, дайсер-подобный белок DCL3, а также метилтрансфераза DRM2, с помощью которых осуществляется метилирование мобильных элементов. Кроме этого, важную роль в эпигенетической регуляции активности МЭ играет ген DDM1, кодирующий ремоделер хроматина. С его помощью обеспечивается доступ ДНК-метилтрансфераз к гетерохроматину, что позволяет стабильно подавлять мобильные элементы [4]. Благодаря знаниям о механизмах контроля мобильных элементов и генов, участвующих в этих процессах, можно воздействуя на эти гены, активировать транспозоны.

В качестве инструмента для временного подавления экспрессии генов регуляции мобильных элементов нами предложен известный метод вирус-индуцированного сайленсинга генов (VIGS), используемый для функциональной геномики [5]. В основе VIGS лежит РНК-опосредованный механизм противовирусной защиты растений, приводящий к посттранскрипционному сайленсингу генов (PTGS). Этот метод представляет собой природный инструмент регуляции активности генов с помощью малых двуцепочечных РНК. С помощью VIGS возможно таргетно воздействовать на гены, участвующие в эпигенетической регуляции мобильных элементов.

Используя VIGS в нашей работе, мы осуществили вирус-индуцированный сайленсинг гена *ddm1* Арабидопсиса, который участвует в пути метилирования мобильных элементов в гетерохроматине, и обнаружили снижение экспрессии гена *ddm1* с помощью qPCR. Кроме того, мы подавили экспрессию гена *nrpe1*, кодирующего большую субъединицу Pol V, которая участвует как в канонических, так и в неканонических путях РНК-зависимого метилирования ДНК (RdDM). И мы обнаружили активацию транспозона ONSEN у мутантов VIGS *pTRV2-nrpe1* в ответ на тепловой шок.

Таким образом, в нашей работе представлен подход для модификации эпигенома растений, основанного на вирус-индуцированном сайленсинге генов (VIGS), вовлеченных в регуляцию мобильных

элементов, который позволит открыть новые возможности в их изучении.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-64-00076.

Список литературы

1. Gilbert C., Feschotte C. Horizontal acquisition of transposable elements and viral sequences: patterns and consequences // *Current opinion in genetics & development*. 2018. Vol. 49. PP. 15-24.

2. The Arabidopsis thaliana mobilome and its impact at the species level / L. Quadrana [et al.] // *eLife*. 2016. Vol. 5. P. e15716.

3. Cuerda-Gil D., Slotkin R.K. Non-canonical RNA-directed DNA methylation // *Nature plants*. 2016. Vol. 2. № 11. PP. 1-8.

4. The Arabidopsis nucleosome remodeler DDM1 allows DNA methyltransferases to access H1-containing heterochromatin / A. Zemach [et al.] // *Cell*. 2013. Vol. 153. № 1. PP. 193-205.

5. Applications and advantages of virus-induced gene silencing for gene function studies in plants / T.M. Burch-Smith [et al.] // *The Plant Journal*. 2004. Vol. 39. № 5. PP. 734-746.

STUDY OF EPIGENETIC REGULATION OF MOBILE PLANT ELEMENTS USING VIGS

Vlasova A.V.^{1,2,a}, Kamarauli E.D.^{1,2}, Perevozchikov D.V.³, Kirov I.V.^{1,2}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

²Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

³Russian State Agrarian University – MTAA, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

e-mail: ^avlasova.nactia@yandex.ru

Transposable elements are found in almost all organisms and often make up the bulk of the genome. They (TEs) are DNA sequences that move and replicate in the genome, increasing its size and generating new mutations, providing evolution with new genetic material. However, in organisms, under normal conditions, transposable elements are most often inactive by epigenetic defense mechanisms. Because of this, there are huge difficulties in studying of TEs. In our work, virus induced gene silencing (VIGS) is proposed as a tool to suppress epigenetic control of transposable elements by reducing the expression of TEs repression genes and activating them.

Keywords: *methylation, epigenome, transposable elements, VIGS*

Transposable elements (TEs) can be a powerful endogenous source of genetic and epigenetic variability for crop breeding. However, TEs are under epigenetic control, such as DNA methylation, chromatin remodeling and microRNAs. To date, we have information about genes involved in methylation of transposable elements such as *nrpe1*, *nripd*, *ddm1*, *rdr6*, *drm2*. With this information, we can reduce the expression of these genes, to suppress epigenetic control of transposable elements. We propose to use virus induced gene silencing (VIGS) as a tool for silencing the above genes.

Using VIGS, we silenced the Arabidopsis *ddm1* gene, which involved in the mobile elements methylation pathway in heterochromatin and detected a decrease in *ddm1* gene expression using qPCR. In addition, we silenced the *nrpe* gene encoding the largest subunit Pol V, which is involved in both canonical and non-canonical RNA dependent DNA methylation (RdDM) pathways. And we detected activation of the transposon ONSEN in VIGS *TRV-nrpe* mutants in response to heat shock.

СООТНОШЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ЦИТОХРОМОВ P450 И СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ФИТОПАТОГЕННЫХ БАКТЕРИЙ РОДА *XANTHOMONAS*

Гайсина Э.М.^{1,а}, Тешич С.¹, Кырова Е.И.², Никитинская Е.³, Никитинский Д.³, Игнатов А.Н.¹

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6., Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», 196608, г. Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, д. 3, Российская Федерация

³ ООО БиоСпарк, 108841, г. Москва, ул. Промышленная д. 2Б, Российская Федерация

e-mail: ^а gaysina-em@pfur.ru

Специализация бактерий рода *Xanthomonas* связана с их способностью разрушать вторичные метаболиты антимикробных препаратов в растениях. Система цитохром P450 редуктаза – цитохром P-450 (CYP450) участвует в метаболизме ксенобиотиков и токсинов в бактериальных клетках. Исследование выявило межвидовые различия в последовательности гена CYP450 среди видов *Xanthomonas* и позволяет предположить горизонтальный перенос во время их развития на одном и том же растении-хозяине.

Ключевые слова: горизонтальный перенос генов, устойчивость, бактерии *Xanthomonas*

Представители фитопатогенного рода *Xanthomonas* поражают около 500 видов растений [1] и включают примерно 40 видов и не менее 150 т.н. «патоваров», отличающихся спектром поражаемых растений или типом вызываемых симптомов болезни [2]. Специализация патогена часто связывается со способностью бактерий деградировать вторичные метаболиты, выполняющие антимикробную функцию для защиты растения. Метаболизм ксенобиотиков и токсинов в бактериальных клетках осуществляет система цитохром P450-редуктаза – цитохром P-450 (CYP450). У фитопатогенных бактерий данная система принимает участие в деструкции стрессовых метаболитов инфицированных растений (фитоалексинов) [3]. Вследствие важной роли в метаболизме бактерий [4] цитохромы CYP450 внутри одного семейства являются умеренно эволюционирующими генами. Мутации в данном гене у бактерий влияют на их способность поражать растения и животные организмы, ослабляют вирулентную способность и отражаются на специфичности паразитизма бактерии [5]. Гены NADPH и цитохрома P-450 присутствуют у всех видов *Xanthomonas spp.* При сравнении нуклеотидных последовательностей CYP450 рода *Xanthomonas spp.* из ГенБанка были выявлены четкие межвидовые различия последовательности гена CYP-450 групп CYP133B4, CYP152W1, CYP198A1 у штаммов *X. campestris* и других видов. Последовательности наиболее близких генов у других видов имели не более 60 % сходства по белковым последовательностям. Продукты гена CYP133 (CYP1B1) имеют монооксигеназную активность, продукты генов CYP152 обладают десатуразной активностью в отношении жирных кислот [6]. Наличие почти идентичных

последовательностей у различных видов, например у *X. campestris* и части штаммов *X. arboricola*, поражающих капустные культуры, или сходных последовательностей у *X. oryzae* и *X. translucens* (CYP112, CYP115, CYP117), поражающих злаки, не может являться результатом параллельной эволюции гена у штаммов разных видов. Мы предполагаем наличие горизонтального переноса генов цитохром P-450 при совместном развитии бактерий на одном растении-хозяине.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-26-00168).

Список литературы

1. The host range of the genus *Xanthomonas* / F. Leyns, M. De Cleene, J.G. Swings, J. De Ley // The Botanical Review. 1984. Vol. №50(3). PP. 308-56.
2. Cruciferous Weed Isolates of *Xanthomonas campestris* Yield Insight into Pathovar Genomic Relationships and Genetic Determinants of Host and Tissue Specificity / Z.E. Dubrow, S.C. Carpenter, M.E. Carter [et al.]. Molecular Plant-Microbe Interactions. 2022. Vol. №35(9). PP.791-802.
3. Nelson D.R. Cytochrome P450 and the individuality of species / Archives of biochemistry and biophysics. 1999. Sep 1. Vol. 369(1). PP. 1-0.
4. Guengerich F.P. Cytochrome P-450 3A4: regulation and role in drug metabolism // Annual review of pharmacology and toxicology. 1999 Apr. Vol. 39(1). PP. 1-7.
5. In Silico Analysis of P450s and Their Role in Secondary Metabolism in the Bacterial Class

Gammaproteobacteria / N.N. Msomi, T. Padayachee, N. Nzuza [et al.] // *Molecules*. 2021. Vol. 26. P. 1538.

6. Mechanistic studies of fatty acid activation by CYP152 peroxygenases reveal unexpected desaturase activity / M. Pickl, S. Kurakin, F.G. Cantú Reinhard [et al.] // *ACS Catal.* 2019. Vol. 9. PP. 565-577.

CORRELATION BETWEEN GENETIC DIVERSITY OF CYTOCHROMES P450 AND SPECIALISATION OF PHYTOPATHOGENIC BACTERIA OF THE GENUS *XANTHOMONAS*

Gaisina E.M.^{1,a}, Tesic S.¹, Kyrova E.I.², Nikitinskaya E.³, Nikitinsky D.³, Ignatov A.N.¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Miklukho-Maklaya st. 6, Moscow, Russian Federation, 117198

² Federal State Budget Scientific Institution All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo st. 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608

³ BioSpark LLC, Promyshlennaya st. 2B, Moscow, Russian Federation, 108841
e-mail: ^a gaisina-em@pfur.ru

The specialization of the genus *Xanthomonas* bacteria is related to their ability to degrade secondary metabolites of antimicrobial drugs in plants. The cytochrome P450 reductase - cytochrome P-450 (CYP450) system is involved in the metabolism of xenobiotics and toxins in bacterial cells. The study revealed interspecific differences in CYP450 gene sequence among *Xanthomonas* species, suggesting horizontal transfer during their development on the same host plant.

Keywords: horizontal gene transfer, resistance, *Xanthomonas* bacteria

Members of the phytopathogenic genus *Xanthomonas* affect about 500 plant species [1], and includes about 40 species and at least 150 so-called "pathovars" that differ in the spectrum of plants affected or the type of disease symptoms caused [2]. Pathogen specialisation is often associated with the ability of bacteria to degrade secondary metabolites that perform an antimicrobial function to protect the plant. Metabolism of xenobiotics and toxins in bacterial cells is carried out by the cytochrome P450 reductase - cytochrome P-450 (CYP450) system. Mutations in this gene in bacteria affect their ability to infect plants and animal organisms, weaken virulence ability and affect the specificity of parasitism of the bacterium [5]. NADPH and cytochrome P-450 genes are present in all species of *Xanthomonas*. When comparing the nucleotide sequences

of CYP450 of *Xanthomonas* spp. from the NCBI GenBank, clear interspecific sequence differences of gene sequence in CYP133B4, CYP152W1, and CYP198A1 groups in *X. campestris* strains and other species were revealed. CYP133 (CYP1B1) gene products have monooxygenase activity, CYP152 gene products have desaturase activity with respect to fatty acids [6]. The presence of almost identical sequences in different species, for example, in *X. campestris* and *X. arboricola* strains affecting cabbage crops, or similar sequences in *X. oryzae* and *X. translucens* (CYP112, CYP115, and CYP117) affecting cereals, cannot be the result of parallel gene evolution in strains of different species. We assume the presence of horizontal transfer of cytochrome P-450 genes during the co-development of bacteria on the same host plant.

УДК 578.828.11

ПОИСК ГЕНЕТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ВИРУСА ЛЕЙКОЗА КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПО ГЕНУ *GAG*

Горбунова М.Е., Шангараев Р.И., Хаммадов Н.И., Усольцев К.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности», 420075, г. Казань, ул. Научный городок-2, Республика Татарстан, Российская Федерация
e-mail: vnivi@mail.ru

В статье приводятся результаты по поиску специфичного участка для дифференциации вируса лейкоза крупного рогатого скота по гену *gag* с использованием метода ПДРФ. В настоящей работе исследовали 24 нуклеотидные последовательности гена *gag* изолятов вируса, отобранные из базы данных ресурсов NCBI. *In silico* подобраны условия идентификации данного возбудителя и распределения на семь групп с применением шести эндонуклеаз рестрикции: *Cac8I*, *DpnII* (*Chal*), *MfeI*, *BglIII*, *BfaI*, *BstUI*.

Ключевые слова: ВЛ КРС, изолят, ПДРФ, генотипирование, ген *gag*, эндонуклеазы рестрикции

Введение

Лейкоз крупного рогатого скота – хронически протекающая инфекционная болезнь, характеризующаяся лимфоцитозом и злокачественной пролиферацией клеток ретикуло-эндотелиальной системы в различных внутренних органах [1]. Вирус лейкоза крупного рогатого скота (ВЛ КРС) поражает скот в Северной и Южной Америке, в некоторых государствах Центральной Азии и Ближнего Востока, а также Центральной и Восточной Европы [2, 3].

Геном ВЛ КРС имеет следующую структуру: 5'-LTR-*gag-pol-env*-*rXbl*-LTR-3'. LTR (long terminal repeat) представляют собой длинные концевые повторы (около 530 п.о.), включающие в себя три региона U3, R и U5 [4]. Для молекулярной индикации ВЛКРС используют наиболее консервативные участки генома вируса, расположенные в генах *gag*, *pol* и *env*.

Современная филогенетическая классификация ВЛ КРС основывается на изучении гена *env* и регламентирует наличие двенадцати генотипов [5]. Однако вопросы полиморфизма гена *gag* изучены недостаточно [6, 7]. Согласно данным литературы, единая стратегия генотипирования по маркерным локусам гена *gag* отсутствует [8].

Целью данной работы являлся поиск специфичного участка гена *gag* ВЛКРС, пригодного для его генотипирования.

Материалы и методы

Нуклеотидные последовательности генома ВЛ КРС по гену *gag* были получены из базы данных ресурсов NCBI: LC080656, LC080658, LC080652, LC080666, LC080659, LC080654, LC080655, LC080667, HE967302, K02120, KT122858, LC577640, LC577637, AP018007, AP018012, AP018032, FLK – BLVEF600696, MG800837, MG800836, MG800834, LC154849, LC552982, D00647, MN966703. Биоинформационный анализ был проведен согласно следующей схеме: исследование отобранных нуклеотидных последовательностей гена *gag* изолятов ВЛ КРС (множественное выравнивание) с целью поиска участка, пригодного для генотипирования по данному гену; конструирование праймеров с помощью алгоритма ClustalW Sequence Alignment; дизайн

олигонуклеотидных последовательностей праймеров. Проверку качества, термодинамический анализ, выполняли в программе «Vector NTI 9.1.0»; скрининг известных эндонуклеаз рестрикций для формирования оптимального протокола идентификации путем моделирования ПЦР-ПДРФ-профилей нуклеотидных последовательностей локуса *gag* гена проводили в программе «Vector NTI 9.1.0».

Результаты и их обсуждение

На основании множественного выравнивая указанных выше нуклеотидных последовательностей, был выбран участок гена *gag* размером 577 п.н. в области *r24* (862–1438 п.н.). С использованием программы «Vector NTI 9.1.0» в пределах данного локуса сконструировали праймеры: F*gag* - 5'-*accctaaacgaagtgtctctcaaacga*-3'; R*gag* - 5'-*cgctcggaagggtgtcagctaag*-3'.

Для генотипирования методом ПДРФ был проведен скрининг известных эндонуклеаз рестрикций для формирования оптимального протокола идентификации 24 представителей ВЛ КРС, опубликованных в базе данных GenBank (табл. 1).

По результатам оценки рестрикционных картировок исследуемого фрагмента гена *gag* нами были подобраны условия идентификации ВЛ КРС по шести эндонуклеазам рестрикции: *Cac8I*, *DpnII* (*Chal*), *MfeI*, *BglIII*, *BfaI*, *BstUI*. Таким образом, все анализируемые изоляты ВЛ КРС на основании полученных *gag*-ПЦР-ПДРФ-профилей были разделены на семь групп [8].

Заключение

Результаты проведенных исследований *in silico* показали возможность использования участка гена *gag* размером 577 п.н. в области *r24* (862–1438 п.н.) для генотипирования вируса лейкоза крупного рогатого скота методом ПДРФ. Разработаны условия идентификации ВЛ КРС по гену *gag* с использованием шести эндонуклеаз рестрикции: *Cac8I*, *DpnII* (*Chal*), *MfeI*, *BglIII*, *BfaI*, *BstUI*. Таким образом, все анализируемые изоляты ВЛ КРС на основании полученных *gag*-ПЦР-ПДРФ-профилей были разделены на семь групп.

Протокол ПЦР-ПДРФ - генотипирования вируса лейкоза крупного рогатого скота

Группа	ПЦР продукт	ПДРФ – фрагменты (п.н.)					
		<i>Cac8I</i>	<i>BglIII</i>	<i>BstUI</i>	<i>MfeI</i>	<i>DpnII (Chal)</i>	<i>Bfal</i>
1	577	230/347	577	577	324/253	418/159	253/324
2	577	230/347	577	577	324/253	418/159	577
3	577	230/347	577	577	577	418/159	253/324
4	577	40/190/347	577	128/449	577	418/159	253/324
			414/163				
5	577	230/347	577	128/449	577	418/159	253/324
		577					
6	577	230/347	414/163	128/449	577	159/193/225	253/324
						418/159	
7	577	230/347	577	128/449	577	126/159/292	253/324
				577		577	

Список литературы

1. Генетические особенности российских форм вируса лейкоза крупного рогатого скота / М.Н. Рузина [и др.] // Генетика. 2013. Т. 49. № 8. С. 975-980.

2. Кужебаева У.Ж., Канатбаев С.Г., Кайленова А.Т. Определение вируса лейкоза у крупного рогатого скота серологическим методом // Сборник научных трудов КНЦЗВ. 2022. Т. 11. № 1. С. 302-305.

3. Мониторинг эпизоотической ситуации лейкоза крупного рогатого скота в Республике Татарстан с применением молекулярно-генетических и серологических методов диагностики / Р.И. Шангараев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 1 (219). С. 58-64.

4. A new approach to the diagnosis of enzootic leukemia by genetic markers of bovine leukemia virus / M.E. Gorbunova [et al.] // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2022. Т. 12. № 4. PP. 4448-4462.

5. Molecular Characterization of Bovine Leukemia Virus with the Evidence of a New Genotype Circulating

in Cattle from Kazakhstan. / A. Sultanov [et al.] // Pathogens. 2022. Vol. 11. № 2. P. 180.

6. Горбунова М.Е. Разработка способа экспресс диагностики лейкоза крупного рогатого скота, основанного на обнаружении гена нуклеокапсидного белка р24 методом ПЦР в режиме реального времени // Ветеринарный врач. 2016. № 6. С. 3-7.

7. Генотипическое разнообразие вируса лейкоза крупного рогатого скота разной породной принадлежности / П.Н.Смирнов [и др.] // Аграрный вестник Урала. 2009. № 7 (61). С. 89-91.

8. Горбунова М.Е. Разработка системы генетического типирования вируса лейкоза крупного рогатого скота: автореф. на соиск. ученой степ. канд. биол. наук: 4.2.3 – инфекционные болезни и иммунология животных Уфа, 2023. 20 с. URL: https://www.bsau.ru/upload/iblock/c50/Автореферат_Горбунова_20М.Е..pdf (дата обращения 26.06.2023).

SEARCH FOR GENETIC MARKERS FOR DIFFERENTIATION OF BOVINE LEUKEMIA VIRUS BY GAG GENE

Gorbunova M.E., Shangaraev R.I., Khammadox N.I., Usoltsev K.V.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety», Nauchny Gorodok-2 st., Kazan, Russian Federation, 420075

e-mail: vnivi@mail.ru

The article presents the results of the search for a specific site for the genotyping of the bovine leukemia virus by the *gag* gene, using the RFLP method. In the present research, 24 nucleotide sequences of the *gag* gene of virus isolates selected from the NCBI resource database were studied. *In silico*, the conditions for the identification of this pathogen and distribution into seven groups were selected using six restriction endonucleases: *Cac8I*, *DpnII (Chal)*, *MfeI*, *BglIII*, *Bfal*, *BstUI*.

Keywords: BLV, isolate, RFLP, genotyping, *gag* gene, restriction endonucleases

According to the results of multiple alignments of the nucleotide sequences of the *gag* gene, a 577 bp site was selected in the p24 region (862-1438 bp). Using the «Vector NTI 9.1.0» program, primers were constructed within this locus: F_{gag} - 5'-accctaaacgaagtgtctctcaaacga-3'; R_{gag}-5'-cgctcggaaggtgtcagctaag-3'.

For genotyping by the RFLP method, it was necessary to develop an analysis scheme. Based on the results of the evaluation of restriction mapping of the

studied fragment of the *gag* gene, we have selected the conditions for the identification of BLV by six restriction endonucleases: *Cac8I*, *DpnII* (*Chal*), *MfeI*, *BglIII*, *BfaI*, *BstUI*. Thus, all the analyzed isolates of cattle on the basis of the obtained *gag*-PCR-RFLP profiles were divided into seven groups.

The uses of studied restriction endonucleases are optimal for differentiation of various virus isolates, relative to the polymorphism of nucleic acids by the *gag* gene.

УДК 633.1:631.527.11:577.112.083:577.112.827

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФОРЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ НМВ-GS ДЛЯ ОТБОРА КОНСТАНТНЫХ ФОРМ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ

Груздев И.В.^{1,а}, Москалев Е.А.², Соловьев А.А.^{1,3}, Киров И.В.^{1,4}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений», 140150, Московская обл., г.о. Раменский, р.п. Быково, ул. Пограничная, д. 32, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

e-mail: ^а gruzdev82mtz@mail.ru

Запасные белки зерна, особое значение среди которых имеют высокомолекулярные субъединицы глютеинов (High Molecular Weight Glutenin Subunits, HMW-GS), являются надежными генетическими маркерами и широко используются для идентификации сортов пшеницы и ячменя. Тритикале (*xTriticosecale* Wittm.), являясь преимущественно самоопыляемым растением, характеризуется, при определенных условиях, некоторой величиной перекрестного опыления, что затрудняет селекцию и семеноводство этой культуры. В данном исследовании проведена идентификация и изучен состав HMW-GS у растений 20 сортов и линий яровой тритикале, отобраны гомозиготные формы, показана возможность использования электрофоретических профилей HMW-GS для решения широкого спектра задач.

Ключевые слова: яровая тритикале, селекция, запасные белки, высокомолекулярные глютеины, электрофорез

Тритикале – зерновая культура, сочетающая геномные комплексы пшеницы и ржи. В производстве используются вторичные гексаплоидные тритикале (2n=42) [1]. Запасные белки тритикале представлены, как и у других злаковых культур, целым комплексом протеинов, важнейшими из которых являются высокомолекулярные субъединицы глютеинов [2]. Как и у пшеницы, у гексаплоидной тритикале по локусам, кодирующим высокомолекулярные глютеины (*Glu-A1*, *Glu-B1* и *Glu-R1*) наблюдается множественный аллелизм и кодминантный характер наследования [3], что позволяет использовать их в качестве маркеров для контроля гибридности и однородности семян в селекции и семеноводстве соответственно.

Селекция с помощью молекулярных маркеров (marker-assisted selection – MAS) быстрыми темпами

входит в селекционную практику. Разработка высокоспецифичных маркеров является приоритетной задачей для современных исследователей. Благодаря расшифровке последовательности генов, кодирующих запасные белки, методами высокопроизводительного секвенирования у пшеницы удается не только находить новые аллельные варианты, но разрабатывать специфичные маркеры. Нередко вновь найденные аллельные варианты коррелируют с высокими хлебопекарными качествами [4-6]. Тем не менее, влияние высокомолекулярных глютеинов на технологические качества тритикале остается изученным далеко не в полной мере. Подобный факт связан, по всей видимости, с тем, что значительная часть сортов отечественной селекции содержат от двух до 14 биотипов [7]. Это обстоятельство

усугубляется тем, что при определенных условиях тритикале склонно к хазмогамному цветению и, как следствие, характеризуется, некоторой величиной перекрестного опыления [8].

Настоящее исследование посвящено отбору константных форм из имеющегося генофонда сортов и линий яровой тритикале при помощи электрофореза в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия (SDS-PAGE) высокомолекулярных глютеинов с целью последующего размножения и оценки влияния отдельных HMW-GS на показатели технологических качеств этой культуры.

Идентификацию высокомолекулярных глютеинов проводили у 20 образцов яровой гексаплоидной тритикале среди которых: 7 сортов отечественной селекции (Тимирязевская 42, Ботаническая 4, Тимур, Доброе, Ровня, Ярило), 4 сорта зарубежной селекции (Ульяна, Dublet, Legalo, Rosner 612), а также 9 селекционных образцов. Экстракцию и фракционирование высокомолекулярных субъединиц глютеинов проводили в соответствии с протоколом SDS-PAGE, описанным Singh et al. (1991) в модификации Branlard et al. (2003) из половинок 5 индивидуальных зерновок, половинку зерновки с зародышем использовали для дальнейшего размножения. Номенклатура HMW-GS тритикале приведена в соответствии с Amour et al. (2002).

По результатам SDS-PAGE у изученных образцов были идентифицированы аллели *a*, *b* и *c* локуса *Glu-A1* (субъединицы 1, 2* и null соответственно); аллели *b* (7+8), *c* (7+9), *f* (13+16), *r* (7+18), *s* (6,8+20y) и *IV* (23+18) локуса *Glu-B1*; аллели *a* (1'+4'), *b* (2'+6,5'), *c* (6'+13'), *d* (2'+9') и *f* (0,8'+6') локуса *Glu-R1*. Помимо этого у одного из растений образца Ульяна обнаружена субъединица, которую не удалось классифицировать. Надо отметить, что распределение аллелей среди изученных растений образцов в значительной мере согласуется с ранними исследованиями [3]. Так, наиболее часто среди аллелей локуса *Glu-A1* встречается аллель *b* (2*), а по локусу *Glu-B1* аллель *s* (6,8+20y), по локусу *Glu-R1* в подавляющем большинстве случаев идентифицирован аллель *c* (6'+13').

В ходе исследования удалось установить, что 13 изученных образцов являются монобиотипными по HMW-GS. Еще у 4 образцов идентифицировано два биотипа. У сортов Ульяна и Rosner 612 зарегистрировано три биотипа, помимо этого сорт Rosner 612 является носителем редких аллелей локуса *Glu-B1*, а именно *f* (13+16) и *IV* (23+18). У сорта Ярило обнаружено 4 биотипа по HMW-GS.

Несмотря на широкое аллельное разнообразие локусов HMW-GS и склонность к перекрестному опылению, растения большинства образцов яровой

тритикале остаются однородными по набору высокомолекулярных глютеинов. Кроме того, в ходе исследования не обнаружено ни одной гетерозиготы. Однако HMW-GS составляют лишь одну из фракций запасных белков, поэтому исследование будет продолжено в рамках изучения проламиновых спектров.

Исследование проведено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Госзадание № FGUM-2022-0005).

Список литературы

1. Грабовец А.И., Крохмаль А.В. Тритикале: монография. Ростов-на-Дону: ООО «Издательство «Юг», 2018. 240 с.
2. Payne P.I. Genetics of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality // Ann. Rev. Plant Phys. 1987. Vol. 38. PP.141-153.
3. Diversity of seven glutenin and secalin loci within triticale cultivars grown in Europe / N. Amour [et al.] // Euphytica. 2002. Vol. 123. PP. 295-305.
4. Molecular characterization and marker development for high molecular weight glutenin subunit 1Dy12** from Yunnan hulled wheat / X.Y. Du [et al.] // Mol. Breed. 2019. Vol. 39. P. 4.
5. Identification of novel high molecular weight glutenin subunit mutants in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / L.A. Lombardo [et al.] // Cytogenet. Cell Genet. 2017. Vol. 51. №4. PP. 305-314.
6. SNP markers for early identification of high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS) in bread wheat / C. Ravel [et al.] // Theor. Appl. Genet. 2020. Vol. 133. PP. 751-770.
7. Ярова Э.Т., Тоболова Г.В. Использование электрофореза запасных белков для селекции яровой тритикале // Вестник КрасГАУ. 2021. № 5(170). С. 96-102.
8. Первичное открытое цветение и величина спонтанного перекрестного опыления озимой тритикале / В.С. Рубец [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 59. С. 320-328.
9. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin / N.K. Singh [et al.] // J. Cereal Sci. 1991. Vol. 14. PP. 203-208.
10. Allelic diversity of HMW and LMW glutenin subunits and omega-gliadins in French bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / G. Branlard [et al.] // Genetic Resources and Crop Evolution. 2003. Vol. 50. PP. 669-679.

THE USE OF HMW-GS ELECTROPHORETIC SPECTRA FOR THE SELECTION OF CONSTANT FORMS OF SPRING TRITICALE

Gruzdev I.V.^{1,a}, Moskalyov E.A.², Soloviev A.A.^{1,3}, Kirov I.V.^{1,4}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

²Russian State Agrarian University – MTAA, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

³All-Russian Plant Quarantine Centre, Pogradichnaya st. 32, Ramenskii, Bykovo, Moscow region, Russian Federation, 140150

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

e-mail: ^agruzdev82mtz@mail.ru

Grain storage proteins, among which high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS) are of particular importance, are reliable genetic markers and are widely used to identify wheat and barley varieties. Triticale (*×Triticosecale* Wittm.), being a predominantly self-pollinating plant, is characterized, under certain conditions, by a certain amount of cross-pollination, which complicates the breeding and seed production of this crop. In this study, the identification and composition of HMW-GS in plants of 20 varieties and lines of spring triticale was carried out, homozygous forms were selected, and the possibility of using HMW-GS electrophoretic profiles to solve a wide range of problems was shown.

Keywords: *spring triticale, plant breeding, storage proteins, high molecular weight glutenins, electrophoresis*

Triticale is a grain crop combining genomic complexes of wheat and rye. Secondary hexaploid triticales ($2n=42$) are used in production. Like wheat, hexaploid triticale has multiple allelism and codominant inheritance at the loci encoding HMW-GS (*Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-R1*), which allows them to be used as markers for controlling hybridity and uniformity of seeds in breeding and seed production, respectively. The effect of high-molecular-weight glutenins on the technological qualities of triticale remains far from fully studied.

The present study is devoted to the selection of constant forms from the existing gene pool of varieties and lines of spring triticale by SDS-PAGE of high-molecular glutenins for the purpose of subsequent reproduction and evaluation of the influence of individual

HMW-GS on the indicators of technological qualities of this culture.

According to the SDS-PAGE results, alleles *a*, *b* and *c* of the *Glu-A1* locus (subunits 1, 2* and null, respectively) were identified in the studied samples; alleles *b* (7+8), *c* (7+9), *f* (13+16), *r* (7+18), *s* (6,8+20u) and *IV* (23+18) *Glu-B1* loci; alleles *a* (1^r+4^r), *b* (2^r+6.5^r), *c* (6^r+13^r), *d* (2^r+9^r) and *f* (0,8^r+6^r) the *Glu-R1* locus. In addition, a subunit was found in one of the plants of the Ulyana variety, which could not be classified.

Despite the wide allelic diversity of BMW-GS loci and the tendency to cross-pollination, the plants of most spring triticale accessions remain homogeneous in terms of a set of high-molecular glutenins.

УДК 631.523

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ SRAP-МАРКЕРОВ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕЛОГО ЛЮПИНА

Душкин В.А., Клименко И.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр кормопроизводства агроэкологии имени В.Р. Вильямса», 141055, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, к. 1, Российская Федерация
e-mail: vniikormov@mail.ru

Представлены результаты изучения внутривидового генетического полиморфизма на основе SRAP-маркеров в коллекции образцов белого люпина.

Ключевые слова: *белый люпин, ПЦР-анализ, генотипирование, ДНК-полиморфизм, SRAP-маркеры*

Люпин – ценная высокобелковая кормовая культура, способная накапливать азот в симбиозе с бобово-ризобиальными бактериями, а также усваивать из почвы фосфор и другие питательные элементы за счет мощной корневой системы [0, 0]. Селекция белого люпина направлена на выведение низкоалкалоидных форм, устойчивых к антракнозу. С развитием современных методов, позволяющих создавать широкий спектр новых сортов с улучшенными характеристиками, возникают определенные трудности с оценкой их генетической ценности и достоверной сортовой идентификацией. В связи с этим, поиск эффективных способов изучения и отбора перспективного селекционного материала с помощью ДНК-маркирования является актуальным вопросом [0, 0].

Цель исследования заключалась в оценке эффективности SRAP- маркеров для выявления генетического полиморфизма у сортов и сортообразцов белого люпина.

Материалы и методы

Анализ проведен с использованием 7 сортов (Мичуринский, Альф парус, Белый сидерат, Дега, Гамма, Тимирязевский, Андромеда) и 8 перспективных сортообразцов (СН-17-14, СН-55-14, СН-8-12, СН-32-19, СН-5-19, СН-86-17 ДТ₁, СН-90-17 ДТ₁ и СН-96-15 ДТ₁), полученных от селекционеров ВНИИ люпина – филиала ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса».

Геномную ДНК выделяли из суммарной навески 30 семидневных проростков от каждого сорта модифицированным SDS-методом [0]. Амплификацию осуществляли в термоциклере С-1000 («BioRad», США) с использованием ПЦР-смеси, содержащей 10x Taq Turbo Buffer – 3 мкл., 50x dNTP mix – 0,4 мкл., 5U Taq-ДНК полимеразы – 0,4 мкл., 30 нг/мкл геномной ДНК – 1 мкл., а также по 0,5 мкМ каждого праймера (на одну реакцию объемом 20 мкл). Амплифицированные фрагменты ДНК разделяли в 1,6 % агарозном геле и с помощью программы Image Lab определяли их размеры.

Результаты и обсуждение

SRAP-маркеры (Sequence-Related Amplified Polymorphism) основаны на ПЦР с использованием двух праймеров, направленных на амплификацию экзон-интронных участков генома или открытых рамок считывания (ORF) [0].

Для анализа белого люпина использовали 12 комбинаций, составленных из одиночных праймеров, которые выявляли полиморфизм в коллекциях бобовых трав (клевер, люцерна) по результатам проведенных нами ранее исследований [0]. При тестировании белого люпина выделены 4 информативные комбинации (табл. 1). С ними получены уникальные ДНК-профили или сортоспецифичные ПЦР-продукты в изучаемой коллекции образцов.

Таблица 1

Показатели генетического разнообразия по результатам SRAP- анализа образцов белого люпина

Комбинации SRAP- праймеров	Последовательность нуклеотидов (5'-3')	Размер ПЦР-продуктов (п.н.)	Общее количество локусов/полиморфные локусы	Процент полиморфизма	PIC (Polymorphism Information Content)
ME1-EM2	F – TGAGTCCAAACCGGATA R – GACTGCGTACGAATTTGC	243-380	2/1	50	0,320
ME1-EM5	F – TGAGTCCAAACCGGATA R – GACTGCGTACGAATTAAC	238-428	4/2	50	0,498
ME3-EM1	F – TGAGTCCAAACCGGAAT R – GACTGCGTACGAATTAAT	125-336	3/1	33,3	0,044
Me4-EM1	F – CGAATCTTAGCCGGAAT R – GACTGCGTACGAATTAAT	362-790	2/1	50	0,391
Общее	–	–	–	–	0,313
Среднее	–	–	–	45,8	–

При использовании 4-х SRAP-праймеров было получено 122 воспроизводимых ампликона, 2 из которых оказались уникальными в анализируемой коллекции. Диапазон размеров ПЦР-продуктов варьировал от 125 п.н. с комбинацией ME3-EM1 до 790 п.н.

(Me4-EM1). Средний процент полиморфизма составил 45,8 %. Показатель информативности праймеров (PIC) в среднем равнялся 0,313 с наибольшим значением для комбинации ME1-EM5 – 0,498 и наименьшим для комбинации ME3-EM1 – 0,044. Определена

информативная SRAP-комбинация, с помощью которой удалось выявить уникальные фрагменты амплификации и дифференцировать сорт Алый парус и селекционный образец СН 90-17 ДТ1.

Результаты проведенных исследований показали, что система SRAP-маркирования пригодна для молекулярно-генетического анализа люпина, однако используемый набор праймеров обладает недостаточным потенциалом для различения образцов в анализируемой коллекции. На это указывает невысокий уровень внутривидового полиморфизма и относительно низкие показатели информативности праймеров (PIC).

Список литературы

1. Гатаулина Г.Г., Медведева Н.В., Цыгуткин А.С. Особенности роста и развития растений, технологии возделывания нового сорта белого люпина Детер 1 // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 9. С. 26-28.

2. Гатаулина Г.Г., Медведева Н.В. Белый люпин перспективная кормовая культура // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 10. С. 49-51.

3. Артюхова А.В. Паспортизация сортов люпина методами ISSR-PCR и RAPD-PCR для

биотехнологических исследований: дис. ... канд. биол. наук: 03.01.06, 03.02.07. Уфа, 2011. 144 с.

4. Изучение коллекции люпина желтого и узколистного / В.С. Анохина [и др.] // Теоретические и прикладные аспекты интродукции растений как перспективного направления развития науки и народного хозяйства: мат. межд. науч. конф., посвящ. 75-летию со дня образования Центрального ботанического сада НАН Беларуси. Минск: Центральный ботанический сад НАН Беларуси, 2007. С. 92-94.

5. Идентификация и паспортизация сортов кормовых трав (клевера лугового, люцерны изменчивой, посевной и хмелевидной) на основе ДНК-маркеров: методические указания / И.А. Клименко [и др.]. М.: Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.П. Вильямса, 2020. 35 с.

6. Шамустакимова А.О., Мавлютов Ю.М., Клименко И.А. Применение SRAP-маркеров для ДНК-идентификации российских сортов люцерны // Генетика. 2021. Т. 57. № 5. С. 536-543.

7. Li G., Quiros C.F. Sequence-related amplified polymorphism (SRAP), a new marker system based on a simple PCR reaction: its application to mapping and gene tagging in Brassica // Theoretical and applied genetics. 2001. Vol. 103. № 2. PP. 455-461.

EVALUATION OF SRAP MARKER EFFICIENCY FOR WHITE LUPIN MOLECULAR GENETIC ANALYSIS

Dushkin V.A., Klimenko I.A.

Federal State Budget Scientific Institution «Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology», Nauchny Gorodok-2 st., Lobnya, Moscow region, Russian Federation, 141055

e-mail: vniikormov@mail.ru

The results on white lupine collection intraspecific genetic polymorphism study based on SRAP markers are presented.

Keywords: white lupine, PCR analysis, genotyping, DNA polymorphism, SRAP markers

УДК 575: 633

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНОМНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ ДЛЯ НОКАУТА ГЕНА ВАКУОЛЯРНОЙ ИНВЕРТАЗЫ И ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ К ХОЛОДОВОМУ ОСАХАРИВАНИЮ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ

Егорова А.А.^{1,2,а}, Зыкова Т.Е.¹, Сабоев И.А.^{1,2}, Костина Н.Е.¹, Колошина К.А.^{1,2}, Хоффи И.³, Хикель Ш.³, Хертиг К.³, Чамас С.³, Филипенко Е.А.¹, Кумлен Й.³, Герасимова С.В.¹, Кочетов А.В.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук», 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 10, Российская Федерация

² Курчатовский геномный центр – Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 10, Российская Федерация

³ Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Corrensstraße 3, Gatersleben, Germany, D-06466

e-mail: ^a egorova@bionet.nsc.ru

Нокаут гена вакуолярной инвертазы при помощи РНК-направленной эндонуклеазы Cas9 позволит улучшить товарные качества при холодном хранении клубней картофеля. Было проведено создание и анализ активности конструкций для нокаута гена. С использованием агробактериальной трансформации были получены мутантные растения картофеля, которые демонстрировали сниженное содержание редуцирующих сахаров в клубнях при хранении на холоде.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum L.*, редуцирующие сахара, вакуолярная инвертаза, редактирование генома, CRISPR/Cas

В умеренно-климатических зонах урожай картофеля (*Solanum tuberosum L.*) собирают один раз в год и традиционно хранят при низких температурах (4–6 °С), что предотвращает прорастание, высыхание и гниение клубней. Однако холод приводит к накоплению редуцирующих сахаров, так называемому холодовому осахариванию. При термической обработке, например при приготовлении картофельных чипсов, эти сахара реагируют с аминокислотами, что приводит к появлению горького вкуса и снижению качества продуктов из таких клубней. Поэтому важно получать новые доноры для селекции картофеля, устойчивые к холодовому осахариванию. Для этого мы осуществили нокаут гена вакуолярной инвертазы *Pain-1* в сорте Симфония. Вакуолярная инвертаза отвечает за разложение сахарозы на глюкозу и фруктозу, что приводит к накоплению редуцирующих сахаров.

Для выключения гена мы использовали систему РНК-направленной эндонуклеазы Cas9. Мы создали конструкции, содержащие гены РНК и нуклеазы *cas9*. Активность этих конструкций была проверена на протопластах картофеля, а для получения мутантных растений мы использовали метод агробактериальной трансформации листовых эксплантов. В результате было получено 10 мутантных линий, в 8 из которых были обнаружены мутации во всех аллелях гена вакуолярной инвертазы. У четырех из этих линий были получены клубни, на которых мы произвели оценку холодового осахаривания и две из них, у которых наблюдался нокаут всех четырех аллелей гена, показали значительное снижение содержания редуцирующих сахаров при хранении на холоде. Эти линии планируется использовать в дальнейшей селекции.

Исследование поддержано Курчатовским геномным центром ИЦиГ (075-15-2019-1662).

USING GENOME EDITING TO KNOCKOUT THE VACUOLAR INVERTASE GENE FOR THE PRODUCTION OF POTATO PLANTS RESISTANT TO COLD-INDUCED SWEETENING

Egorova A.A.^{1,2,a}, Zykova T.E.¹, Saboiev I.A.^{1,2}, Kostina N.E.¹, Koloshina K.A.^{1,2}, Hoffie I.³, Hertig C.³, Hiekel S.³, Chamas S.³, Kumlehn J.³, Filipenko E.A.¹, Gerasimova S.V.¹, Kochetov A.V.^{1,2}

¹ Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Akademika Lavrentieva Avenue 10, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

² Kurchatov Genomic Centre ICG SB RAS, Akademika Lavrentieva Avenue 10, Novosibirsk, Russian Federation, 630090

³ Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Corrensstraße 3, Gatersleben, Germany, D-06466

e-mail: ^a egorova@bionet.nsc.ru

Knockout of the vacuolar invertase gene (*Pain-1*) will help to improve quality of potato tubers in cold storage. A vector for targeted knockout was constructed, and its gene-specific mutagenic activity was demonstrated in potato protoplasts. We used *Agrobacterium*-mediated transformation to obtain mutant lines, that demonstrated a significant decline in reducing sugar content in cold stored tubers.

Keywords: *Solanum tuberosum L.*, reducing sugars, vacuolar invertase, gene editing, CRISPR/Cas9

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ В РАЦИОНЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПТИЦ

Ефремова Д.О.^а, Кротова О.Е.^б

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет, 344003, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, Российская Федерация
e-mail: ^аefremova.dana@yandex.ru, ^бalb9652@yandex.ru

Известно, что до 70 % затрат кормов в птицеводстве приходится на зерновые культуры, в том числе на пшеницу, ячмень и кукурузу. Эти злаки имеют важное значение в сфере питания населения и занимают основное место среди продовольственных культур. Поиск новых видов зерновых кормов для частичной замены традиционных и использования их для поддержания и повышения продуктивности птицы является актуальным. Одним из путей решения этой проблемы является использование в рационе птицы нетрадиционных видов кормов в качестве источников белкового (сорго, тритикале) и минерального (известняк, бентонит, палыгорскит) питания. Цель исследования – изучить химический состав вышеперечисленных нетрадиционных кормов и определить оптимальный уровень частичной замены ими традиционных зерновых и минеральных добавок в рационе сельскохозяйственных птиц.

Ключевые слова: комбикорма, зерновые культуры, птицеводство, продуктивность бройлеров, пробиотики, альтернативные источники

Результаты литературного обзора химического состава и использования зерна некоторых нетрадиционных кормов (сорго, тритикале) в кормлении кур-несушек показали, что эти корма не уступали основным зерновым злакам (пшенице, кукурузе, ячменю) по уровню питательных веществ и эффективности влияния на продуктивность птицы. Так, содержание сырого протеина в сорго колеблется в пределах 12,7-13,5 %, сырой клетчатки и жира – 1,8-6,8 и 5,4-5,7 % соответственно. Сорго почти не уступает тритикале по содержанию большинства незаменимых аминокислот, а по некоторым из них превосходит кукурузу. Однако ограничивающим фактором использования сорго для кур-несушек является содержание в нем дубильных веществ. В зависимости от содержания дубильных веществ определяют норму использования сорго в рационе птиц. Если компоненты основного рациона не содержат дубильных веществ, можно включать в комбикорм молодняку 18-22 % сорго, взрослой птице – 35-40 %. Сорты бурого сорго имеют высокое содержание дубильных веществ, поэтому следует ограничить возможность их использования в кормах до 5-25 %. Еще одним полноценным заменителем основного зернового корма в рационе птиц является пшенично-ржаной гибрид тритикале, обладающий рядом преимуществ по сравнению с пшеницей и рожью. Тритикале содержит больше белка (16-19 %), его высокая калорийность (285 ккал/100 г) позволяет заменить в рационе до 70 % пшеницы. Эффективная норма замены зерновых кормов в рационе кур-несушек составляет: сорго

– в пределах 10-15 % и тритикале – 20-40 %. Минеральные вещества также играют значительную роль в питании птицы. Они играют роль пластического материала в формировании скелета и скорлупы яиц, принимают активное участие в обмене веществ.

Существует несколько возможностей для повышения кормовой ценности и увеличения уровней включения альтернативных кормов (табл. 1).

Рапсовый шрот – это масличная культура, занимающая второе место в мире по производству (включая рапс). Это побочный продукт экстракции масла из семян рапса и хороший источник белка для кормления бройлеров. Как правило, содержание сырого протеина в нем колеблется в пределах 34-38 %, с благоприятным содержанием аминокислот по сравнению с соевым шротом. Присутствие антипитательных факторов (например, эруковой кислоты, глюкозинолатов, дубильных веществ и синапина) ограничивает его включение. Улучшенные сорта рапса с низким содержанием эруковой кислоты и глюкозинолатов, получившие название «канола», становятся более доступными, и их количество в рационе бройлеров может быть намного выше, чем стандартного рапсового шрота. Максимально рекомендуемый уровень глюкозинолатов в рационе составляет 4 мкмоль на грамм.

Следует обратить внимание на показатели включения рапсового шрота в рацион бройлеров, как указано в таблице 2.

Таблица 1

Возможности для повышения кормовой ценности

Возможности для повышения кормовой ценности				
1. Оценка корма с акцентом на энергию и усвояемость аминокислот	2. Составление рационов на основе усвояемых аминокислот, а не общего количества аминокислот	3. Использование синтетические аминокислоты, чтобы сбалансировать их характеристики	4. Добавление коммерческих экзогенных ферментов для улучшения использования питательных веществ и энергии	5. Применение методов обработки кормов
Сложность оценки питательной ценности ингредиента из-за отсутствия или нехватки соответствующих исследовательских или аналитических средств является основным фактором, препятствующим производителям кормов для птицы рассматривать возможность использования альтернативных ингредиентов	Когда рассматриваются варианты использования волокнистых и плохо перевариваемых ингредиентов, обязательным условием является состав корма на основе метаболизируемой энергии и усваиваемых аминокислот	Для повышения эффективности кормления, снижения выбросов азота и аммиака и обеспечения устойчивого производства птицы существует огромный интерес к использованию рационов с пониженным содержанием белка, дополненных синтетическим АА	Коммерческое применение биотехнологии и использование кормовых добавок в питании домашней птицы в течение последних двух десятилетий открыли широкие возможности для повышения эффективности использования питательных веществ и продуктивности корма	Переработка кормов и ингредиентов, включая экструзию и гранулирование, может способствовать использованию и более широкому включению альтернативного сырья в рационы птицы, в основном, за счет инактивации антипитательных факторов, разрушения матрикса клеточной стенки в результате физического стресса, особенно в волокнистых материалах и обеспечение большей доступности инкапсулированного клеточного содержимого для пищеварительных ферментов

Таблица 2

Показатели включения рапсового шрота в рацион бройлеров

Ингредиент	Бройлеры	
	<3 недель	>3 недель
Пшеница (+ ферменты)	50 %	70 %
Кукуруза	-	-
Сорго (с низким содержанием танина)	-	-
Ячмень (+ ферменты)	3 %	15 %
Овес (+ ферменты)	5 %	15 %
Кукурузный глютен	5 %	10 %
Рисовые отруби	5 %	10 %
Пшеничные отруби	Не рекомендуется	5 %
Маниока (низкий HCN)	20 %	30 %
Рапсовый шрот	5 %	5 %
Мука канолы (экстрагированная растворителем)*	5 %	10 %

Ингредиент	Бройлеры	
	<3 недели	>3 недели
Мука хлопковая (с низким содержанием госсипола)	5 %	10 %
шрот подсолнечный	5 %	10 %
Пальмоядровая мука (+ ферменты)	Не рекомендуется	10 %
Копровая мука (+ ферменты)	Не рекомендуется	10 %

За исключением соевого шрота, который остается основным источником белка в рационах домашней птицы во всем мире, другие ингредиенты, включая кукурузу и пшеницу, могут рассматриваться в качестве альтернативных ингредиентов в зависимости от географического положения. Хотя существует обширный список сырья растительного или животного происхождения, которое можно использовать в кормах для птицы в разных регионах.

Альтернативные источники клетчатки могут улучшить развитие и функциональность верхних отделов кишечника у современных бройлеров. Улучшение структуры корма за счет включения ингредиентов с нерастворимыми источниками клетчатки обещает смягчить опасения, связанные с субоптимальной функциональностью верхней части пищеварительного тракта и здоровьем кишечника, которые были проблемой при кормлении рационами с высокой степенью переработки и усугублялись в свет птицеводства без антибиотиков. Несушки не только способны лучше усваивать ингредиенты с высоким содержанием клетчатки, но недавнее исследование (Abdollahi et al., 2017) также показало, что функция пищеварительного тракта у несушек даже более чувствительна к структуре корма, чем у бройлеров и молодок, подчеркивая важность и необходимость включения сырья с высоким содержанием клетчатки в корма для несушек.

Таким образом, спрос на продукты птицеводства будет продолжать расти в ближайшие десятилетия. Этот высокий спрос, а также тот факт, что курица является наиболее устойчивым видом сельскохозяйственных животных, создаст оппортунистический сценарий для птицеводческой отрасли. Тем не менее, постоянно развивающаяся птицеводческая отрасль должна решать, среди прочего, проблему обеспечения адекватными и устойчивыми кормовыми ресурсами.

Список литературы

1. Ovchinnikov A.A., Shamin O. The effectiveness of the enzyme Avizim and probiotic in the diets of broiler chickens // Feeding farm animals and feed production. 2013. № 10. PP. 43-48.
2. The use of tetralaktobakterin in growing poultry / V.N. Nikulin [et al.] // Proceedings of the Samara State Agricultural Academy. 2015. № 1. PP. 134-137.
3. Normatov A.M., Yusupov N.U., Azamatov U.Z. Enriched feed: non-traditional use of raw materials for poultry. Зеленая химия и устойчивое развитие. 2023. 1(1). С. 201-202.
4. A.V. Sevryukov, M.A. Morozova, Y.I. Levchenko [et al.] // Current Issues of Veterinary Biology. 2013. Vol. 4. № 20. PP. 49-56.
5. The Use of Non-traditional Feed Products in the Feeding of Broiler Chickens / O. Krotova, E. Morozova, A. Chernyshkov [et al.]. In: Beskopylny A., Shamtsyan M., Artiukh V. (eds) XV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2022». Lecture Notes in Networks and Systems // Springer, Cham. 2023. Vol. 575. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_70.
6. Use of compound feed with the probiotic feed supplement based on Bacillus bacteria for sterlet producers / D.V. Rudoy, A.V. Olshevskaya, E.N. Ponomareva [et al.] // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Development and Modern Problems of Aquaculture» (AQUACULTURE 2022), Divnomorskoe village, Krasnodar region, Russia, September 26 – October 02, 2022. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. Vol. 381. P. 01073. DOI 10.1051/e3sconf/202338101073.
7. Poultry diets without antibiotics. I. intestinal microbiota and performance of broiler (Gallus Gallus L.) breeders fed diets with enterosorbent possessing phyto-biotic and probiotic effects / G. Laptev, I. Egorov, T. Lenkova, V. Manukyan // Agric. Biol. 2019. Vol. 54. № 2. PP. 280-290. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2019.2.280>.

POSSIBILITIES OF USING NON-TRADITIONAL TYPES OF RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF ANIMAL FEED IN THE DIET OF POULTRY

Efremova D.O.^a, Krotova O.E.^b

Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Rostow region, Russian Federation, 344003

e-mail: ^aefremova.dana@yandex.ru, ^balb9652@yandex.ru

It is known that up to 70 % of feed costs in poultry farming are for cereals, including wheat, barley and corn. These cereals are of great importance in the field of nutrition of the population and occupy a major place among food crops. The search for new types of grain feeds to partially replace traditional ones and use them to maintain and increase poultry productivity is relevant. One of the ways to solve this problem is the use of non-traditional types of feed in the poultry diet as sources of protein (sorghum, triticale) and mineral (limestone, bentonite, palygorskite) nutrition. The purpose of the study is to study the chemical composition of the above non-traditional feeds and determine the optimal level of partial replacement of traditional grain and mineral additives in the diet of poultry.

Keywords: *mixed feed, cereals, poultry farming, broiler productivity, probiotics, alternative sources*

The results of a literature review of the chemical composition and use of grains of some non-traditional feeds (sorghum, triticale) in feeding laying hens showed that these feeds were not inferior to the main grain cereals (wheat, corn, barley) both in terms of the level of nutrients and the effectiveness of influencing poultry productivity. Thus, the content of crude protein in sorghum ranges from 12.7-13.5 %, crude fiber and fat – 1.8-6.8 and 5.4-5.7 %, respectively. Sorghum is almost as good as triticale in the content of most essential amino acids, and in some of them it surpasses corn. However, the limiting factor in the use of sorghum for laying hens is its tannin content. Depending on the content of tannins, the rate of use of sorghum in the diet of birds is determined. If the components of the main diet do not contain tannins, you can include 18-

22 % sorghum in the feed for young animals, 35-40 % for adult birds. Brown sorghum varieties have a high content of tannins, so their use in feed should be limited to 5-25 %. Another full-fledged substitute for the main grain feed in the diet of birds is the wheat-rye triticale hybrid, which has a number of advantages compared to wheat and rye. Triticale contains more protein (16-19 %), its high calorie content (285 kcal/100 g) allows replacing up to 70% of wheat in the diet. The effective rate of replacement of grain feed in the diet of laying hens is sorghum in the range of 10-15 % and triticale 20-40 %. Minerals also play a significant role in bird nutrition. They play the role of plastic material in the formation of the skeleton and egg shell, and take an active part in metabolism.

УДК 577.21:633.853.494

ДЕТЕКЦИЯ ВНЕХРОМОСОМНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МОЛЕКУЛ ДНК (вкДНК) ТРАНСПОЗОНОВ РАПСА (*BRASSICA NAPUS*)

Ивахненко А.С.^{1,2,a}, Киров И.В.^{1,2}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

e-mail: ^aivakhnenko.as@phystech.edu

Транспозоны в геномах растений составляют основную фракцию генома. Инсерции транспозонов приводят к изменению экспрессии генов и геномным перестройкам. Класс I транспозонов, или ретротранспозонов, имеют многостадийный РНК-опосредованный жизненный цикл и перед интеграцией в геном (последней стадией жизненного цикла) часть линейной кДНК может быть переведена системами репарации клетки в форму внехромосомной кольцевой ДНК (вкДНК). Данные молекулы являются маркером на мобильную активность ретротранспозонов.

Ключевые слова: *транспозоны, растения, нанопоровое секвенирование, внехромосомные кольцевые молекулы ДНК, рапс*

Геномы растений в значительной степени состоят из последовательностей транспозонов и их остатков. Поэтому транспозоны оказали значительное влияние на организацию и эволюцию генома. В зависимости от механизма транспозиции их делят на два класса. Первый класс (ретротранспозоны) перемещаются по механизму «копировать-вставить», второй класс (ДНК транспозоны) перемещаются по механизму «вырезать-вставить». Ретротранспозоны являются преобладающим классом транспозонов в геномах растений. У рапса (*Brassica napus*) они занимают до 58 % всего генома [1].

Благодаря многочисленным системам сайленсинга, транспозоны в геноме находятся в неактивном состоянии и, следовательно, не способны к транспозиции. Технология «TEgenesis» использует два типа химических веществ – аманитин и зебуларин в комбинации с тепловым стрессом, что позволяет активировать транскрипцию ретротранспозонов и получить растения с множеством новых уникальных инсерций [2].

В жизненном цикле ретротранспозонов есть стадия формирования внехромосомных кольцевых молекул ДНК (вкДНК), маркеров на мобильную активность. В данной работе мы решили выяснить, может ли ингибирование путей сайленсинга совместно с обработкой тепловым стрессом стимулировать образование вкДНК у рапса [3].

Детектировать вкДНК возможно при помощи технологии Oxford Nanopore. Для выделения и секвенирования вкДНК из тканей 14-дневных растений была выделена общая геномная ДНК. Линейную ДНК

расщепляли экзонуклеазой с последующей амплификацией методом катящегося кольца (RCA). В результате секвенирования были обнаружены 7 полноразмерных LTR ретротранспозонов рапса, которые продуцируют вкДНК в ответ на стресс. Все детектированные ретротранспозоны относятся к суперсемейству *Ty3/Gypsy*.

Для подтверждения транспозиционной активности необходима детекция новых инсерций. Для этого будет проведен Transposon Display для анализа популяции M1.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание) № 075-03-2023-106, номер проекта FSMG-2023-0015.

Список литературы

1. Eight high-quality genomes reveal pan-genome architecture and ecotype differentiation of *Brassica napus* / J. Song, Z. Guan, J. Hu [et al.] // Nat. Plants. 2020. Vol. 6. PP. 34-45.

2. Inhibition of RNA polymerase II allows controlled mobilisation of retrotransposons for plant breeding / M. Thieme, S. Lanciano, S. Balzergue [et al.] // Genome Biol. 2017. Vol. 18. Issue 134. PP. 1-10.

3. Sequencing the extrachromosomal circular mobilome reveals retrotransposon activity in plants / S. Lanciano, M.C. Carpentier, C. Llauro [et al.] // PLoS Genet. 2017. Vol. 13. Issue 2. e1006630.

DETECTION OF EXTRACHROMOSOMAL CIRCULAR DNA MOLECULES (ccDNA) IN RAPESEED (*BRASSICA NAPUS*)

Ivakhnenko A.S.^{1,2,a}, Kirov I.V.^{1,2}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701*

² *All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550*

e-mail: ^a ivakhnenko.as@phystech.edu

Mobile elements in plant genomes constitute the main fraction of the genome with the potential to alter gene expression and produce genomic reorganizations. They have a multistage life cycle and it is known that before integration into the genome (the last stage of the life cycle), a part of linear cDNA can be converted by cellular repair systems into the form of extrachromosomal circular DNA (ccDNA). These molecules are a marker for the mobile activity of retrotransposons.

Keywords: *transposons, plants, nanopore sequencing, extrachromosomal circular DNA, rapeseed*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОБИЛОМА ПОДСОЛНЕЧНИКОВ *HELIANTHUS ANNUUS* L., ПОДВЕРГНУТЫХ АКТИВАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГЕНОМЕ

Казанцев М.Ю.^{1,2,a}, Меркулов П.Ю.^{1,2}, Абрамова А.С.^{1,2}, Демури Я.Н.³, Киров И.В.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта», 350038, г. Краснодар, ул. им. Филатова, д. 17, Российская Федерация

e-mail: ^aka_mish98@mail.ru

Мобильные элементы влияют на эволюцию и функционирование генома растений, однако в нестрессовых условиях их мобильная активность значительно снижена. Применение метода TE-genesis для активации транспозонов в геноме подсолнечника вместе с нанопоровым секвенированием и анализом вкДНК позволили подробнее изучить ретротранскриптом подсолнечника.

Ключевые слова: ретротранспозоны, нанопоровое секвенирование, подсолнечник

Транспозоны (TE) – это элементы генома, способные перемещаться, создавая новые копии и приводя к различным геномным реорганизациям. Последние исследования показывают, что именно мобильная активность транспозонов является одной из движущих сил эволюции и селекции [1].

Около 81 % генома *Helianthus annuus* L. состоит из последовательностей, относящихся к мобильным элементам, и 77 % из них относится к классу ретротранспозонов с длинными концевыми повторами (LTR) [2].

Способность активировать мутагенный потенциал мобильных элементов для целенаправленного расширения генетического разнообразия может стать решением для запросов современной селекции, включая создание новых генотипов для отбора.

Анализ мобилома затруднен тем, что экспрессия большинства TE супрессирована в нестрессовых условиях. Для активации мобилома и изучения особенностей организации активных мобильных элементов нами был применен метод TE-genesis [3]. Данный метод позволяет реактивировать мобильные элементы в геноме растений путем воздействия на системы метилирования ДНК и РНК-интерференции за счет комбинированного воздействия стресса и определенных химических веществ.

В рамках данной работы удалось создать и оптимизировать протокол получения поколений мутантных растений подсолнечников (M0, M1) после TE-genesis. В результате получили 32 полноценно развитых растения M0, из которых собрали семена для выращивания подсолнечников поколения M1 в количестве ~3000 шт.

За счет применения нанопорового секвенирования после использования TE-genesis нам удалось идентифицировать 56 транскриптов ретротранспозонов (RTE) из разных геномных локусов, включая полноразмерные и неавтономные RTE.

При помощи анализа вкДНК был обнаружен RTE Ту3/Gypsy, названный SUNTY3, демонстрировавший активность в условиях TE-genesis.

Наши результаты показывают, что 40 % RTE транскриптов (не LTR-RTE) схожи с обычными эукариотическими генами, которые кодируют характерные для RTE белки с неизвестными на данный момент функциями.

При помощи дальнейшего анализа результатов секвенирования вкДНК планируется детальнее изучить мобилом подсолнечника.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-64-00076.

Список литературы

1. Lisch D. How important are transposons for plant evolution? // Nat Rev Genet. 2013. Vol. 14. PP. 49-61.
2. Feschotte C., Jiang N., Wessler S. Plant transposable elements: Where genetics meets genomics // Nat. Rev. Genet. 2002. Vol. 3. PP. 329-341.
3. Inhibition of RNA polymerase II allows controlled mobilisation of retrotransposons for plant breeding / M. Thieme, S. Lanciano, S. Balzergue [et al.] // Genome Biology. 2017. Vol. 18. №. 1. PP. 1-10.

STUDY OF THE MOBILOME OF SUNFLOWER *HELIANTHUS ANNUUS* L., EXPOSED TO ACTIVATION OF MOBILE ELEMENTS IN THE GENOME

Kazantsev M.Y.^{1,2,a}, Merkulov P.Y.^{1,2}, Abramova A.S.^{1,2}, Demurin Y.N.³, Kirov I.V.^{1,2}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

²Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

³Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center «V.S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops», them. Filatova st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038

e-mail: ^aka_mish98@mail.ru

Mobile elements influence the evolution and functioning of the plant genome, but in non-stressful conditions their mobile activity is significantly reduced. The use of the TE-genesis method for activating transposons in the sunflower genome, together with nanopore sequencing and analysis of eccDNA, allowed us to study the sunflower retrotranscriptome in more detail.

The work was supported by the grant of the Russian Academy of Sciences No. 22-64-00076.

Keywords: *retrotransposons, nanopore sequencing, sunflower*

УДК 631.52

ВИРУС-ИНДУЦИРОВАННЫЙ САЙЛЕНСИНГ ГЕНОВ, ВОВЛЕЧЕННЫХ В ПУТИ РНК-ЗАВИСИМОГО МЕТИЛИРОВАНИЯ ДНК У *ARABIDOPSIS THALIANA*

Камараули Е.Д.^{1,2,a}, Власова А.В.^{1,2}, Перевозчиков Д.В.¹, Киров И.В.^{1,2}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

²МФТИ (национальный исследовательский университет), Долгoprудный, Институтский переулок, д. 9, Российская Федерация

e-mail: ^a kamarauli.ed@phystech.edu

РНК-зависимое метилирование ДНК (RdDM) является уникальным процессом метилирования ДНК в растениях, в центре которого находятся IV и V ДНК-зависимые РНК полимеразы. Одной из важных ролей RdDM является подавление активности мобильных элементов, являющихся источником генетической и эпигенетической изменчивости для селекции сельскохозяйственных культур. Активация мобилома возможна путем снижения экспрессии генов, кодирующих ферменты, участвующие в метилировании ДНК. Одним из эффективных инструментов для достижения этой цели является вирус-опосредованный сайленсинг генов (VIGS). В данной работе с помощью метода VIGS была снижена экспрессия гена NRPE, кодирующего большую субъединицу фермента Pol V и активирован транспозон ONSEN Арабидопсиса.

Ключевые слова: *РНК-зависимое метилирование ДНК растений (RdDM), мобилом, транспозоны, вирус-опосредованный сайленсинг генов (VIGS), арабидопсис*

Процесс, известный как РНК-зависимое метилирование ДНК (RdDM), основан на активности двух РНК-полимераз, специфичных для растений – Pol IV и Pol V [1]. RdDM является ключевым механизмом сайленсинга транспозонов. Соответственно, при ослаблении данной эпигенетической защиты возможно усиление активности мобильных элементов, способствующих увеличению разнообразия

генотипов и фенотипов сельскохозяйственных культур. Известно, что у растений со сниженным RdDM метилированием под влиянием теплового стресса активируется транспозон ONSEN, транспозиции которого чаще всего происходят в эухроматине, при этом новые вставки могут способствовать усилению адаптации растений к стрессовым условиям [2].

Заблокировать РНК-зависимое метилирование ДНК можно путем снижения экспрессии гена NRPE, кодирующего большую субъединицу Pol V, или гена NRPD, отвечающего за Pol IV. Для данной цели может использоваться метод вирус-опосредованного сайленсинга генов (VIGS), который широко используется как в фундаментальных, так и прикладных целях [3].

VIGS – это инструмент функциональной геномики, позволяющий снижать экспрессию целевого гена (генов), используя природный защитный механизм растения против вторгающихся РНК-вирусов. На основе последних данных VIGS может использоваться как высокопроизводительный инструмент, вызывающий эпигенетические модификации в растениях через вирусный геном путем транзиторного нокаута экспрессии целевых генов [3]. В данной работе в конструкцию на основе вируса погрешности табака (TRV) был заклонирован фрагмент гена NRPE и трансформирована в *Agrobacterium tumefaciens* штамма GV3101. Растения были заражены агробактерией, несущей конструкцию TRV- NRPE инфильтрацией, с помощью шприца. После появления признаков заражения растения были обработаны тепловым шоком для активации транспозона ONSEN.

С помощью VIGS была подавлена экспрессия гена NRPE, что привело к ослаблению действия RdDM.

Благодаря снижению эпигенетического контроля мобильных элементов и обработке тепловым стрессом нам удалось детектировать активацию ретротранспозона ONSEN.

Данная технология позволит усилить активность мобильных элементов, способствующих появлению новых генотипов и фенотипов у растений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-64-00076.

Список литературы

1. Matzke M.A., Kanno T., Matzke A.J.M. RNA-directed DNA methylation: the evolution of a complex epigenetic pathway in flowering plants //Annual review of plant biology. 2015. Vol. 66. PP. 243-267.

2. A stress-activated transposon in Arabidopsis induces transgenerational abscisic acid insensitivity / H. Ito [et al.] //Scientific reports. 2016. Vol. 6. №. 1. P. 23181.

3. Virus-induced gene silencing (VIGS): a powerful tool for crop improvement and its advancement towards epigenetics / S. Zulfiqar [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. №. 6. P. 5608.

VIRUS-INDUCED SILENCING OF GENES INVOLVED IN RNA-DIRECTED DNA METHYLATION IN *ARABIDOPSIS THALIANA*

Kamarauli E.^{1,2,a}, Vlasova A.^{1,2}, Perevozchikov D.¹, Kirov I.^{1,2}

¹ All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

² Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

e-mail: ^a kamarauli.ed@phystech.edu

RNA-directed DNA methylation (RdDM) is a unique DNA methylation process in plants, centred on IV and V DNA-dependent RNA polymerases. One important role of RdDM is to suppress the activity of mobile elements, which are a source of genetic and epigenetic variability for crop breeding. Activation of the mobilome is possible by reducing the expression of genes encoding enzymes involved in DNA methylation. Virus-induced gene silencing (VIGS) is one of the effective tools to achieve this goal.

Keywords: RNA-directed DNA methylation (RdDM), mobilome, transposons, virus-induced gene silencing (VIGS), *Arabidopsis*

ВЛИЯНИЕ *BIFIDOBACTERIUM ADOLESCENTIS* НА СОСТАВ КИШЕЧНОЙ МИКРОБИОТЫ МЫШЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СТРЕССА

Карабанов С.Ю.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д. 26, Российская Федерация
e-mail: s.karabanov@fnpcs.ru

Изучено влияние *Bifidobacterium adolescentis* на состав кишечной микробиоты мышей С57BL/6 под воздействием ультразвукового стресса. Показано, что *B. adolescentis* препятствует снижению микробного разнообразия, а также сглаживает изменения количества бактерий, в условиях стресса, на уровнях филума и семейства.

Ключевые слова: кишечная микробиота, *Bifidobacterium adolescentis*, ультразвуковой стресс

Введение

Достижения в области метагеномного секвенирования позволили показать, что бифидобактерии являются доминирующим видом кишечной микробиоты не только человека, но и многих сельскохозяйственных животных.

Польза для здоровья бифидобактерий может быть объяснена способностью к модуляции кишечной микробиоты. Например, анаэробное расщепление неперевариваемых углеводов может привести к образованию субстратов для роста других кишечных бактерий, что повышает разнообразие кишечной микробиоты, создавая конкурентную среду обитания, в которой размножение условно-патогенных бактерий затруднено [1].

Бифидобактерии также важны в контексте производства гамма-аминомасляной кислоты (ГАМК) в кишечнике. Имеются данные, что введение ГАМК-продуцирующих бифидобактерий грызунам уменьшало боль, фибромиалгию, депрессию и беспокойство [2].

Способность к производству ГАМК среди различных пробиотических штаммов неодинакова. Среди них выделяют бифидобактерии, а именно *B. adolescentis*, *B. angulatum* и *B. dentium*, продуцирующих ГАМК в больших количествах, чем остальные. Кроме того, внутри одного вида продукция ГАМК может сильно варьироваться. Так, например, в исследовании был выбран штамм *B. adolescentis* 150, показавший максимальную продукцию ГАМК среди остальных 25 кандидатов [3].

Целью работы являлось изучение влияния *B. adolescentis* на микробиоту мышей под воздействием ультразвукового стресса.

Материалы и методы

Исследование одобрено биоэтической комиссией ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М.

Горбатова» РАН (протокол № 03/2019 от 15 апреля 2019 года).

Исследования проводили на самцах мышей С57BL/6 (n=30, 42-45 дней, 12-13 г). Мышей содержали в клетках из поликарбоната Т-III (Techniplast, Италия), с подстилочным материалом (Lignocel BK 8-15/LIGNOCEL), в группах по 5 голов. Кормление осуществляли ad libitum кормовым составом (Лабораторкорм, Россия), содержали в контролируемых условиях окружающей среды: температура воздуха 21±2 °С, относительная влажность 50-60 %, с искусственным освещением (12 часов день, 12 часов ночь).

Моделирование стресса проводили согласно [4]. Мыши были разделены случайным образом на 3 группы: группа 1 (n=10) – здоровые интактные мыши; группа 2 (контрольная, n=10) состояла из мышей, подвергшихся ультразвуковому стрессу (начиная с 8-ых суток непредсказуемо чередующимися частотами ультразвука в диапазоне от 20-25 кГц до 25-45 кГц). В 3-ей группе (экспериментальной) мыши подвергались воздействию стресса, но также получали культуру *B. adolescentis* 150 в количестве 10⁸ КОЕ/мышь/сутки в течение всего эксперимента.

Продолжительность эксперимента составила 28 суток. Влияние стресса определяли при помощи поведенческих тестов: на 25-ые сутки (тест «Открытое поле»); 26-ые (тест «Вынужденное плавание») и 27-ые (тест «О-лабиринт»).

Кишечную микробиоту определяли до эксперимента и на 28 сутки, на основании анализа последовательностей генов 16S рРНК по протоколу Illumina (16S Metagenomic Sequencing Library Preparation).

Результаты исследований

Результаты поведенческих тестирований выявили существенные изменения во 2 группе мышей, подверженных стрессу (табл. 1).

Результаты поведенческих тестирований

Парметры	Группа 1	Группа 2	Группа 3
Тест «Открытое поле»			
Время в центре арены, сек	15,0 [6,5-25,5]	35,0 [16,0-78,0]*	22,0 [16,0-24,0]
Время в периферийной зоне, сек	345,0 [334,5-353,5]	325,0 [282,0-344,0]*	338,0 [336,0-344,0]
Тест «Вынужденное плавание»			
Время иммобилизации, сек	32,0 [17,0-37,0]	99,0 [89,0-111,0]*	73,0 [54,0-95,0]*
Тест «О-лабиринт»			
Число выходов в открытый участок	15,0 [13,0-23,0]	8,0 [4,0-17,0]	19,0 [12,5-23,0]
Время первого выхода, сек	4,0 [3,0-15,0]	17,0 [6,0-53,0]	7,0 [4,5-7,0]

Данные представлены в виде среднего (Me) и межквартильного диапазона (P25–P75), * – значение $p < 0,05$

Увеличено время, проведенное в центре арены в тесте «Открытое поле», и время иммобилизации в тесте «Вынужденное плавание», что указывает на тревожное поведение, связанное с воздействием стресса. Эти данные подтверждает тест «О-лабиринт», выражающиеся снижением числа выходов в открытый участок.

В экспериментальной группе мышей (№3), получавших бифидобактерии, различные параметры тестирований значительно отличались от контрольной группы, где было только воздействие стресса, при

этом все результаты были приближены к группе интактных мышей (№ 1).

Воздействие стресса влияло на состав кишечной микробиоты мышей. На уровне филума мы наблюдали следующие изменения: снижение *Bacteroidetes* и *Proteobacteria* на 30,28 % и 52 %, а также увеличение *Firmicutes* на 63,9 %.

Влияние *B. adolescentis* сгладило изменения: *Bacteroidetes* снизились всего на 13,89 %, а количество *Firmicutes* увеличилось на 32,96 % (рис. 1).

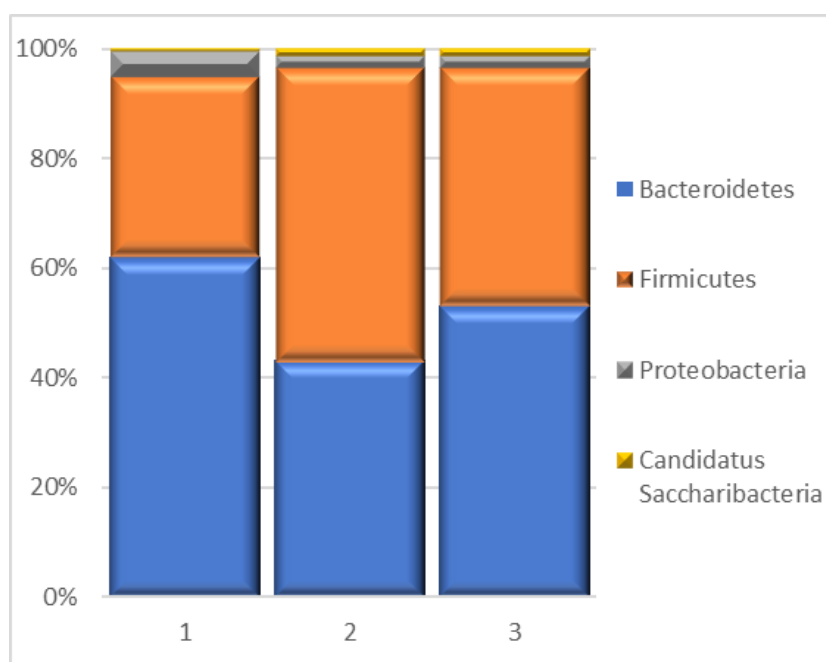


Рисунок 1. Изменение состава кишечной микробиоты на уровне филума (1 – интактные мыши, 2 – мыши под воздействием ультразвукового стресса, 3 – воздействие ультразвукового стресса + *B. adolescentis* в течение всего эксперимента)

На уровне семейства воздействие стресса оказало значительные изменения на *Lachnospiraceae* и *Rikenellaceae* – увеличение на 68,44 % и 30,95 % соответственно (рис. 2). Значительно увеличилось количество *Helicobacteraceae* – на 284 %, однако

изначально небольшое количество представителей данного семейства в кишечной популяции среди интактных мышей, не позволяет говорить о каких-либо значимых изменениях. Одновременно мы

наблюдали снижение *Bacteroidaceae* на 63,1 %, *Prevotellaceae* – на 43,4 %, *Ruminococcaceae* – на 14 %.

Влияние *B. adolescentis* несколько сгладило изменения: количество *Lachnospiraceae* увеличилось на 33,2 %, тогда как количество *Bacteroidaceae* уменьшилось на 49,5 %. При этом никакого эффекта *B.*

adolescentis не оказали на *Prevotellaceae*, *Rikenellaceae* и *Ruminococcaceae*. Также мы констатировали увеличение количества *Porphyromonadaceae* на 44,3 % в 3 группе мышей, при этом стресс не оказывал влияние на количество бактерий этого семейства.

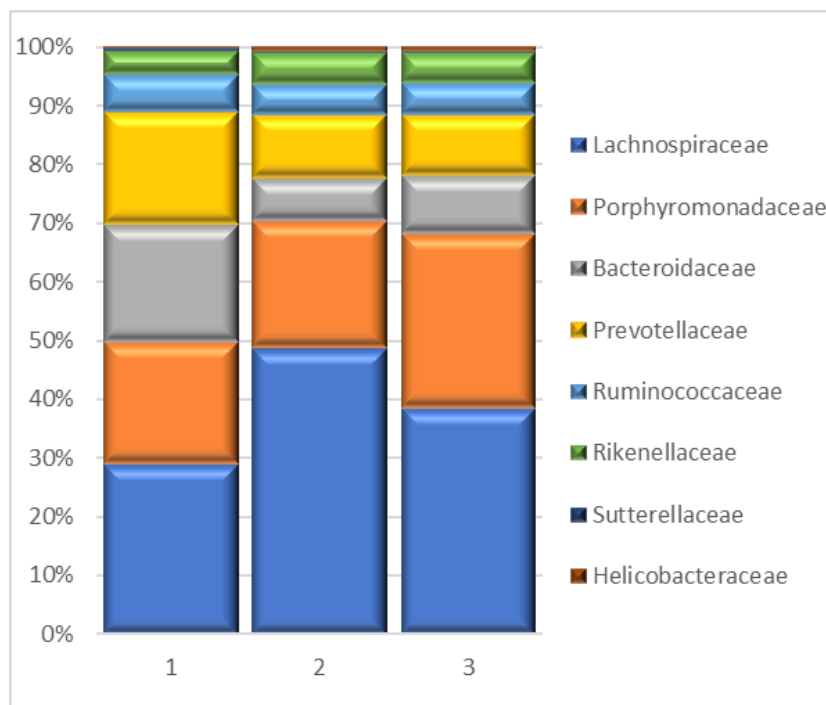


Рисунок 2. Изменение состава кишечной микробиоты на уровне семейства (1 – интактные мыши, 2 – мыши под воздействием ультразвукового стресса, 3 – воздействие ультразвукового стресса + *B. adolescentis* в течение всего эксперимента)

Во второй группе мышей воздействие стресса вызвало значительные изменения родового состава микробиоты: исчезли роды *Ruminococcus*, *Parabacteroides* и *Akkermansia*, снизилось общее количество *Alloprevotella* (на 59,16 %). При этом свободную нишу заняли такие роды как: *Alistipes*, *Saccharibacteria genera incertae sedis*, *Rikenella* и *Odoribacter*.

Воздействие *B. adolescentis* позволило предотвратить снижение общего микробного разнообразия, но также обогатить его – в 3 группе мышей мы наблюдали такие роды как *Dorea*, *Eisenbergiella* и *Acetatifactor*.

Однако, существенным ограничением нашего исследования является тот факт, что мы не смогли обнаружить в образцах фекалий 3-ей группы мышей (воздействие стресса и введение культуры *B. adolescentis*) ни собственно *B. adolescentis*, ни представителей семейства *Bifidobacteriaceae*, ни представителей филума *Actinobacteria*. При этом мы наблюдали положительные эффекты от воздействия штамма бифидобактерии в поведенческих тестах и динамики изменения микрофлоры под воздействием стресса, а именно свойством *B. adolescentis* стимулировать рост собственной микрофлоры кишечника.

Учитывая, что анализ кишечной микробиоты мы проводили только на 0 и 28 сутки, не представляется возможным определить через какое время с начала эксперимента *B. adolescentis* колонизировали кишечник. Вполне вероятно, что бифидобактерии не прижились, но смогли оказывать положительное действие, так как мышам ежедневно в течение всего эксперимента вводили бактериальную суспензию.

Требуется дополнительные исследования, в которых анализ кишечной микробиоты будет проведен несколько раз с равными интервалами времени в течение всего эксперимента, чтобы подробно изучить способность *B. adolescentis* колонизировать кишечник.

Список литературы

1. Bottacini F., van Sinderen D., Ventura M. Omics of Bifidobacteria: Research and Insights into Their Health-Promoting Activities // *Biochem. J.* 2017. Vol. 474. PP. 4137-4152.
2. GABA-producing Bifidobacterium Dentium modulates Visceral Sensitivity in the Intestine / K. Pokusaeva, C. Johnson, B. Luk [et al.] // *Neurogastroenterol. Motil.* 2017. Vol. 29. e12904.

3. GABA Production and Structure of gadB/gadC Genes in Lactobacillus and Bifidobacterium Strains from Human Microbiota / R.A. Yunes, E.U. Poluektova, M.S. Dyachkova [et al.] // Anaerobe. 2016. Vol. 42. PP. 197-204.

4. Ultrasound of alternating frequencies and variable emotional impact evokes depressive syndrome in mice and rats / A. Morozova, E. Zubkov, T. Strekalova [et al.] // Progress in neuro-psychopharmacology & biological psychiatry. 2016. Vol. 68. PP. 52-63.

EFFECT *BIFIDOBACTERIUM ADOLESCENTIS* ON THE COMPOSITION OF THE GUT MICROBIOTA OF MICE UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASONIC-INDUCED STRESS

Karabanov S.Yu.

V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Talalikhina st. 26, Moscow, Russian Federation, 109316
e-mail: s.karabanov@fncps.ru

The effect of *Bifidobacterium adolescentis* on the composition of the gut microbiota of C57BL/6 mice under the influence of ultrasonic-induced stress was studied. It was shown that *B. adolescentis* prevents the decrease in microbial diversity, and also smooths out changes in the number of bacteria caused by stress at the phylum and family levels.

Keywords: gut microbiota, *Bifidobacterium adolescentis*, ultrasonic-induced stress

The health benefits of bifidobacteria can be attributed to the ability to modulate the gut microbiota. For example, the anaerobic digestion of indigestible carbohydrates can provide growth substrates for other gut bacteria, which increases the diversity of the gut microbiota, in which opportunistic bacteria are difficult to thrive. Bifidobacteria are also important in the context of gamma-aminobutyric acid (GABA) production in the gut. Administration of GABA-producing bifidobacteria to rodents has been shown to reduce pain, fibromyalgia, depression, and anxiety. The ability to produce GABA among different probiotic strains is not the same, *B. adolescentis*, *B. angulatum* and *B. dentium* produce the most. It has been shown that *B. adolescentis* produces GABA in greater amounts than other types of bifidobacteria.

We investigated the effect of *B. adolescentis* on the microbiota of ultrasonic stressed mice. The Open Field, Forced Swimming, and O-Maze tests confirmed the anxiety behavior.

At the phylum level, we observed the following changes: a decrease in Bacteroidetes and Proteobacteria by 30.28 % and 52 %, and an increase in Firmicutes by 63.9 %. The influence of *B. adolescentis* smoothed out the changes: Bacteroidetes decreased by only 13.89 %, while the number of Firmicutes increased by 32.96 %.

At the family level, exposure to stress had significant changes in Lachnospiraceae and Rikenellaceae, with increases of 68.44 % and 30.95 %, respectively. At the same time, we observed a decrease in Bacteroidaceae by 63.1 %, Prevotellaceae by 43.4 %,

Ruminococcaceae by 14 %. The influence of *B. adolescentis* somewhat smoothed out the changes: the number of Lachnospiraceae increased by 33.2 %, while the number of Bacteroidaceae decreased by 49.5 %. However, *B. adolescentis* had no effect on Prevotellaceae, Rikenellaceae and Ruminococcaceae.

Changes in the generic composition were as follows: the genera Ruminococcus, Parabacteroides and Akkermansia disappeared, the total number of Alloprevotella decreased (by 59.16 %). At the same time, such genera as Alistipes, Saccharibacteria genera incertae sedis, Rikenella and Odoribacter occupied a free niche.

The impact of *B. adolescentis* made it possible to prevent the decrease in the total microbial diversity, but also to enrich it: the genera Dorea, Eisenbergiella, and Acetatifactor appeared.

B. adolescentis compensated for the decrease in microbial diversity, smoothed out the quantitative fluctuations of various bacteria, and also reduced anxiety behavior when exposed to ultrasonic stress. However, we could not detect either *B. adolescentis* representatives of the Bifidobacteriaceae family or representatives of the phylum Actinobacteria. We analyzed the intestinal microbiota on days 0 and 28, so it was impossible to determine how long *B. adolescentis* colonized the intestine. It is likely that bifidobacteria did not take root, but were able to have a positive effect, as they were administered daily.

More studies with daily monitoring of the gut microbiota are needed to explore in detail the ability of *B. adolescentis* to colonize the gut.

НА ПУТИ К БИОЛОГИЧЕСКОМУ МУТАГЕНЕЗУ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ СЕЛЕКЦИИ РАСТЕНИЙ

Киров И.В.^{1,2,a}, Казанцев М.Ю.^{1,2}, Соловьёв А.А.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

email: ^a kirovez@gmail.com

Мобильные элементы (TE) можно рассматривать как природные биологические мутагены. Транспозиция TE является одним из эволюционных механизмов, служащих основным источником генетического разнообразия для адаптации растений. Получены результаты, которые свидетельствуют о возможности контролируемо запускать активность TE и получать растения с новыми фенотипическими признаками.

Ключевые слова: мутагенез, транспозоны, подсолнечник

Селекция растений опирается на генетическое разнообразие, доступное селекционерам, которое используется для создания новых комбинаций генов и признаков. Поэтому методы и подходы создания генетического разнообразия сельскохозяйственных культур являются краеугольным камнем селекционного процесса. Вовлечение диких родственников и различных генотипов и разновидностей в скрещивания с последующим отбором наиболее желательных генотипов из потомства является распространенным способом создания генетического разнообразия. Другой подход – химический и радиационный мутагенез. Применение мутагенеза привело к созданию новых сортов сельскохозяйственных культур и генетических ресурсов. Кроме того, для многих видов растений были созданы мутационные генетические популяции, что привело к огромному прогрессу в функциональной геномике. Однако традиционный мутагенез имеет ряд недостатков, включая низкую частоту ценных мутаций и сложный процесс идентификации связи фенотип-мутация. Мутационный процесс – это неотъемлемая часть эволюции и адаптации растений в природе. Но скорость возникновения мутаций в естественных условиях значительно меньше, чем при искусственном мутагенезе. Очевидно, что в отличие от животных растения не могут избежать стрессовых факторов и не могут завоевывать новые экологические ниши путем физического перемещения на большие расстояния. Поэтому основной стратегией адаптации растений к новым условиям и стрессам окружающей среды является генерирование естественного генетического

разнообразия. Теперь ясно, что стресс окружающей среды может увеличить частоту однонуклеотидных мутаций, а также структурных перестроек, включая перемещение мобильных элементов (TE). При этом новые вставки TE не генерируются случайным образом в геноме и могут часто встречаться в генах, реагирующих на стресс, обеспечивая связь между действием стресса и появлением новых аллелей генов, реагирующих на стресс. Это указывает на то, что транспозиция TE является одним из эволюционных механизмов, служащих основным источником генетического разнообразия для адаптации растений. Таким образом, TE можно рассматривать как природные биологические мутагены и главную силу биологического мутагенеза в природе. В нашей работе мы разрабатываем технологию биологического мутагенеза для ряда сельскохозяйственных культур, включая подсолнечник (*Helianthus annuus* L.). Благодаря новому способу воздействия на активность мобильных элементов были получены сотни растений M1, среди которых некоторые показывают фенотипические отклонения от контрольных линий в полевых и тепличных условиях. Полногеномное и таргетное нанопоровое секвенирование позволили выявить TE с высокой мутагенной активностью в ряде видов сельскохозяйственных растений. Полученные результаты свидетельствуют о возможности контролируемо запускать активность TE и получать растения с новыми фенотипическими признаками.

Работа поддержана грантом РФФ No 22-64-00076.

TOWARD BIOLOGICAL MUTAGENESIS FOR ACCELERATED PLANT BREEDING

Kirov I.V.^{1,2,a}, Kazantsev M.Yu.^{1,2}, Soloviev A.A.¹

¹ All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

² Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

email: ^a kirovez@gmail.com

Transposable elements (TEs) are natural mutagens of plant genomes. The insertions of TEs affects plant adaptation, evolution, and were involved in creation of new phenotypes for plant breeding. The protocol for the controlled activation of the TE in sunflowers was developed. The sunflower genotypes obtained were grown in fields, displaying some variations in germinating index and phenotype.

Keywords: *mutagenesis, transposons, sunflower*

УДК 577.29+581.1

РОЛЬ СЕНСОРА АПОПЛАСТНОГО H₂O₂ В ОТВЕТЕ *ARABIDOPSIS* НА ЗАСОЛЕНИЕ И ОСТРОЕ РЕДКОИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Король М.Ю.^a, Бабина Д.Д., Шестерикова Е.М., Празян А.А., Пишенин И.А., Бондаренко Е.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

e-mail: ^a podobedmyu@gmail.com

Проведена серия экспериментов с использованием линии *hpsa1* модельного растения *Arabidopsis thaliana* для выявления роли гена *HPСА1* в ответе на острое радиационное воздействие и продолжительное хлоридное засоление. Мутантная линия *hpsa1* отличается потерей функции гена *HPСА1*, кодирующего трансмембранную рецепторную серин/треониновую киназу с лейцин-насыщенными повторами, которая распознает внеклеточный пероксид водорода, необходимый для системной передачи сигналов кальция между клетками, а также для адаптации растений к стрессу. Ответ растений на воздействие выбранных абиотических стрессовых факторов по отдельности и в комбинации оценивали с помощью морфометрических параметров. В отличие от растений дикого типа (Col-8, использованного в качестве референтного) отмечено статистически значимое ингибирование площади поверхности 7-ми суточных проростков *hpsa1* после γ -облучения семян отдельно и в комбинации с засолением, по сравнению с контролем внутри линии. Также было показано отсутствие стимуляции длины корней для растений генотипа *hpsa1* после изучаемых воздействий как на 5, так и на 7 сутки в отличие от растений дикого типа, что может свидетельствовать о важности работы гена *HPСА1* для стимуляции роста корней при действии изучаемых стрессоров.

Ключевые слова: *пероксид водорода, Arabidopsis thaliana, гамма-излучение, засоление, абиотический стресс, комбинация стрессоров*

С развитием сельского хозяйства и атомной энергетики растения встречаются с новыми вызовами, такими как засоление и радионуклидное загрязнение почв. Комбинации таких стрессовых факторов наносят большой вред сельскому хозяйству, чем высокие и низкие температуры воздуха, засуха, так как действуют постоянно, а не периодически. Одним из первичных неспецифических ответов на стрессовое воздействие является продукция активных форм кислорода (АФК). Открытие сенсора апопластного пероксида водорода *HPСА1* позволило выявить роль внутриклеточного кальция в ответ на

внеклеточный H₂O₂. Также белок, кодируемый геном *HPСА1*, необходим для системной межклеточной передачи сигналов АФК у растений, сталкивающихся с солевым стрессом [1].

Семена облучали на УНУ ГУР-120 в НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (источник γ -квантов – ⁶⁰Со) в бумажных пакетах. Доза острого облучения 25 Гр при мощности дозы 60 Гр/ч. Хлоридное 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 [2]. В работе были

использованы семена *A. thaliana* дикого типа Col-8 и мутантного генотипа *hpsa1* с мутацией в гене, кодирующем рецепторную серин/треониновую киназу с лейцин-насыщенными повторами. Семена помещали на квадратные чашки Петри, корни растений затемняли. 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 %, ФАР 80 мкмоль·с⁻¹·м⁻². Измерение площади поверхности листьев и длины корней проводили на 5 и 7 сутки после прорастания. С помощью программного обеспечения Easy Leaf Area оценивали общую поверхность зеленых листьев на чашке Петри, а затем определяли среднюю площадь листа на чашке. Длину корней измеряли с помощью программы ImageJ (version 1.53t). Массу проростков определяли на 18-ые сутки на аналитических весах PA213C (Ohaus), после чего определяли среднюю массу одного растения на чашку. Для статистического анализа использовали программы MS Office Excel 2019, Statistica 8.0.

У проростков мутантного генотипа был менее выраженный ответ по показателю длины корней на оба стрессора и на их сочетание (рис. 1). Подавленный

рост корней на 5 сутки и отсутствие стимуляции по сравнению с контролем на 7 сутки у мутантного генотипа могут свидетельствовать о важности работы гена *hpsa1* в корнях проростков при выбранных стрессорах. Ранее было показано, что стимулированный АФК приток Ca₂⁺ необходим для развития кончика корня и регулируется механизмом положительной обратной связи [3].

Для растений как дикого, так и мутантного генотипа наблюдалось уменьшение площади поверхности листьев при одиночном воздействии каждого стрессора на 7 сутки (рис. 2). Воздействие комбинацией стрессоров привело к статистически значимому уменьшению площади поверхности проростков для мутантного генотипа, в отличие от дикого. Увеличение площади поверхности листьев дикого типа после комбинированного воздействия согласуется с данными других авторов по увеличению солеустойчивости растений после предварительной гамма-обработки семян [4, 5].

Статистически значимого изменения массы проростков на 15 сутки выявлено не было, однако наблюдалась увеличение массы растений дикого типа, произрастающих в условиях засоления (рис.3).

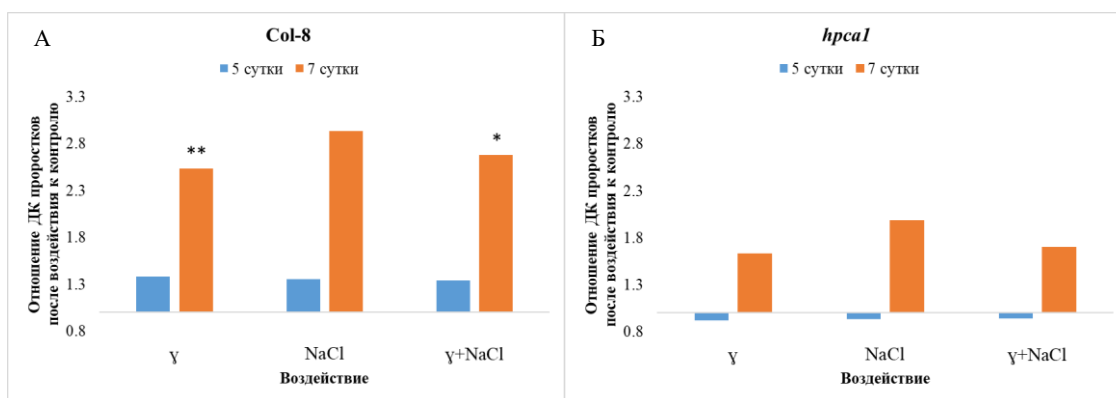


Рисунок 1. Изменение длины корней проростков (А) дикого (Col-8) и (Б) мутантного (*hpsa1*) генотипов после воздействия изучаемых факторов и их комбинации относительно контроля без абиотического воздействия $n = 45$, * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ по отношению к семенам без абиотического воздействия того же генотипа (тест Манна-Уитни)

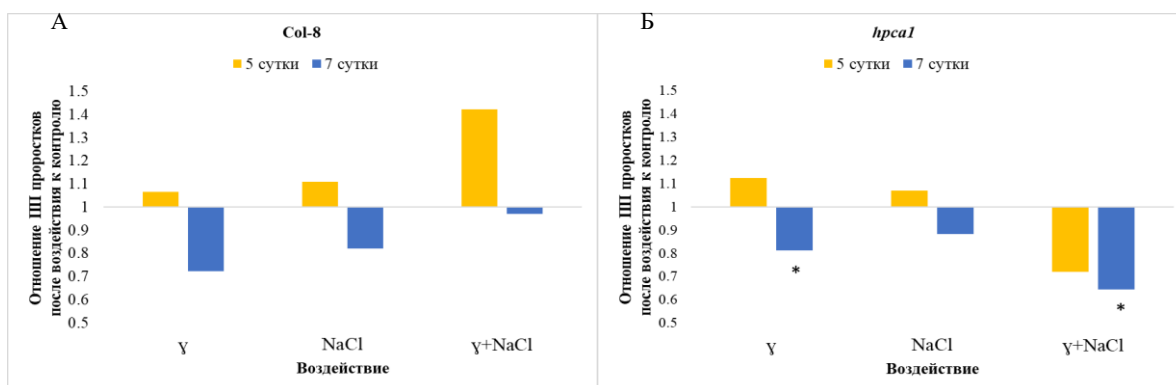


Рисунок 2. Изменение площади поверхности (ПП) листьев (А) дикого (Col-8) и (Б) мутантного (*hpsa1*) генотипов после воздействия изучаемых факторов и их комбинации относительно контроля без абиотического воздействия $n = 3$, * – $p < 0,05$ по отношению к семенам без абиотического воздействия того же генотипа (тест Манна-Уитни)

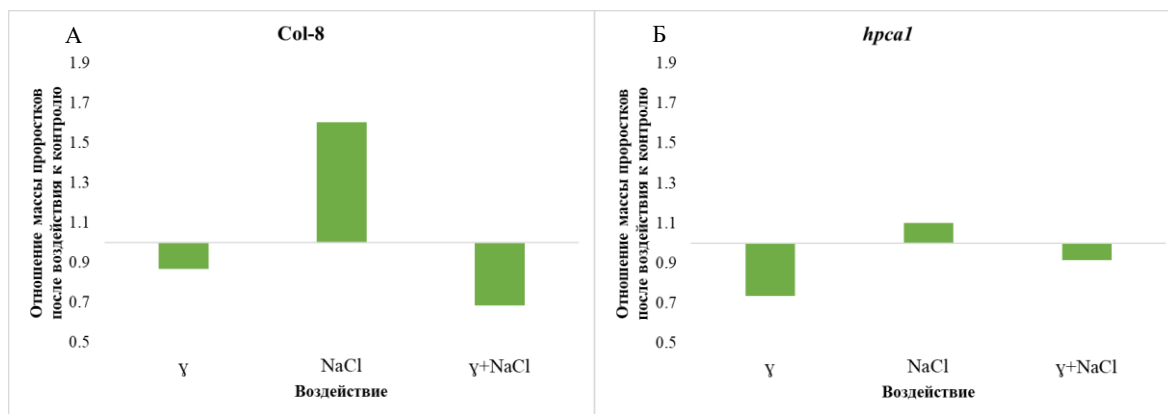


Рисунок 3. Изменение средней массы одного проростка (А) дикого (Col-8) и (Б) мутантного (*hpca1*) генотипов после воздействия изучаемых факторов и их комбинации относительно контроля без абиотического воздействия, $n = 3$

Таким образом, последовательное воздействие гамма-излучением в дозе 25 Гр и последующее проращивание семян *hpca1* в условиях слабого хлоридного засоления статистически значимо не влияет на длину корней 5-ти и 7-ми дневных проростков, но статистически значимо ингибирует площадь поверхности листьев на 7 сутки после гамма-излучения и его комбинации с засолением. Ранее было показано, что низкодозовое гамма-облучение модулирует антиоксидантную защиту и экспрессию генов, связанных с путями солевого стресса, у проростков арабидопсиса в ответ на солевой стресс [4]. Также было показано, что солевой стресс (100 мМ NaCl) вызывает волну кальция у мутанта *hpca1-1*, но не волну АФК [1]. Наблюдаемое в наших экспериментах усиление ингибирования площади поверхности листьев на 7 сутки при комбинированном воздействии гамма-излучения и засоления может быть связано с регуляцией работы генов, связанных с солевым стрессом, накоплением пролина и стимуляцией работы антиоксидантных ферментов после облучения семян.

Список литературы

1. HPCA1 is required for systemic reactive oxygen species and calcium cell-to-cell signaling and plant acclimation to stress / Y. Fichman [et al.] // The Plant Cell. 2022. Vol. 34. № 11. PP. 4453-4471. doi:10.1093/plcell/koac241.
2. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status / P. Verslues [et al.] // The Plant journal: for cell and molecular biology. 2006. Vol. 45. № 4. PP. 523-539. doi:10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x.
3. Local Positive Feedback Regulation Determines Cell Shape in Root Hair Cells / S. Takeda [et al.] // Science. 2008. Vol. 319. PP. 1241-1244. doi:10.1126/science.1152505.
4. Pretreatment with low-dose gamma irradiation enhances tolerance to the stress of cadmium and lead in *Arabidopsis thaliana* seedlings / W. Qi [et al.] // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. Vol. 115. PP. 243-249.
5. Pretreatment with High-Dose Gamma Irradiation on Seeds Enhances the Tolerance of Sweet Osmanthus Seedlings to Salinity Stress / X. Geng, Y. Zhang, L. Wang, X. Yang // Forests. 2019. Vol. 10. № 5. 406 P. doi:10.3390/f10050406.

THE ROLE OF THE APOPLASTIC H₂O₂ SENSOR IN ARABIDOPSIS RESPONSE TO SALINIZATION AND ACUTE IONIZING RADIATION

Korol M.Yu.^a, Babina D.D., Shestikova E.M., Prazyan A.A., Pishenin I.A., Bondarenko E.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^a podobedmyu@gmail.com

A series of experiments were conducted using the *hpca1* line of the model plant *Arabidopsis thaliana* to investigate the role of the *HPCA1* gene in response to acute radiation exposure and prolonged chloride salinity. The *hpca1* mutant line is characterized by the loss of function of the *HPCA1* gene, which encodes a transmembrane receptor serine/threonine kinase with leucine-rich repeats that recognizes extracellular hydrogen peroxide, necessary for the systemic transmission of calcium signals between cells and for plant adaptation to stress. The response of plants to the selected abiotic stress

factors individually and in combination was evaluated using morphometric parameters. In contrast to the wild-type plants (Col-8, used as a reference), a statistically significant inhibition of the surface area of 7-day-old *hpca1* seedlings was observed after γ -irradiation of the seeds individually and in combination with salinity, compared to the control within the line. Furthermore, there was no stimulation of root length for *hpca1* genotype plants after the studied exposures on both day 5 and day 7, unlike the wild-type plants, indicating the importance of the *HPCA1* gene in stimulating root growth under the influence of the studied stressors.

Keywords: hydrogen peroxide, *Arabidopsis thaliana*, gamma radiation, salinization, abiotic stress, combination of stressors

The discovery of the apoplastic hydrogen peroxide sensor HPCA1 has revealed the role of intracellular calcium in response to extracellular H₂O₂. Seeds were irradiated at the unique scientific installation GUR-120 facility at the Russian Institute of Radiology and Agroecology (source of γ -quantum - ⁶⁰Co) in paper bags. The acute radiation dose was 25 Gy at a dose rate of 60 Gy/h. Salinization was simulated by adding NaCl (M = 58.4 g/mol, Serva) to the medium. Wild-type *A. thaliana* seeds of the Col-8 strain and mutant genotype *hpca1* were used in the study. The seeds were placed on square Petri dishes. Seedlings were grown in a phytotron under long-day conditions (16 h light/8 h dark) at a temperature of +21 °C during the day and +20 °C at night, with a humidity level maintained at 55 % and a photosynthetically active radiation (PAR) of 80 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Leaf surface area and root length were measured on days 5 and 7 after germination. The Easy Leaf Area software was used to estimate the total surface area of green leaves on each Petri dish, and then the

average leaf area per dish was determined. Root length was measured using ImageJ software (version 1.53t). The mass of seedlings was determined on the 18th day using analytical scales PA213C (Ohaus), after which the average mass per plant per dish was determined. MS Office Excel 2019 and Statistica 8.0 software programs were used for statistical analysis.

Sequential exposure to gamma radiation at a dose of 25 Gy and subsequent germination of *hpca1* seeds under conditions of mild chloride salinization did not statistically significantly affect the root length of 5- and 7-day-old seedlings, but statistically significantly inhibited leaf surface area on day 7 after gamma radiation and its combination with salinization. The observed enhancement of leaf surface area inhibition on day 7 under combined exposure to gamma radiation and salinization in our experiments may be associated with the regulation of genes involved in salt stress, proline accumulation, and stimulation of antioxidant enzyme activity after seed irradiation.

УДК 633.521:631.527

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ISSR-ПРАЙМЕРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА КОНОПЛИ ПОСЕВНОЙ

Логонова Н.Н., Минина Е.В., Михайлова П.Д., Базанов Т.А.^а

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр лубяных культур», 170041, г. Тверь, Комсомольский пр-кт, д. 17/5, Российская Федерация
e-mail: ^аt.bazanov@fncl.ru

Исследование генетического полиморфизма конопля посевной – необходимый этап при селекции новых высокопродуктивных сортов. В данном исследовании было изучено 10 сортов технической конопля российской селекции (Вера, Сурская, Надежда, Юлиана, Гентус, Димра, Марго, Милена, Ингреда, Диана) с помощью линейки из 20 ISSR-праймеров. Было определено 99 аллелей. Их размер был в пределах 430-1500 п.н. Кластерный анализ, проведенный методом главных компонент (PCA-метод), позволил выявить три группы сортов, объединенных на основе следующих характеристик: «оригинатор», «исходный селекционный материал», «морфологические признаки». С помощью ISSR-маркеров определен высокий уровень внутрисортного полиморфизма и тенденция к сужению генетического фонда сортов конопля.

Ключевые слова: конопля посевная, генетический полиморфизм, ISSR-маркеры, селекция, генетика

Конопля посевная (*Cannabis sativa* L. subsp. *sativa*) – сельскохозяйственная культура комплексного назначения, возделываемая уже более 3000 лет. В настоящее время ее продукты (волокно и семена)

используются в самых разных отраслях промышленности: пищевой, энергетической, медицинской, текстильной, строительной и т.д. [1]. Возобновление интереса к данной технической культуре стимулирует

спрос на новые высокопродуктивные сорта, что, соответственно, ведет к селекционной работе по созданию этих новых сортов. Существует ряд трудностей при селекции конопли, связанных с ее биологическими особенностями: дудомностью, внутрисортной гетерозиготностью, зависимостью от внешних условий и, главное, присутствием в качестве метаболита психоактивного тетрагидроканнабинола [2].

Успех селекционной работы зависит и от разнообразия исходного материала, и от его генетической изученности. Методов селекции на основе биохимических признаков и морфологических дескрипторов становится недостаточно и требуется дополнять их такими современными технологиями, как генетическое маркирование [3].

Микросателлитное праймирование (применение ISSR-маркеров) – универсальный метод генетического исследования растений в популяционной генетике, картировании геномов, молекулярной таксономии т.д. [4]. В основе ISSR-анализа лежит изучение полученных в результате ПЦР-реакции полиморфных участков ДНК между микросателлитами. Такие маркеры позволяют получать уникальные ДНК-

последовательности, в дальнейшем анализируемые с помощью агарозного гель-электрофореза [5].

Целью работы является комплексное изучение полиморфизма ряда современных российских сортов конопли посевной с помощью ISSR-маркеров.

Объектами исследования стали 10 сортов однодомной технической конопли среднерусского типа, включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации: «Вера», «Сурская», «Надежда» (оригинаторы – ФГБНУ ФНЦ ЛК, г. Тверь; ООО «Коноплекс», г. Москва); «Юлиана», «Гентус», «Димра», «Марго» (оригинаторы – ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров; ИП Глава КФХ Пономаренко А.И., Псковская обл.); «Милена» (оригинатор – ООО «Коноплекс», г. Москва); «Ингреда» (оригинаторы – ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров; ФГБНУ ФНЦ ЛК, г. Тверь); «Диана» (оригинаторы – ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров; ФГБНУ ФНЦ ЛК, г. Тверь; ООО «Мордовские пенькозаводы», г. Инсар).

Каждый сорт был представлен пятью семенами. ДНК извлекали с помощью СТАВ-метода. Для исследования были использованы праймеры, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Использованные ISSR-маркеры конопли посевной

ISSR-маркер	Последовательность	ISSR-маркер	Последовательность	ISSR-маркер	Последовательность	ISSR-маркер	Последовательность
ISSR-1	(CT) ₈ TG	ISSR-6	(AG) ₈ CA	ISSR-11	(GA) ₈ C	ISSR-16	(AG) ₈ TT
ISSR-2	(CA) ₅ GT	ISSR-7	(AC) ₈ AA	ISSR-12	(GA) ₈ A	ISSR-17	(AC) ₈ CG
ISSR-3	(AG) ₇ GT	ISSR-8	(AC) ₈ TA	ISSR-13	(CA) ₈ A	ISSR-18	(AG) ₈ A
ISSR-4	(AC) ₈ TG	ISSR-9	(AG) ₈ T	ISSR-14	(AC) ₈ C	ISSR-19	(AG) ₈ G
ISSR-5	(AC) ₈ CA	ISSR-10	(AG) ₈ C	ISSR-15	(AG) ₈ CT	ISSR-20	(AG) ₈ CC

ПЦР-смесь объемом 25 мкл содержала: 30 нг ДНК, 2,5 мкМ MgCl₂, 200 мкМ dNTP, 1 единицу Taq-полимеразы и подобранное экспериментально количество праймера. ПЦР проводили на амплификаторе T100 MyCycler™ (Bio-Rad Laboratories, Inc.) при следующих условиях: начальная денатурация 3 мин при 95 °С; затем 30 циклов: денатурация при 95 °С – 30 с, отжиг праймера в течение 30 с при температуре 58 °С, элонгация при 72 °С – 45 с; терминальная элонгация – 5 мин 72 °С.

ДНК-продукты разделяли в 1,5 % агарозном геле при 100 В в течение 2 ч в буфере TAE. Оценку размеров полос производили с помощью GelAnalyser. Данные по присутствию-отсутствию ISSR-маркеров анализировались при помощи надстройки GenAlEx 6.5.

У 55 индивидуальных образцов десяти сортов было найдено 99 аллелей. Маркеры ISSR-2, ISSR-11, ISSR-17 не показали полос. Размер аллелей был в пределах 430-1500 п.н. Для каждого образца набор аллелей был уникальным.

Кластерный анализ проведен методом главных компонент (PCA-метод).

Молекулярное маркирование позволяет группировать сорта сельскохозяйственных культур по признаку их происхождения или по оригинатору [6]. Результаты данного исследования подтверждают возможность данного метода.

Изученные сорта конопли посевной разделились на три основных кластера, обозначенные буквами А, В и С (рис. 1). В группу А вошли три сорта: Милена, Марго и Димра. Примененные в данном исследовании локусы показывают генетическую близость этих сортов, как минимум по одному показателю. Они относятся к желтостебельным сортам среднерусской конопли, раннеспелые, со сходными характеристиками волокна. Близость генотипов, определяемая ISSR-маркерами, чаще всего связана с применением при скрещивании родственного исходного материала.

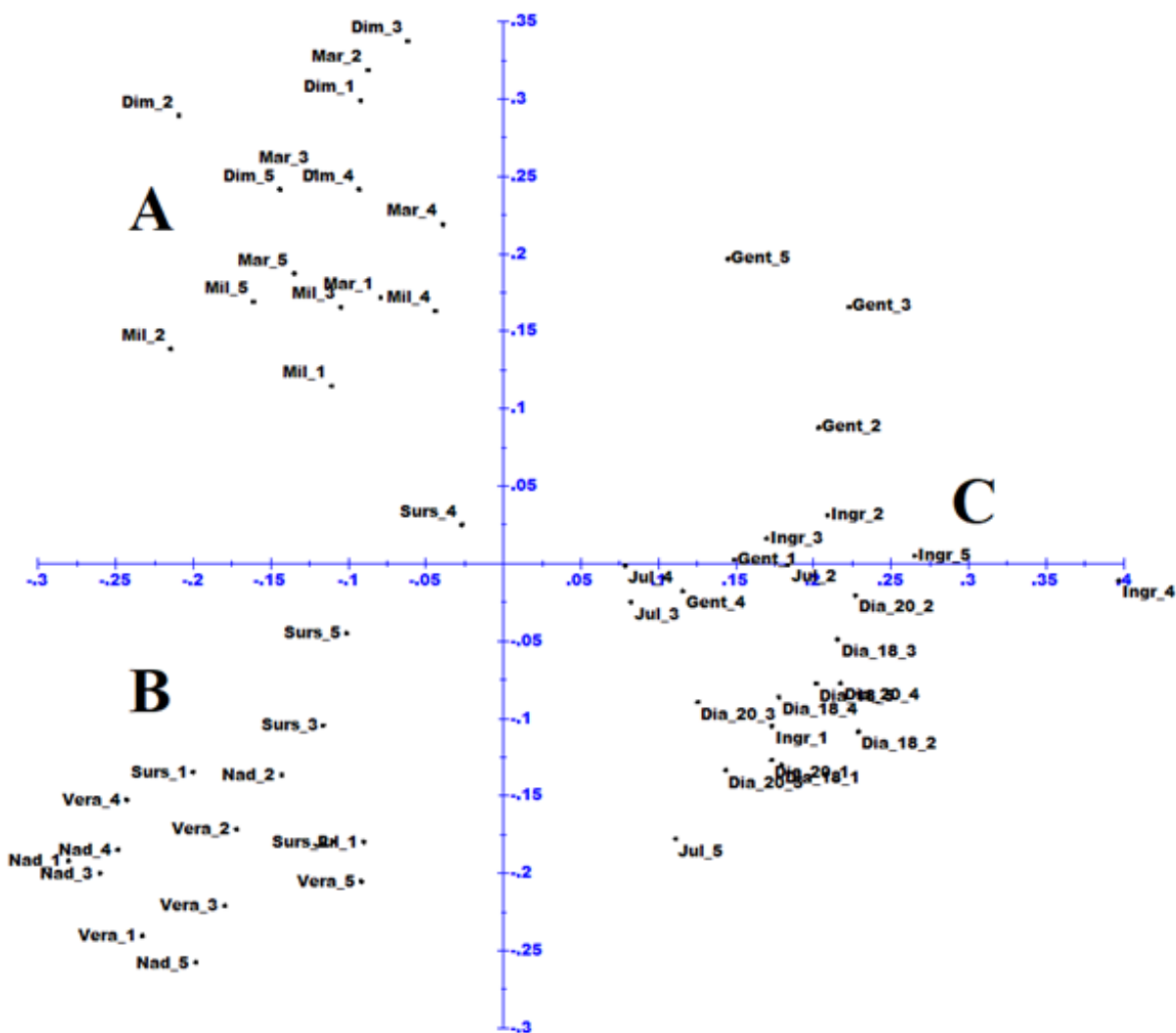


Рисунок 1. Распределение сортообразцов конопли посевной по данным PCA-метода

Кластер В содержит три сорта селекции ФГБНУ ФНЦ ЛК – Вера, Надежда, Сурская. Эти зеленостебельные среднеспелые сорта получены с помощью кроссбридинга однодомных сортов конопли ЮСО-31 в разных вариациях. При этом, Надежда и Вера имеют высокую генетическую близость и представляют собой слабо разделенную сортовую группу. Они были выведены в один период времени из простых родительских комбинаций. Сорт Сурская был получен ранее из сложной комбинации южноспелых одно- и двудомных сортов конопли посевной.

Кластер С соединяет в себе оставшиеся исследованные сорта. Они группируются по основному оригинатору – ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока.

Однако, внутри кластеров исследованные образцы проявляют слабую степень внутрисортовой однородности, что указывает на генетическую узость пула существующих сортов конопли. Это является индикатором для необходимого расширения генофонда среднерусской конопли.

Таким образом, при использовании молекулярно-генетических маркеров для исследованных сортов конопли посевной были выявлены внутрисортовой полиморфизм и узость генетического пула сортов. Обнаружено, что данные сорта группируются по трем основным кластерам, связанным с оригинатором, исходным селекционным материалом и морфологическими признаками.

Дальнейшее сужение генетического разнообразия сортового материала может оказаться неблагоприятным фактором для развития коноплеводства. Использование различных ДНК маркеров в селекционной работе с технической коноплей позволит выявить оптимальные пути решения данной проблемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках темы FGSS-2019-0023 Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК.

Список литературы

1. Серков В.А., Смирнов А.А., Александрова М.Р. История коноплеводства в России // Масличные культуры. 2018. № 3 (175). С. 132-141.

2. Onofri C., Mandolino G. Genomics and Molecular Markers in *Cannabis sativa* L. // *Cannabis sativa* L. – Botany and Biotechnology / ed. Chandra S., Lata H., El-Sohly M. A. Cham, 2017. Chap. 15. PP. 319-342.

3. Bhargava A., Srivastava S. Plant breeding // Participatory Plant Breeding: Concept and Applications / ed. Bhargava A., Srivastava S. Singapore, 2019. Chap. 2. PP. 29-68.

4. Бобошина И.В., Боронникова И.В. Изучение генетического полиморфизма некоторых сортов *Triticum aestivum* L. с использованием ISSR-маркеров // Аграрный вестник Урала. 2012. № 5. С. 19-20.

5. Использование ISSR-анализа для изучения внутри- и межвидового генетического полиморфизма различных таксонов высших растений / З.Е. Грушецкая [и др.] // Вестник БГУ. 2013. № 3. С. 50-56.

6. Paczos-Grzeda E.M., Bednarek P.T., Koroluk A. *Avena sativa* L. intercultivar polymorphism assessment using silico DArT markers // *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis Agricultura, Alimentaria, Piscaria et Zootechnica*. 2014. № 30. PP. 75-84.

APPLYING ISSR-PRIMERS TO STUDY THE GENETIC POLYMORPHISM OF CANNABIS SATIVA

Loginova N.N., Minina E.V., Mikhaylova P.D., Bazanov T.A.^a

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops»,
Komsomolsky prospect 17/56, Tver, Russian Federation, 170041
e-mail: ^at.bazanov@fncl.ru

The research of the genetic diversity of hemp is a necessary stage in the breeding of new highly productive varieties. In this study, 10 varieties of industrial hemp of Russian breeding (Vera, Surskaya, Nadezhda, Yuliana, Gentus, Dimra, Margo, Milena, Ingreda, Diana) were studied using a set of 20 ISSR-primers. 99 alleles were identified. Their size was in the range of 430-1500 bp. Cluster analysis was carried out of method of principal component analysis (PCA-method). The studied varieties of hemp were divided into three main clusters. Their grouping was associated with the originator, initial breeding material and morphological features. Intravarietal polymorphism and narrowness of the genetic pool of varieties were revealed.

Keywords: *hemp, genetic polymorphism, ISSR-markers, breeding, genetics*

Cannabis sativa L. subsp. *sativa* is a multipurpose agricultural crop that has been cultivated for over 3000 years. There are a number of difficulties in the selection of cannabis associated with its biological characteristics.

The success of breeding work depends both on the diversity of the source material and on its genetic knowledge. The genetic diversity of modern hemp varieties can be studied using DNA-markers. The use of ISSR-markers is a universal method for the genetic study of plants. This markers make it possible to obtain unique DNA-sequences, which are further analyzed by agarose gel electrophoresis. The use ISSR-markers

helps efficient breeding, analysis of genetic polymorphism.

In this study, to research genetic polymorphism, a PCR-method was applied using twenty ISSR-markers, followed by detection of products by electrophoresis in 1.5 % agarose gel. Based on the results obtained, 99 alleles were identified in 55 individual samples of ten varieties, for which each set of alleles was unique. Cluster analysis was carried out of method of principal component analysis (PCA-method). The studied varieties of hemp were divided into three main clusters. The grouping of varieties of different crops in this kind of research is usually associated with the originator. This was confirmed by the data obtained in this study.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМБРИОНОВ КРС С ЗАДАНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ В ГЕНОМЕ

Макутина В.А., Донник И.М.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», 620142, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112А, Российская Федерация
e-mail: info@urivi.ru

Разработана система созревания гамет КРС, оплодотворения ооцитов и проведение редактирования генома с последующим культивированием полученных эмбрионов до стадии бластоцисты. Нами успешно проведен весь цикл работ – от взятия донорского материала до переноса эмбриона корове-реципиенту. Получена жизнеспособная особь – теленок. На основе исследований выбран оптимальный способ доставки системы редактирования в зиготу. Накоплены эмбрионы КРС с отредактированным геномом, пригодные для трансплантации животным-реципиентам.

Ключевые слова: ооциты КРС, эмбрионы КРС, *ivm*, *ivf*, *Crispr/Cas9*, AAV, BLG, *Cd209*

Для создания эмбрионов КРС с определенными генетическими модификациями необходим синтез современных технологий в области эмбриологии, репродуктологии, ветеринарной медицины, геномной инженерии, молекулярной биологии и биоинформатики.

Мы отбирали яичники коров при убое скота на специализированном убойном пункте и транспортировали в лабораторию с поддержанием температуры + 37-38 °C или + 4 °C. В лаборатории визуализируемые фолликулы от 2 до 8 мм аспирировали. Полученные при аспирации ооцит-кумуляусные комплексы оставляли на созревание в специализированной среде для культивирования эмбрионов. Использовали три варианта сред для дозревания ооцитов КРС: добавление на 24 часа в среду гормонов, имитирующих естественный пик ЛГ в яичниках + добавление ФСГ, который модифицирует клетки кумулюсного комплекса, вызывает экспрессию рецепторов ЛГ и фактора роста эпидермиса; метод SPOM (Simulated Physiological Oocyte Maturation), имитация накопления в ооците циклического аденозин монофосфата (цАМФ). При этом методе ооциты на стадии зародышевого пузырька (GV) поддерживаются в культуре (арест деления), чтобы позволить им завершить дифференцировку до возобновления мейоза; 3 метод – использование среды коммерческого производства IVM Bioscience.

Через 24 часа проводили экстракорпоральное оплодотворение путем добавления в среду оплодотворения к ооцит-кумуляусным комплексам спермы племенных быков в концентрации 1,0-2,0 x 10⁶ подвижных сперматозоидов/мл при 38,5 °C 6,5 % CO₂ и 5 % O₂. Через 15-18 часов после оплодотворения полученные зиготы очищались от клеток кумулюса и сперматозоидов и криоконсервировались путем витрификации. Часть зигот была прокультивирована на трех вариантах доступных коммерческих сред для

культивирования эмбрионов с целью выбора оптимального подхода для культивирования эмбрионов до стадии бластоцисты. Для подтверждения жизнеспособности полученных эмбрионов три полученных бластоцисты были перенесены коровам-реципиентам. Получена одна успешная беременность, которая завершилась рождением здорового теленка.

Дизайн и синтез гидовых РНК (SgRNA)

Подбор гидовых РНК осуществлен с помощью онлайн-алгоритма CRISPOR. Для нокаута гена CD209 гидовые РНК были подобраны на второй экзон этого гена. Из пяти предложенных алгоритмом CRISPOR вариантов гидовых РНК была выбрана одна, наиболее удовлетворяющая условиям эксперимента [1]. Для нокаута гена BLG было решено внести мутацию в промотор этого гена, так как на сам ген не удалось подобрать качественной гидовой РНК. Из пяти предложенных алгоритмом CRISPOR вариантов гидовых РНК для промотора гена BLG выбрана одна, наиболее удовлетворяющая условиям эксперимента [2].

Трансдукция эмбрионов КРС с помощью аденоассоциированных вирусов (AAV)

Был сконструирован рекомбинантный AAV, несущий последовательность зеленого флуоресцентного белка (GFP). Для оценки применимости AAV в качестве агента доставки генов в эмбрионы КРС исследовали пять различных серотипов рекомбинантных AAV (AAV1, AAV2, AAV6, AAV9, AAV-DJ) [3]. Успешность трансдукции определяли по выходу GFP-позитивных эмбрионов КРС. Впоследствии серотип AAV2 использовали для внесения двуцепочечных разрывов в кодирующую область генов бета-лактоглобулина (BLG) и рецептора CD209. Было проведено модельное заражение ооцитов крупного рогатого скота. 45 эмбрионов после редактирования гена бета-лактоглобулина, получено 38 эмбрионов на стадии 8 клеток, 14 эмбрионов достигли стадии бластоцисты (31 %),

остальные остановились в развитии. 30 эмбрионов после модельного редактирования рецептора CD209, было получено 14 эмбрионов на стадии 8 клеток, 3 из которых достигли стадии бластоцисты (10 %). 13,6 % эмбрионов содержали мозаичные сдвиги рамки считывания.

Иньекция мРНК в цитоплазму ооцита КРС

В ходе проведенных серий микроинъекций конструкций для редактирования генома ранних эмбрионов КРС в цитоплазму оплодотворенного ооцита было проинъецировано 200 клеток. Гибель клеток составила около 10 %. Почти половина ооцитов начала дробление, восьмиклеточной стадии достигли 67,6 %, а 11 эмбрионов достигли стадии бластоцисты, что составило 5,5 % всех использованных клеток. 32,3 % зигот были арестованы вскоре после начала дробления. Разрезы были обнаружены в 5 из 17 эмбрионов после микроинъекций гидовой РНК против гена *BLG* и мРНК *spCas9* (29,4 %) и в 2 из 9 эмбрионов после микроинъекций гидовой РНК против гена *CD209* и мРНК *spCas9* (22,2 %). Полученные данные свидетельствуют об успешности и эффективности работы этой системы доставки, так как 29,4 % анализируемых эмбрионов после микроинъекций несли в геноме модификации гена *BLG* и 22,2 % анализируемых эмбрионов после микроинъекций несли модификации гена *CD209*.

Возможность нокаута гена β -лактоглобулина (основной аллергенный молочный белок) с помощью ZFN впервые была продемонстрирована Yu и др [12]. Другая группа, сообщившая о делеции гена лактоглобулина на эмбрионах КРС использовала TALEN [13]. При этом было отредактировано 1511 зигот КРС, уровень дорастания до бластоцисты составил 15 %, количество эмбрионов, несущих делецию – 21 %. Мы достигли схожих результатов с применением системы CRISPR/Cas9: 20-30 % уровня нокаута и 16 % уровня бластуляции.

Подходы, повышающие большую эффективность редактирования у эмбрионов мышей, включая пронуCLEARную микроинъекцию зигот во время S-фазы и инъекцию на стадии двух клеток, вряд ли будут

непосредственно применимы к бычьим эмбрионам. Технически, в отличие от мышей и крыс, бычьи зиготы имеют очень темную цитоплазму, что ограничивает визуализацию пронуклеуса. Кроме того, повышенная эффективность редактирования на стадии двух клеток у мышей, вероятно, связана с длительной фазой G2 в результате активации генома. Этот подход вряд ли даст аналогичные результаты у эмбрионов КРС, учитывая, что активация генома происходит на стадии от 8 до 16 клеток у этого вида. Более того, хотя оба этих подхода показали повышенную эффективность у эмбрионов мышей, ни одно из исследований не оценивало уровень мозаицизма у полученных эмбрионов, который, вероятно, будет высоким, учитывая, что оба метода нацелены на эмбрионы после первого раунда репликации ДНК.

Список литературы

1. Using CRISPR/CAS9 for generation the CD209 knockout is a way to get cattle breeds resistant to the bovine leukemia virus (BLV) / A.V. Deykin, M.V. Kubekina, Y.Y. Silaeva [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 176. P. 01007.
2. Gene editing CRISPR/CAS9 system for producing cows with hypoallergenic milk on the background of a beta-lactoglobulin gene knockout / Y.Y. Silaeva, M.V. Kubekina, A.V. Bruter [et al.] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 176. P. 01006.
3. AAV infection of bovine embryos: Novel, simple and effective tool for genome editing / A.S. Krivonogova, A.V. Bruter, V.A. Makutina [et al.] // Theriogenology. 2022. Vol. 193. PP. 77-86.
4. Highly efficient modification of beta-lactoglobulin (BLG) gene via zinc-finger nucleases in cattle / Yu. Shengli, Luo Junjie, Song Zhiyuan [et al.] // Cell Res. 2011. Vol. 21(11). PP. 1638-1640. doi: 10.1038/cr.2011.153. PMID: PMC3364726.
5. Cattle with a precise, zygote-mediated deletion safely eliminate the major milk allergen beta-lactoglobulin / J. Wei, S. Wagner, P. Maclean [et al.] // Scientific Reports. 2018. Vol. 8(1). P. 7661. doi: 10.1038/s41598-018-25654-8.

A SYSTEM FOR OBTAINING BOVINE EMBRYOS WITH SPECIFIED GENOME CHANGES

Makutina V.A., Donnik I.M.

Federal State Budgetary Scientific Institution "Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", Belinskogo st. 112a, Ekaterinburg, Russian Federation, 620142

e-mail: info@urivi.ru

A system has been developed for the maturation of cattle gametes, fertilization of oocytes and genome editing, followed by cultivation of the embryos to the blastocyst stage. We have successfully carried out the entire cycle of work - from taking donor material to transferring the embryo to the recipient cow. A viable individual, a calf, was obtained. Based on

research, the optimal method for delivering the editing system to the zygote was selected. Genome-edited cattle embryos suitable for transplantation into recipient animals have been cryopreserved.

Keywords: *bovine oocytes, bovine embryos, ivm, ivf, Crispr/Cas9, AAV, BLG, Cd209*

УДК 631.52

OPTIMIZING AGROBACTERIUM-MEDIATED PROTOCOL FOR VIRUS INDUCED GENE SILENCING (VIGS) IN SUNFLOWER *HELIANTHUS ANNUUS*

Mardini M.^{1,3,a}, Kazantsev M.Y.^{1,2}, Ivoilova E.A.¹, Utkina V.V.¹, Vlasova A.V.^{1,2}, Kirov I.V.^{1,2}

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

²Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

³Russian State Agrarian University – MTA, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

e-mail: ^amr.majdmardini@gmail.com

Virus-Induced Gene Silencing (VIGS) has emerged as a potent and versatile tool within various areas of agricultural research. An important factor for achieving a high level of VIGS efficiency is the delivery method, which is commonly facilitated by agrobacterium. In this work we developed a robust protocol for VIGS on sunflower with high level of efficiency and reproducibility on several cultivars. Having a reliable protocol for agrobacterium-mediated delivery of VIGS systems into non-model crops provides a valuable resource for researchers to explore new targets and design innovative approaches in fundamental and applied research.

Ключевые слова: *VIGS, sunflower, PDS, vacuum infiltration, agrobacterium*

VIGS finds application in elucidating functional genomics, investigating host-pathogen dynamics, exploring mechanisms of abiotic stress adaptation, and more [1, 2]. The number of research projects dedicated to VIGS technology is booming, highlighting its widespread adoption and recognition as a powerful tool for advancing crop science and biotechnology.

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) holds a prominent position among oil crops. Despite its agricultural value, sunflower has traditionally posed challenges for modification. In recent years, only a handful of studies have explored the use of VIGS to investigate sunflower traits. For instance, Basile *et al.* [3] employed VIGS as an extra method to confirm the significance of the Ha-ROXL gene in flower development. Similarly, Jiang *et al.* [4] utilized VIGS to suppress the HaTubulin gene, known for its involvement in interactions with the *Orobanche cumana* parasite. In both cases, VIGS procedures were established using a modified form of tobacco rattle virus (TRV) that was introduced into the plant tissue via agrobacterium infiltration.

In our lab, subtle agrobacterium-mediated VIGS protocols have been well-established for numerous species. However, a noticeable gap in technical details has become evident when applying this methodology to sunflower. To address this gap, we initially sought to reproduce VIGS protocols described in the existing literature. Unfortunately, we encountered several setbacks at the outset. Recognizing our limited experience with this particular species, we came to realize the need to touch base and optimize a robust protocol specifically tailored to sunflower.

A series of optimization experiments were systematically carried out to assess the impact of different key variables on the efficiency of agrobacterium-mediated VIGS. These variables included: the growth stage of the infected plant, the utilization of vacuum during co-cultivation, co-cultivation duration, syringe-based infiltration, rubbing, and different plant genotypes. Each of these factors was examined in isolation or in combination with others to evaluate its influence on the efficacy of gene silencing. PHYTOENE DESATURASE (PDS) gene served as the target for our experiment due to its easy-to-detect phenotype. The efficacy of each treatment was estimated as a percentage of plants exhibiting photobleaching symptoms as well as the extent of symptom manifestation across leaves within an individual plant. Additionally, both reverse transcription PCR (RT-PCR) and quantitative PCR (qPCR) analyses were performed on the photobleached tissues to validate the presence of TRV and to quantify alterations in PDS expression.

We have successfully developed a simple and reproducible VIGS protocol for sunflower. We established, that applying vacuum for non-sprouted seeds is key factor for a successful VIGS. Our protocol was reproduced on 6 different commercial cultivars. The efficiency of gene silencing represented by photo-bleaching symptoms reached more than 90 % in some cultivars.

This work was funded by the Russian Science Foundation (grant No 22-64-00076).

References

1. Bekele D., Tesfaye K., Fikre A. Applications of virus induced gene silencing (VIGS) in plant functional genomics studies // Journal of Plant Biochemistry & Physiology. 2019. Vol. 7. № 1. PP. 1-7.

2. Virus-induced gene silencing (VIGS): a powerful tool for crop improvement and its advancement towards epigenetics / S. Zulfiqar, M. Farooq [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. № 6. P. 5608. DOI: 10.3390/ijms24065608.

3. The Ha-ROXL gene is required for initiation of axillary and floral meristems in sunflower / A. Basile, M. Fambrini [et al.] // Genesis. 2019. Vol. 57. № 9. e23307. DOI: 10.1002/dvg.23307.

4. Host sunflower-induced silencing of parasitism-related genes confers resistance to invading *Orobanche Cumana* / Z. Jiang, Q. Zhao [et al.] // Plant Physiology. 2021. Vol. 185. № 2. PP. 424-440. DOI: 10.1093/plphys/kiab018.

УДК 577.29

АКТИВНЫЕ РЕТРОТРАНСПОЗОНЫ *SOLANUM LYCOPERSICUM* И ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЕ

Меркулов П.Ю.^{1,2,a}, Серганова М.А.², Петров Г.А.², Киров И.В.^{1,2}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация
e-mail: ^a paulmerkulov97@gmail.com

Мобильные элементы (МЭ) значительным образом повлияли на диверсификацию томата, а также сформировали множество ценных для селекции признаков [1]. Однако к настоящему времени детально изучено крайне небольшое число ретротранспозонов *S. lycopersicum*, демонстрирующих транспозиционную активность. В данном исследовании нами было проведено нанопоровое секвенирование внехромосомных кольцевых ДНК (вкДНК) растений *S. lycopersicum*, подвергнутых комбинации эпигенетического и теплового стрессов. В результате нами были детектированы ранее не описанные ретротранспозоны, активно продуцирующие вкДНК. Интересно, что детектированные активные МЭ в изучаемом геноме является частью интрогрессии от дикого вида томата, *S. peruvianum*. Дальнейший анализ позволит установить последствия интрогрессии активных МЭ для генома растения-реципиента на примере *S. lycopersicum*.

Ключевые слова: томат, мобилом, ретротранспозоны, внехромосомная ДНК, методы, нанопоровое секвенирование

Мобильные элементы являются неотъемлемой частью эукариотических геномов. У растений эти элементы могут представлять значительную часть генома, выполняя структурную функцию, а их транспозиционная активность все чаще рассматривается как источник адаптивной и эволюционной изменчивости [2]. Ретротранспозоны являются одним из основных классов мобильных элементов растений, размножение которых проходит многоступенчатый жизненный цикл, включающий транскрипцию, трансляцию, сборку вирусоподобных частиц, обратную транскрипцию и интеграцию синтезированной кДНК (рис. 1).

Ввиду мутагенного потенциала экспрессия значительной части активных ретротранспозонов может быть прервана на различных этапах жизненного цикла системой многоуровневого сайленсинга. В то же время известны случаи релаксации транспозон-

направленного сайленсинга в пределах конкретной ткани или на определенных стадиях развития растений [3, 4]. Кроме того, известны представители мобилома, обладающие стресс-индуцируемой экспрессией [5]. Так, например, у *S. lycopersicum* детально изучена экспрессия всего двух МЭ, к настоящему времени демонстрирующих свою активность – элемент *Rider*, обладающий конститутивной экспрессией [6], а также элемент *FIRE*, экспрессирующийся в плодах [7]. Помимо размера и сложности структуры большинства геномов культурных растений, лимитирующим фактором для изучения активного мобилома растений является множество уровней сайленсинга и динамичность его проявления. Следовательно, для решения подобной задачи требуется не только поиск и/или создание условий возможной экспрессии МЭ, но и применение высокопроизводительных методов анализа.

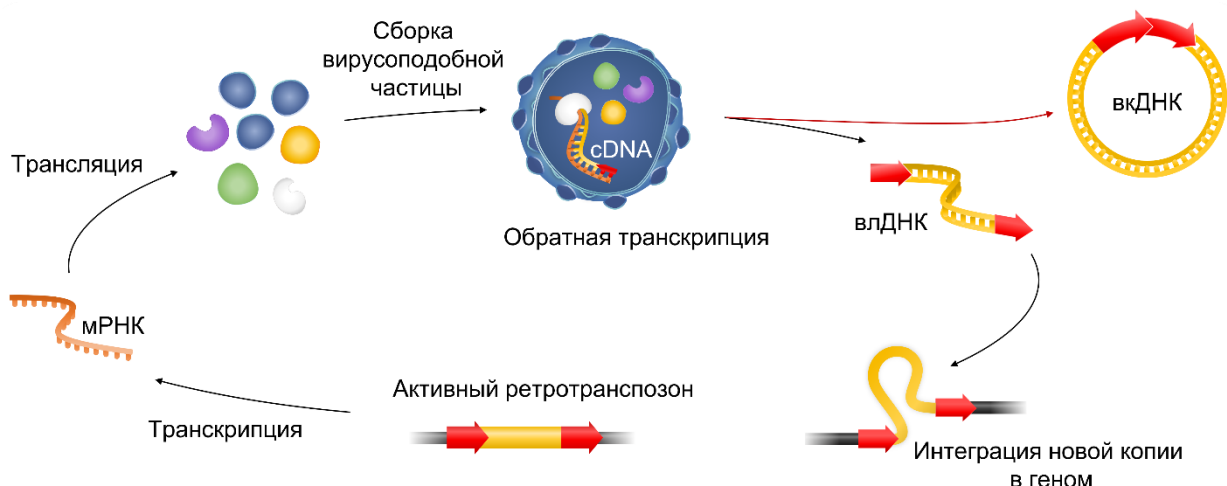


Рисунок 1. Жизненный цикл ретротранспозонов: влДНК – внехромосомная линейная ДНК, вкДНК – внехромосомная кольцевая ДНК

Одним из подобных подходов, позволяющих проводить анализ динамики и структуры активного мобилома растений, является секвенирование внехромосомных кольцевых форм ДНК (вкДНК) – метод Mobilome-seq [8]. Известно, что вкДНК могут образовываться как побочный продукт активности ретротранспозонов в результате циркуляризации внехромосомной линейной ДНК путем гомологичной рекомбинации и нехомологичного соединения концов [9].

В нашем исследовании было проведено нанопоровое секвенирование вкДНК растений *S. lycopersicum*, выращенных в присутствии соединений-ингибиторов компонентов систем сайленсинга мобильных элементов (эпигенетический стресс) в комбинации с обработкой тепловым стрессом. При картировании полученных прочтений нами было выявлено множество полиморфизмов, отсутствующих в геномных последовательностях МЭ *S. lycopersicum*. Кроме того, для LTR отдельной группы продуцирующих вкДНК элементов покрытие отсутствовало, что позволило нам сделать предположение о том, что данные элементы отсутствуют в геномной сборке SL 3.0. Проведя картирование последовательности LTR данных элементов, мы обнаружили значительное совпадение с последовательностями генома дикого вида томата *S. peruvianum*. Проведя выравнивание полноразмерных последовательностей обнаруженных нами элементов, мы обнаружили высокое сходство с последовательностями 9-ой хромосомы геномной сборки *S. lycopersicum* cv. Moneyberg-TMV. Данный сорт был получен путём скрещивания культурного томата Moneyberg и *S. peruvianum* для введения локусов устойчивости к вирусу табачной мозаики, что повлекло за собой возникновение крупной интрогрессии на 9-ой хромосоме [10].

Известно, что в результате интрогрессии может происходить реактивация мобильных элементов растения-реципиента [11], однако случаи введения

новых активных элементов в результате отдаленной гибридизации к настоящему времени не описаны. Дальнейший анализ позволит установить последствия интрогрессии активных МЭ для генома растения-реципиента на примере *S. lycopersicum*.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации (грант МК-47.2022.5).

Список литературы

1. The impact of transposable elements on tomato diversity / M. Dominguez, E. Dugas, M. Bouchouaia [et al.] // Nat Commun. 2020. Vol. 11. № 1. P. 4058.
2. LTR-retrotransposons in plants: Engines of evolution / L. Galindo-Gonzalez, C. Mhiri, M.K. Deyholos, M.A. Grandbastien // Gene. 2017. Vol. 626. PP. 14-25.
3. Martinez G., Slotkin R.K. Developmental relaxation of transposable element silencing in plants: functional or byproduct? // Curr Opin Plant Biol. 2012. Vol. 15. № 5. PP. 496-502.
4. Retrotransposon BARE displays strong tissue-specific differences in expression / M. Jaaskelainen, W. Chang, C. Moisy, A.H. Schulman // New Phytol. 2013. Vol. 200. № 4. PP. 1000-8.
5. How a retrotransposon exploits the plant's heat stress response for its activation / V.V. Cavrak, N. Lettner, S. Jamge [et al.] // PLoS Genet. 2014. Vol. 10. № 1. P. e1004115.
6. Environmental and epigenetic regulation of Rider retrotransposons in tomato / M. Benoit, H.G. Drost, M. Catoni [et al.] // PLoS Genet. 2019. Vol. 15. № 9. P. e1008370.
7. Wang L., Kim E.Y., Cho J. High-Throughput Profiling of Extrachromosomal Linear DNAs of Long Terminal Repeat Retrotransposons by ALE-seq // Methods Mol Biol. 2021. Vol. 2250. PP. 103-110.

8. Sequencing the extrachromosomal circular mobilome reveals retrotransposon activity in plants / *S. Lanciano, M.C. Carpentier, C. Llauro [et al.] // PLoS Genet.* 2017. Vol. 13. № 2. P. e1006630.

9. Formation of Extrachromosomal Circular DNA from Long Terminal Repeats of Retrotransposons in *Saccharomyces cerevisiae* / *H.D. Moller, C.E. Larsen, L. Parsons [et al.] // G3 (Bethesda).* 2015. Vol. 6. № 2. PP. 453-62.

10. A chromosome scale tomato genome built from complementary PacBio and Nanopore sequences alone reveals extensive linkage drag during breeding / *W.M.J. Van Rens, M.H. Schmidt, S. Effgen [et al.] // Plant J.* 2022. Vol. 110. № 2. PP. 572-588.

11. Mobilized retrotransposon Tos17 of rice by alien DNA introgression transposes into genes and causes structural and methylation alterations of a flanking genomic region / *F.P. Han, Z.L. Liu, M. Tan [et al.] // Hereditas.* 2004. Vol. 141. № 3. C. 243-51.

ACTIVE RETROTRANSPOSONS OF *SOLANUM LYCOPERSICUM* AND THEIR ORIGIN

Merkulov P.Yu.^{1,2,a}, Serganova M.A.², Petrov G.A.², Kirov I.V.^{1,2}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701*

² *All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550*
e-mail: ^a *paulmerkulov97@gmail.com*

Transposable elements (TEs) have significantly influenced the diversification of tomato and also formed many valuable traits for breeding [1]. However, an extremely small number of *S. lycopersicum* retrotransposons demonstrating transposition activity have been studied in detail. In this study, we performed nanopore sequencing of extrachromosomal circular DNA (eccDNA) isolated from *S. lycopersicum* plants subjected to a combination of epigenetic and heat stress. As a result, we detected previously undescribed retrotransposons actively producing eccDNA. Interestingly, the presence of these active TEs in our studied genome is the result of introgression of the DNA material from wild tomato species. Further analysis will allow us to establish the consequences of introgression of active TEs for the recipient plant genome using *S. lycopersicum* as example.

Keywords: *tomato, mobilome, retrotransposons, extrachromosomal DNA, methods, nanopore sequencing*

In our study we performed nanopore sequencing of eccDNA isolated from *S. lycopersicum* plants grown in the presence of compounds that are inhibitors of components of TE silencing systems (epigenetic stress) in combination with heat stress treatment. When mapping the obtained reads, we identified many polymorphisms that were absent in the genomic sequences of *S. lycopersicum* TEs. In addition, there was no coverage for the LTRs of a group of eccDNA-producing elements, which led us to assume that these elements are not present in the SL 3.0 genome assembly. By mapping the LTR sequence of these elements, we found a significant match with the genome sequences of the wild tomato species *S. peruvianum*. After aligning the full-length sequences of these elements, we found high similarity with the chromosome 9 of the *S. lycopersicum* cv.

Moneyberg-TMV genome assembly. This variety was obtained by crossing the cultivated tomato Moneyberg and *S. peruvianum* to introduce resistance loci to the tobacco mosaic virus, which resulted in the occurrence of large introgression on chromosome 9 [10].

It is known that as a result of introgression, reactivation of mobile elements of the recipient plant can occur [11], however, cases of the introduction of new active elements as a result of distant hybridization have not been described to date. Further analysis will allow us to establish the consequences of introgression of active TEs for the genome of the recipient plant using *S. lycopersicum* as example.

ISSR-МАРКЕРНЫЙ АНАЛИЗ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОРТОВ РЫЖИКА ПОСЕВНОГО

Минина Е.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр лубяных культур»,
170041, г. Тверь, Комсомольский пр-кт, д. 17/5, Российская Федерация

e-mail: ev.smirnova@fncl.ru

Рыжик посевной (*Camelina sativa* L.) в последние годы приобретает все большую популярность среди масличных культур, так как обладает уникальными особенностями – приспособленностью к различным условиям произрастания и ценным составом масла. Изучение его генетического разнообразия становится одним из важных вопросов для селекционеров. Эффективным методом генетического исследования является молекулярное маркирование. В данной работе была изучена генетическая изменчивость 18 сортов рыжика посевного с помощью ISSR-маркеров и построена дендрограмма генетического подобия. Использованная маркерная система позволила установить высокий уровень генетического разнообразия выбранных сортов и провести их классификацию по географическому происхождению.

Ключевые слова: рыжик посевной, генетическая изменчивость, молекулярные маркеры, ПЦР, ISSR

Рыжик посевной (*Camelina sativa* L.) – перспективная масличная культура комплексного использования. Семена рыжика содержат от 28 до 49 % масла [1, 2]. В его составе большое количество полиненасыщенных жирных кислот, а также биологически активных веществ (токоферолы, фитостерины, витамины и др.) [1, 3, 4]. Масло рыжика используется в лакокрасочной, мыловаренной промышленности, в животноводстве, парфюмерии и медицине [3]. В настоящее время интерес к возделыванию рыжика возрастает, поскольку культура обладает рядом достоинств: высокая урожайность, скороспелость, неприхотливость к различным почвенно-климатическим условиям [1].

Основой успешных селекционных исследований культурных растений являются знания о генетическом разнообразии сортов и эволюционных взаимоотношениях между ними. Изучение этих факторов на молекулярном уровне позволяет более точно провести отбор подходящих родительских пар в селекционном процессе, что имеет решающее значение при создании новых сортов с улучшенными характеристиками [5].

Для оценки генетического разнообразия растений используются различные системы молекулярных маркеров. Среди них достаточно эффективными и широко распространенными являются ISSR-маркеры (Inter Simple Sequence Repeat). Их применение основано на амплификации фрагментов ДНК, расположенных между областями идентичных, но противоположных микросателлитных повторов. ISSR-маркеры обладают более высокой полиморфностью и воспроизводимостью, а также простотой использования по сравнению с другими системами маркеров [6].

Целью данной работы является изучение генетической изменчивости сортов рыжика посевного с использованием системы молекулярных ISSR-маркеров.

Объектом исследования послужили 18 сортов рыжика посевного, включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации: Адамас, Адонис, Барон, Карат, Козырь, Пензяк, Передовик (озимые сорта); Велес, Вилла, ВНИИМК-520, Дебют, Екатерининский, Исилькулец, Кристалл, Омич, Ужурский, Чулымский, Юбиляр (яровые сорта).

Геномную ДНК выделяли при помощи модифицированного СТАВ-метода из листьев четырехдельных растений. Для исследования использовали объединенный образец ДНК из 8 растений, соответствующий конкретному сорту рыжика посевного. Для ISSR-маркирования был использован набор из 12 праймеров.

ПЦР проводилась в реакционной смеси объемом 25 мкл, состоящей из следующих компонентов: 2 единицы Tag-полимеразы, 2,5 мкл стандартного 10x буфера для ПЦР; 25 пМ праймера; 2,5 мМ MgCl₂; 0,25 мМ dNTP, 5 мкл геномной ДНК. Амплификацию проводили по стандартной для ISSR-метода программе. Продукты амплификации разделяли электрофорезом в 1,5 % агарозном геле в 1x TAE буфере. Определение длин фрагментов проводилось с использованием программы Quantity One в системе гель-документации Gel Doc XR («Bio-Rad», США). Для компьютерной обработки полученные результаты были представлены в виде матрицы бинарных данных. Для построения дендрограммы генетического подобия использовали программное обеспечение DARwin v. 6 (DARwin software).

В результате молекулярного исследования сортов рыжика посевного было выявлено наличие полиморфных фрагментов с использованием 10 праймеров. Между изученными сортами наблюдались различия по количеству ISSR-ампликонов. Некоторые из них оказались уникальными и характерными только для одного конкретного сорта рыжика. Молекулярный анализ озимых сортов Адамас, Карат, Пензяк и

Передовик выявил наличие множества фиксированных рецессивных локусов, что свидетельствует о более низкой генетической изменчивости этих сортов в отличие от других.

На основании матрицы состояний бинарных признаков была построена дендрограмма генетического подобия между изученными сортами рыжика посевного, которая изображена на рисунке 1.

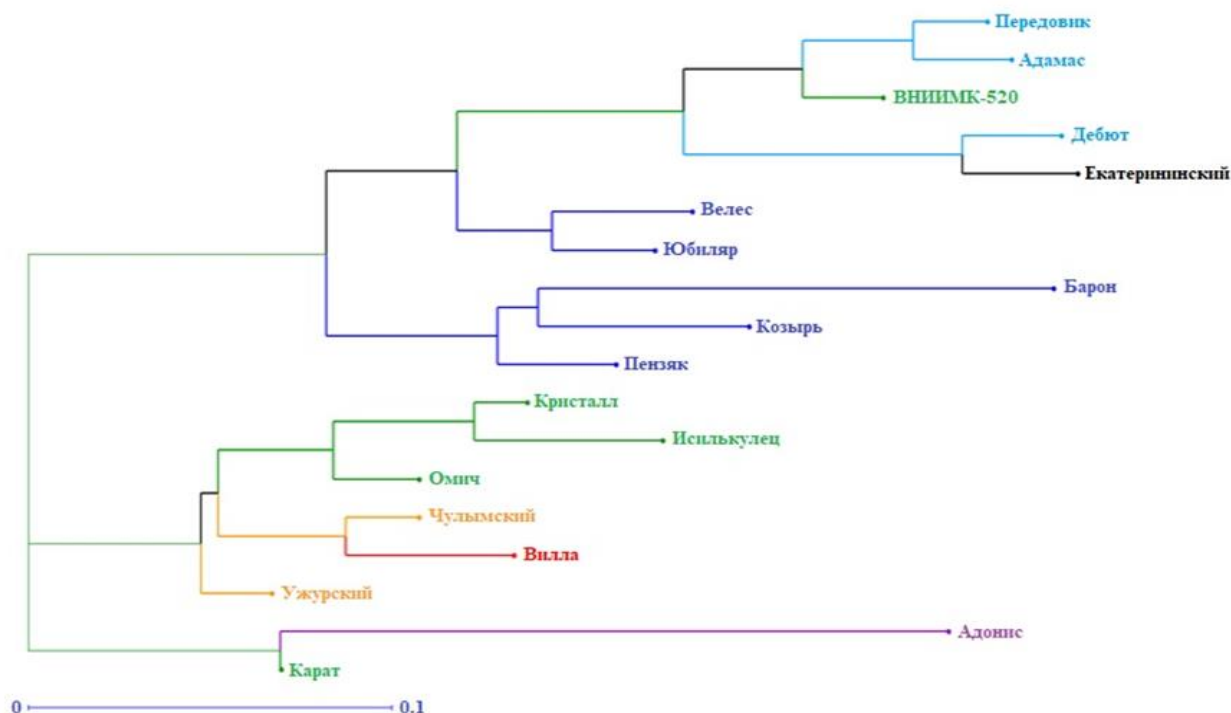


Рисунок 1. Дендрограмма генетического подобия сортов рыжика посевного

В результате построения дендрограммы генетического подобия исследуемые сорта рыжика посевного распределились на две географические группы. В первую группу вошли сорта Среднерусского типа – Передовик, Адамас, ВНИИМК-520, Дебют, Екатерининский, Велес, Юбилар, Барон, Козырь, Пензяк. Вторая группа включила в себя сорта рыжика Сибирского типа – Кристалл, Исилькулец, Омич, Чулымский, Вилла, Ужурский, Адонис, Карат.

Таким образом, применение молекулярных ISSR-маркеров позволило выявить высокий уровень полиморфизма исследованных сортов рыжика и дифференцировать сорта на основе географического происхождения. Полученные результаты указывают на возможность использования метода ISSR-маркирования для анализа генетической изменчивости и идентификации культуры рыжика посевного.

Список литературы

1. *Верхотурова Е.В., Вертоухов В.В.* Масличные культуры семейства Brassicaceae – перспективный источник биологически активных и незаменимых веществ // *Химия и технология растительных веществ:*

Тезисы докладов XII Всероссийской научной конференции с международным участием и школой молодых ученых. Киров, 2022. С. 32.

2. *Vollmann J., Eynck C.* Camelina as a sustainable oilseed crop: contributions of plant breeding and genetic engineering // *Biotechnology Journal.* 2015. Vol. 10. № 4. PP. 525-535.

3. Основы технологии возделывания рыжика посевного: практические рекомендации / *А.А. Смирнов [и др.]*. Пенза, 2013. 32 с.

4. Camelina an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe: a review / *F. Zanetti, B. Alberghini, A. Marjanović Jeromela [et al.]* // *Agron. Sustain. Dev.* 2021. Vol. 41. № 2.

5. *Salgotra R.K., Chauhan B.S.* Genetic diversity, conservation, and utilization of plant genetic resources // *Genes.* 2023. Vol. 14. № 1. P. 174.

6. *Amom T., Nongdam P.* The use of molecular marker methods in plants: a review // *International Journal of Current Research and Review.* 2017. Vol. 9. № 17. PP. 1-7.

ISSR-MARKER ANALYSIS OF GENETIC VARIABILITY OF VARIETIES OF CAMELINA

Minina E.V.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops»,
Komsomolsky prospect 17/56, Tver, Russian Federation, 170041
e-mail: ev.smirnova@fncl.ru

In recent years camelina (*Camelina sativa* L.) has become increasingly popular among oil crops because of its unique traits: adaptiveness to different growing conditions and valuable oil composition. The study of its genetic diversity becomes one of the important issues for plant breeders. Effective method of genetic research is molecular marking. The genetic variation of 18 varieties of camelina was studied using ISSR markers and a dendrogram of genetic similarity was constructed in this work. This marker system revealed a high level of genetic diversity of selected varieties and classified them according to geographical origin.

Keywords: camelina, genetic diversity, molecular markers, PCR, ISSR

Camelina (*Camelina sativa* L.) is a promising oil crop for complex use. Now interest for its cultivation is increasing, because camelina has a number of advantages: high yield, early ripening, easy growing in various soil and climatic conditions. Camelina sativa is a valuable source of vegetable oil; its content in seeds ranges from 28 to 49 %. Camelina oil contains a large amount of polyunsaturated fatty acids and biologically active substances (tocopherols, phytosterols, vitamins, etc.). In addition, camelina oil is successfully used in the paint-and-varnish, soap and animal industries, perfumery and medicine.

Knowledge of the genetic diversity of varieties and the evolutionary relationships between them is the foundation of successful plant breeding research. The study of these factors at the molecular level allows more accurate selection of suitable parental pairs in the selection process, which is crucial for creating new varieties with improved characteristics.

Various systems of molecular markers are used to assess the genetic diversity of plants. ISSR markers

(Inter Simple Sequence Repeat) are quite effective and widespread owing to higher polymorphism, reproducibility and usability compared to other marker systems.

The aim of this work is to study the genetic variability of 18 camelina varieties using a system of molecular ISSR markers. As a result of a molecular study the presence of polymorphic fragments was revealed using 10 primers. Differences in the number of ISSR amplicons were observed between the studied varieties. The dendrogram of genetic similarity was constructed based on the state matrix of binary features. The studied varieties of camelina were distributed into two geographical groups.

Thus, the use of molecular ISSR markers made it possible to identify a high level of polymorphism in the studied camelina varieties and to differentiate them depending on the geographic origin. The obtained results indicate the possibility of using the ISSR-marking method for the analysis of genetic variability and identification of the camelina culture.

УДК 576.8.06:636.083.37

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ КОРМОВЫХ ДОБАВОК ЭФИРНЫХ МАСЕЛ КОРИАНДРА ПОСЕВНОГО И ФЕНХЕЛЯ ОБЫКНОВЕННОГО НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОБИОТЫ РУБЦА ТЕЛЯТ В МОЛОЧНОМ ПЕРИОДЕ

Остренко К.С.^{1,а}, Овчарова А.Н.¹, Кутын И.В.¹, Невкрытая Н.В.²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста», 249013, Калужская обл., Боровский р-он, г. Боровск, п. Институт, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 295043, г. Симферополь, ул. Киевская, д.150, Российская Федерация

Целью исследования являлось разработка комплексной фитогенной кормовой добавки на основе фитогенов эфиромасличных культур – фенхеля обыкновенного (*Foeniculum vulgare*) и кориандра посевного (*Coriandrum sativum*) и оценка их влияния на формирование микробиоты у телят в молочном периоде. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что применение кормовых комплексов из эфирных масел кориандра посевного и фенхеля обыкновенного способствует формированию микробиоты рубца пробиотической направленности, а также повышает уровень защиты микробиома рубца и организма телят-молочников от негативных стресс-факторов, в частности, при состояниях, близких к гипераммониемии, причиной которых может стать повышенная доля патогенных микроорганизмов в ЖКТ, в первую очередь в рубце.

Ключевые слова: телята, микробиом, эфирные масла, кориандр посевной, фенхель обыкновенный

Традиционно антибиотики использовались в качестве метода борьбы с патогенами, и было показано, что они способствуют развитию рубца, улучшают продуктивность телят и снижают поносы и смертность телят. Опасения по поводу устойчивости к антибиотикам в целом побудили ВОЗ ограничить использование антибиотиков и полностью отказаться от использования в качестве стимуляторов роста у сельскохозяйственных животных. Таким образом, необходимо найти подходящие альтернативы антибиотикам, и одним из возможных решений может быть использование эфирных масел (ЭМ) в различных комбинациях (ЭОС) [1, 2].

Эфирные масла стали активной областью исследований благодаря их способности изменять метаболизм и рост бактерий. Одним из таких примеров является ингибирование роста *Escherichia coli*, часто встречающихся бактерий в пищеварительной системе жвачных животных. Кроме того, представлены данные, что раствор душицы обыкновенной может быть таким же эффективным, как неомицин, в предотвращении заболеваний и что ЭО ограничивает возможность развития спонтанной резистентности популяций бактерий, что делает их идеальным кандидатом для дальнейшего изучения [3, 4].

В международной литературе представлены данные о влиянии эфирных масел для стимуляции аппетита, интенсификации потребления стартерного корма у телят, повышение эффективности кормления и повышение приростов живой массы тела, а также увеличение количества полезных бактерий в кишечной флоре.

Лекарственные растения, содержащие эфирные масла, обладают большим потенциалом для комбинированной или альтернативной терапии респираторных заболеваний у крупного рогатого скота. ЭМ, такие как тимьян, эвкалипт, чайное дерево и равинтсара, уже используются некоторыми практикующими ветеринарами для лечения респираторных инфекций путем перорального, местного или ректального применения. ЭМ – это натуральные растительные продукты и сложные смеси летучих липофильных соединений, таких как монотерпены, сесквитерпены и/или фенилпропаноиды. В основном их получают путем перегонки воды или пара или механической

обработки растительного сырья. В пробирке методе скрининга антибактериальной активности эфирных масел можно использовать диффузию в агаровом диске, что обеспечивает доступный метод тестирования чувствительности эфирных масел в рутинной ветеринарной диагностике. Дисковая диффузия в агаре имеет недостатки из-за летучести и различной растворимости компонентов ЭМ в агаре [5, 6].

Целью исследования являлось разработка комплексной фитогенной кормовой добавки на основе фитогенов эфиромасличных культур – фенхеля обыкновенного (*Foeniculum vulgare*) и кориандра посевного (*Coriandrum sativum*) (с использованием сортов селекции ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» – НИИСХ Крыма) и изучения их влияния на формирование микробиоты у телят в молочном периоде.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на телятах молочного периода черно-пестрой породы, на базе вивария ВНИИФБИП животных.

Группы телят были сформированы по принципу парных аналогов. Было сформировано 4 группы телят молочников по принципу парных аналогов.

С 3 недельного возраста телятам опытных групп вводили в 3ЦМ по 10 мл на голову кормового комплекса на основе эфирных масел фенхеля обыкновенного (*Foeniculum vulgare*) и кориандра посевного (*Coriandrum sativum*) (с использованием сортов селекции «ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма» – НИИСХ Крыма).

Продолжительность исследования составляла 30 суток. Взвешивание телят проводили в начале (перед введением препарата) и по окончании опыта. Отбор проб рубцового содержимого проводили по завершении исследования (через 30 суток). Образцы рубцового содержимого были отобраны с помощью рубцового зонда.

Выделение ДНК из рубцового содержимого проводили в лаборатории иммунобиотехнологии и микробиологии. Суммарную ДНК для проведения T-RFLP-анализа выделяли с использованием набора «Genomic DNA Purification Kit» («Fermentas», Литва).

Схема исследований

Группа	Голов в группе	Характеристика кормления
Научно опыт на телятах молочниках – 30 суток		
1 – опытная	10	ОР +10 мл эмульсии соотношения масел фенхеля и кориандра в липосомах (70*30 %)
2 – опытная	10	ОР +10 мл эмульсии соотношения масел фенхеля и кориандра в липосомах (50*50 %)
3 – опытная	10	ОР +10 мл эмульсии соотношения масел фенхеля и кориандра в липосомах (30*70 %)
4 – контрольная	10	Основной Рацион (ОР) на голову

Определение микробиома рубцового содержимого с использованием метода T-RFLP делали с участием сотрудников и на оборудовании ООО «Биотроф +».

Аmplификацию ДНК для проведения T-RFLP-анализа проводили с применением прибора Verity («Life Technologies, Inc.», США). T-RFLP-анализ проводили с помощью прибора Beckman Coulter CEQ-8000 Analyzer (США).

Статистическая обработка

Полученные цифровые данные обработаны методом вариационной статистики. Для выявления

статистически значимых различий использован критерий Стьюдента по Н.А. Плохинскому (191). Использовали офисного программный комплекс «Microsoft Office» с программой «Excel» («Microsoft», США). Результаты считали достоверными, начиная со значения $p < 0,05$.

Результаты исследований

Результаты T-RFLP-анализа бактериального сообщества телят опытной и контрольной групп представлены в таблице 2.

Таблица 2

Общее содержание микробиоты в рубце телят опытных и контрольной групп, %
($M \pm m$, $n=10$)

	1 группа	2 группа	3 группа	Контроль
Селеномонады, вейлонеллы	9,90 ± 2,36	9,98 ± 2,16	10,30 ± 2,18	9,88 ± 1,44
Целлюлозолитики	30,08 ± 3,05*	32,08 ± 3,12*	35,08 ± 3,00*	18,77 ± 1,54
Бифидобактерии	0,94 ± 0,45*	1,44 ± 0,65*	1,64 ± 0,35*	0,69 ± 0,22
Бациллы	21,85 ± 6,00	22,45 ± 5,24	22,88 ± 4,15	20,41 ± 2,44
Актинобактерии	5,74 ± 2,23*	5,74 ± 2,13*	4,74 ± 2,13*	10,20 ± 1,47
Энтеробактерии	4,26 ± 0,93*	4,26 ± 0,83*	3,11 ± 0,87*	5,67 ± 0,81
Лактобациллы	2,29 ± 0,84*	2,59 ± 0,74*	2,99 ± 0,91*	5,01 ± 2,22
Микоплазмы	2,10 ± 0,75	1,7 ± 0,85	1,6 ± 0,77	2,93 ± 0,25
Стафилококки	1,01 ± 0,47	0,71 ± 0,52	0,91 ± 0,45	1,00 ± 0,20
Фузобактерии	2,42 ± 0,78*	1,42 ± 0,73*	1,28 ± 0,62*	2,41 ± 0,69
Пептококки	0,79 ± 0,37	0,74 ± 0,29	0,69 ± 0,35	0,41 ± 0,19
Кампилобактерии	0,53 ± 0,20*	0,53 ± 0,25*	0,73 ± 0,22*	0,20 ± 0,13
Псевдомонады	2,48 ± 0,45*	1,48 ± 0,46*	1,18 ± 0,41	1,25 ± 0,40
Пастереллы	1,46 ± 0,61*	1,43 ± 0,67*	1,44 ± 0,57*	3,19 ± 0,93
Некультивируемые бактерии	14,75 ± 3,33	12,75 ± 3,17	10,95 ± 3,13	13,10 ± 3,45

* – $p < 0,05$

Целлюлозолитические бактерии – доминирующие бактерии рубца жвачных животных, расщепляющие клетчатку растительных кормов до летучих жирных кислот (ЛЖК). В рубцовом содержимом

исследованных телят в основном были представлены семействами бактерий: *Clostridiaceae*, *Prevotellaceae*, *Eubacteriaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, а также представителями филума *Bacteroidetes*.

Одним из признаков, описывающих у жвачных животных микробиоценоз «взрослого типа», является его способность к расщеплению целлюлозы. Результаты анализа показали, что в рубце телят двухмесячного возраста уже наблюдается значительное количество бактерий, участвующих в процессах ферментации целлюлозы до ЛЖК.

Общее содержание целлюлозолитических бактерий у животных контрольной группы было на нижнем уровне нормы для соответствующего возраста, а у телят опытных групп - почти в полтора-два раза выше.

Бифидобактерии и бациллы в пищеварительном тракте проявляют следующие свойства: антимикробная, иммуномодулирующая активности, синтез витаминов, синтез некоторых незаменимых аминокислот, защищают организм от угроз со стороны патогенной и условно-патогенной микрофлоры. Содержание бифидобактерий в контрольной группе было значительно ниже соответствующих показателей по сравнению с телятами опытных групп. Наибольшее количество пробиотической микрофлоры было достоверно выше у телят 3 опытной группы, где применяли смесь эфирных масел кориандра посевного и фенхеля обыкновенного в соотношении 70*30 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект 23-16-00052.

Заключение

Исходя из полученных нами данных, можно сделать вывод о том, что применение кормовых комплексов из эфирных масел кориандра посевного и фенхеля обыкновенно способствует формированию микробиоты рубца пробиотической направленности, а также повышает уровень защиты микробиома рубца и организма телят-молочников от негативных

стресс-факторов, в частности, при состояниях, близких к гипераммониемии, причиной которых может стать повышенная доля патогенных микроорганизмов в ЖКТ, в первую очередь в рубце.

Список литературы

1. База данных молекулярно-генетических исследований, Mg-rast. doi: <http://www.mcs.anl.gov/project/mg-rast-metagenomics-rast-server>.

2. Ильина Л.А. Изучение микрофлоры рубца крупного рогатого скота на основе молекулярно-биологического метода T-RFLP с целью разработки способов ее оптимизации: дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2012. 197 с.

3. Latack B.C., Carvalho P.H.V., Zinn R.A. The interaction of feeding an eubiotic blend of essential oils plus 25-hydroxy-vit-D3 on performance, carcass characteristics, and dietary energetics of calf-fed Holstein steers // *Front Vet Sci*. 2022. Vol. 9. P.1032532. doi: 10.3389/fvets.2022.1032532.

4. Calf starter containing a blend of essential oils and prebiotics affects the growth performance of Holstein calves / T. Liu, H. Chen, Y. Bai [et al.] // *J Dairy Sci*. 2020. Vol. 103. № 3. PP. 2315-2323. doi: 10.3168/jds.2019-16647.

5. Feeding Essential Oils to Neonatal Holstein Dairy Calves Results in Increased Ruminant Prevotellaceae Abundance and Propionate Concentrations / P. Poudel [et al.] // *Microorganisms*. 2019. Vol. 7. № 5. P.120. doi: 10.3390/microorganisms7050120.

6. Ruminant nutrition symposium: Use of genomics and transcriptomics to identify strategies to lower ruminant methanogenesis / T.A. McAllister, S.J. Meale, E. Valle [et al.] // *Journal of Animal Science*. 2015. Vol. 93. № 4. PP. 1431-1449.

EVALUATION OF THE EFFECT OF COMPLEX FEED ADDITIVES OF ESSENTIAL OILS OF CORIANDER AND FENNEL ON THE FORMATION OF MICROBIOTA OF CALVES' RUMEN IN THE DAIRY PERIOD

Ostrenko K.S.^{1,a}, Ovcharova A.N.¹, Kutysin I.V.¹, Nevkrytaya N.V.²

¹ All-Russian research Institute of Physiology, Biochemistry and Nutrition of Animals – Branch of the Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst, Borovsk, Institute, Kaluga region, Borovsky district, Russian Federation, 249013

² Federal State Budget Scientific Institution «Research Institute of Agriculture of Crimea», Kievskaya st. 150, Simferopol, Russian Federation, 295453

e-mail: ^a Ostrenkoks@gmail.com

The aim of the study was to develop a complex phyto-genic feed additive based on phyto-gens of essential oil crops – common fennel (*Foeniculum vulgare*) and coriander seed (*Coriandrum sativum*) and to evaluate their effect on the formation of microbiota in calves in the dairy period. Based on the data obtained, it can be concluded that the use of feed complexes from seed coriander and fennel essential oils usually contributes to the formation of a probiotic-oriented rumen microbiota, and also increases the level of protection of the rumen microbiome and the body of dairy calves from negative stress factors, in particular, in conditions close to hyperammonemia, the cause of which there may be an increased proportion of pathogenic microorganisms in the gastrointestinal tract, primarily in the rumen.

УДК 577.29

ТРАНСКРИПТОМНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЗЕРНОВКИ ЯРОВОЙ ТРИТИКАЛЕ

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

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений», 140150, Московская обл., г.о. Раменский, р.п. Быково, ул. Пограничная, д. 32, Российская Федерация

e-mail: ^а eynzeynkreyn@gmail.com

Был проведен комплексный транскриптомный анализ с использованием длинных прочтений кДНК и прямого секвенирования РНК на ранних (10 день после цветения), средних (15 день после цветения) и поздних (20 день после цветения) стадиях развития зерновок тритикале. Результаты показали, что 17 % (7 128) генов, экспрессирующихся во время развития зерновок, находились в областях геномов А, В и R тритикале, которые не были аннотированы в геномах пшеницы и ржи как транскрипционно активные. Было продемонстрировано, что днРНК составляют более 10 % транскриптома развивающихся зерновок тритикале, что свидетельствует об их различной роли в этом биологическом процессе. GO-анализ экспрессируемых генов выявил динамику транскриптома во время развития зерновок с контрастной картиной обогащения функциональных категорий между ранней и средней/поздней стадиями.

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

В настоящее время не все функции и эволюция генов в растениях, особенно тех, которые лежат в основе важных сельскохозяйственных признаков, достаточно изучены. Транскриптом растения имеет очень динамичную природу, со многими генами, экспрессируемыми в определенных пространственно-временных условиях [1]. Экспрессия отдельных транскриптов может различаться даже между временными точками, разделенными несколькими минутами. Соответственно, идентификация генов, экспрессируемых в геноме растения, напрямую зависит от ряда факторов, включая глубину секвенирования, количество различных образцов, используемых для выделения РНК, технологию секвенирования, качество сборки генома и т.д. [2].

Проблема идентификации генов, ассоциированных с функционально важными признаками в тритикале, являющейся полиплоидной формой с большим числом повторов, остается не изученной в полном объеме.

У злаковых культур наиболее перспективным для исследования является процесс формирования зерновки, но в то же время данный показатель характеризуется высокой сложностью и динамичностью. Он включает в себя различные физиологические, биохимические и транскриптомные изменения.

Общий анализ транскриптома развивающихся зерновок показывает, что большая часть транскриптов, связанных с синтезом основных компонентов зерна, экспрессируется на 10-е сутки после цветения, в том числе запасные белки и крахмал. Общее же количество транскриптов снижается на 30-е сутки после цветения, однако повышается их разнообразие с увеличением экспрессии генов, которые относятся к защите семян от различных абиотических и биотических стрессовых факторов, и устойчивости к ним [3].

Стоит отметить, что геном тритикале содержит более 80 % повторяющихся последовательностей, из которых 70 % являются ретроэлементами. И, соответственно, учитывая динамичность транскриптома, необходимо выявлять информацию о неаннотированных генах на разных стадиях развития зерновки, часть из которых представлены белок-некодирующими генами [4].

Долгое время считалось, что нкРНК не выходят за рамки транскрипционного шума, однако появляется все больше информации о том, что нкРНК играют важную роль в разнообразных биологических процессах у эукариот. Традиционно под нкРНК подразумевают некодирующие белки, хотя многие из них несут небольшие открытые рамки считывания и кодируют функциональные пептиды в различных растениях [5].

В растениях днРНК были функционально охарактеризованы как участвующие в таких процессах, как время цветения, органогенез корней, реакции на биотические и абиотические факторы стресса [6]. Некоторые исследования даже показывают связь этих генов с развитием колосьев на основе данных RNA-seq [7]. На сегодняшний момент имеется информация о транскриптомных изменениях во время развития зерна пшеницы и многие гены были аннотированы, во время как днРНК остаются неисследованными.

Для нашего анализа помимо времяспецифичности развития зерновки, мы учли и их тканеспецифичность, поэтому каждая зерновка была разделена на эндосперм и зародыш. Выделенную тотальную РНК из зерновок подвергали синтезу полноразмерной двуцепочечной кДНК.

Прочтения из каждого образца были сопоставлены с геномом ABDR, полученным путем слияния геномов пшеницы IWGSC54 (ABD) и ржи Lo7 (R). Для этого исследования использовали гексаплоидную тритикале, обладающую только геномами ABR, однако последовательность D-генома была также включена для биоинформатического анализа, поскольку при селекции тритикале возможны интрогрессии генетического материала субгенома D в субгеномы ABR. Чтобы уменьшить артефакты, транскрипты, собранные для D-генома, не анализировали в этом исследовании.

Ввиду того, что развитие зерновок чрезвычайно динамичный процесс, включающий в себя несколько транскриптомных стадий, в данном исследовании было стремление расшифровать гены, которые уникально экспрессированы на ранней, средней и поздней стадиях развития зерновок. Были отфильтрованы гены по значениям их экспрессии, в результате чего был получен набор, состоящий из 6 057, 1 575 и 3 274 генов, специфически экспрессирующихся на ранней, средней и поздней стадиях соответственно.

Среди специфически экспрессирующихся на ранней стадии генов, в значительной мере представлены гены, участвующие в организации, упаковке и ремоделировании хроматина. Наиболее значительное обогащение было обнаружено для GOs, связанных с активностью ингибитора пептидазы и процессами катаболизма. Были обнаружены гены, кодирующие белки, расположенные в апопласте (поздняя стадия), и белки, являющиеся компонентами тилакоидной мембраны (средняя стадия), чрезмерно представлены в наборах генов средней/поздней стадии. Анализ обогащения GO показал, что транскриптомы ранней и средней/поздней стадий развития зерновок тритикале сильно отличаются с точки зрения экспрессируемых генов и их функций.

Так как зерновка тритикале содержит различные ткани, состоящие из двух основных частей: зародыша и эндосперма. В данном исследовании стремились обнаружить различия между наборами генов, экспрессирующихся в этих частях. Было определено, что 11 250 генов экспрессировались во всех образцах. Кроме того, было обнаружено 1 604, 2 238 и 903

гена, которые экспрессировались в эндосперме 15 и 20 дни после цветения и в обоих образцах соответственно. Эти гены не имели экспрессии в образцах эндосперм и зародыш, что позволяет предположить, что они могут отражать транскриптом зародыша на стадиях развития на 15 и 20 день после цветения.

В соответствии с последней аннотацией геномов A, B (IWGS54) и R (Lo7) были определены гены, расположенные в межгеномном пространстве. Гены классифицировались как ранее неаннотированные, если они не демонстрировали совпадений с аннотированными генами. Было идентифицировано 7 128 (17,6 %) генов как ранее неаннотированные гены. Из них 2 552, 3 195 и 2 078 генов были расположены в геномах A, B, и R соответственно.

Чтобы оценить влияние длинных некодирующих РНК (lncRNAs) на развитие исходного транскриптома, транскрипты классифицировали на основе их потенциала кодирования белка. В общей сложности было идентифицировано 4 672 гена. Проверка lncRNAs в аннотированных и неаннотированных наборах транскриптов показала, что 3 174 были транскрибированы из аннотированных, а 1523 lncRNA – неаннотированных генов. Сравнение доли генов, кодирующих lncRNA продемонстрировало, что lncRNA чрезмерно представлены среди генов, экспрессирующихся в зародыше на 15 день после цветения по сравнению с 20 днем после цветения.

Проведенное исследование предоставляет ценную информацию для улучшения аннотации генома, выяснения функциональных характеристик развивающегося транскриптома зерновок и поиска новых целей для анализа ассоциаций между геномными вариантами и фенотипическими признаками. Полученные данные о пространственно-временном профиле экспрессии генов во время развития зерновок будут полезны для генетического улучшения тритикале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (№ GUM-2022-005).

Список литературы

1. Rangan P., Furtado A., Henry R.J. The transcriptome of the developing grain: a resource for understanding seed development and the molecular control of the functional and nutritional properties of wheat // BMC genomics. 2017. – Vol. 18. № 1. PP. 1-9.
2. Survey of high throughput RNA-Seq data reveals potential roles for lncRNAs during development and stress response in bread wheat / S. Sharma [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2017. Vol. 8. P. 1019.
3. Identification and characterization of long non-coding RNAs regulating resistant starch biosynthesis in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) / A. Madhawan [et al.] // Genomics. 2020. Vol. 112. № 5. PP. 3065-3074.
4. Ma L., Bajic V.B., Zhang Z. On the classification of long non-coding RNAs // RNA biology. 2013. Vol. 10. № 6. PP. 924-933.

5. Chekanova J.A. Long non-coding RNAs and their functions in plants // Current opinion in plant biology. 2015. Vol. 27. PP. 207-216.

6. Nanopore RNA sequencing revealed long non-coding and LTR retrotransposon-related RNAs

expressed at early stages of triticales SEED development / I. Kirov [et al.] // Plants. 2020. Vol. 9. № 12. P. 1794.

7. RNA-Seq analysis of rice roots reveals the involvement of post-transcriptional region in response to cadmium stress / F. He [et al.] // Frontiers in plant science. 2015. Vol. 6. P. 1136.

TRANSCRIPTOMIC ANALYSIS OF GRAIN DEVELOPMENT IN SPRING TRITICALE

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

¹All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

²Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

³All-Russian Plant Quarantine Centre, Pogranichnaya st. 32, Ramenskii, Bykovo, Moscow region, Russian Federation, 140150

e-mail: ^aeynzeynkrey@gmail.com

A comprehensive transcriptome analysis using long cDNA reads and direct RNA sequencing was carried out at early (10 days after flowering), middle (15 days after flowering) and late (20 days after flowering) developmental stages of triticales grains. The results showed that 17 % (7,128) of the genes expressed during grain development were located in regions of the A, B, and R genomes of triticales that were not annotated as transcriptionally active in the wheat and rye genomes. It was demonstrated that lncRNAs accounted for more than 10 % of the transcriptome of developing triticales grains, indicating their different roles in this biological process. GO analysis of expressed genes revealed the dynamics of the transcriptome during grain development with a contrasting pattern of enrichment of functional categories between early and mid/late stages.

Keywords: transcriptome, long non-coding RNAs (lncRNAs), developing grain, Nanopore sequencing, triticales

Currently, not all functions and evolution of genes in plants, especially those underlying key agricultural traits, are sufficiently understood. Plant transcriptomes are highly dynamic, with many genes expressed under specific spatial- and time-specific conditions. The expression of transcripts can vary between time points separated by a few minutes. Accordingly, the identification of genes expressed in the plant genome is directly dependent on a number of factors including sequencing depth, number of different samples used for RNA isolation, sequencing technology, quality of genome assembly, etc.

A general analysis of the transcriptome of developing grains shows that most of the transcripts associated with the synthesis of major grain components are expressed on the 10 DPA, including spare proteins and starch. The total number of transcripts decreases on the 30 DPA, but their diversity increases with an increase in the expression of genes related to seed defense

against various abiotic and biotic stress factors and resistance to them.

To date, information on transcriptomic changes during wheat grain development is available and many genes have been annotated, while lncRNAs remain unexplored.

Due to the fact that grain development is an extremely dynamic process involving multiple transcriptomic stages, this study sought to decipher genes that are uniquely expressed during the early, middle, and late stages of grain development. Genes were filtered by their expression values, resulting in a set of 6,057, 1,575, and 3,274 genes specifically expressed at early, middle, and late stages, respectively. Validation of lncRNAs in the annotated and unannotated transcript sets showed that 3,174 were transcribed from annotated and 1,523 lncRNAs from unannotated genes.

This research was funded by the Ministry of Education and Science of Russian Federation (No FGUM-2022-005).

ANALYSIS OF PROTEIN DOMAIN ARCHITECTURE, EVOLUTION AND CELLULAR LOCALIZATION OF *ARABIDOPSIS* DOMESTICATED GAG PROTEIN

Polkhovskiy A.V.^{1,2,a}, Eremina M.Yu.², Parygina A.D.², Kirov I.V.^{1,2}

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

²All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

e-mail: ^apolkhovsky.a.w@gmail.com

LTR retrotransposons (LTR-RTs) are mobile elements that occupy a significant portion of the genome in the most plant species. The LTR-RT life cycle is very similar to that of retroviruses and involves the assembly of a virus-like particle from GAG proteins, which interact and encapsulate LTR-RT RNA. In animal cells, this process takes place in special organelles, retrosomes. Whether retrosomes are present in a plant cell remains unclear. GAG proteins can be domesticated during evolution starting to perform a function that are beneficial to host. A one example of such domesticated GAG has recently been revealed in the genome of *Arabidopsis thaliana*. Comparative analysis of the wild-type GAG and the domesticated GAG (dGAG) has not been carried in plants.

To study the cellular localization of the GAG and dGAG protein in plants, we performed transient expression of GFP tagged (d)GAG in the cells of several plant species including *A. thaliana*, *Nicotiana benthamiana* and *Helianthus annuus*. We showed that the GAG protein forms protein aggregates with extranuclear localization while dGAG (domesticated GAG) protein can form both extranuclear and nuclear aggregates.

Our protein sequence and structure analysis showed that dGAG protein possesses KELP domain involved in transcription activation. Search for dGAG homologs in various other plant species revealed a number of dGAG orthologs with similar protein domain architecture in a broad range of plant species.

Ключевые слова: mobilome, LTR retrotransposons, fluorescent microscopy, protoplast transformation, protein architecture

Fluorescent microscopy of transformed *A. thaliana* protoplasts revealed presence of GAG [1] grain-like protein structures in cell cytoplasm. Regardless the position of GFP tag (N- or C- terminus) the manner of GAG protein localization remained the same. In case of the dGAG we could see the same picture for C-terminal GFP tag, but not for N-terminal – it shows nuclear localization pattern for dGAG protein. *In silico* analysis did not reveal presence of any NLSs in both genes, so in case of N-terminal tag, GFP might interfere with Zn-knuckle

domain of the dGAG which possibly promotes protein interaction with DNA or there might be non-canonical NLS at the C-terminus. Analysis of protein localization in other plant species (*N. benthamiana*, *H. annuus*) showed same results.

Analysis of dGAG protein domain architecture (performed by AlphaFold Protein Structure Database [2, 3]) revealed presence of previously unannotated p15 (PC4) protein domain between DEK-C and GAG domains (Fig. 1).

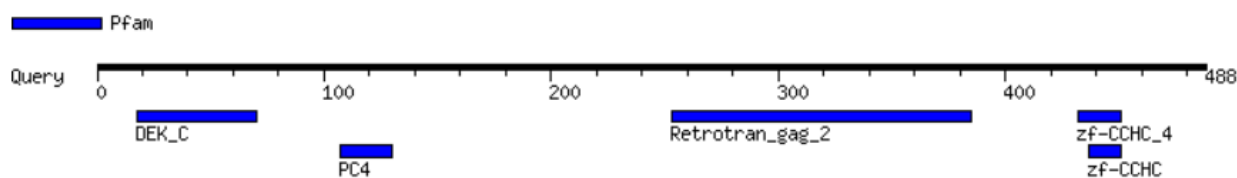


Figure 1. Schematic representation of dGAG protein domain architecture (GenomeNet MotifFinder)

DEK-C together with p15 forms amino acid sequence which shares high level of similarity with KELP transcription coactivator protein (AT4G10920). Proteins with similar domain architecture as well as high level of sequence similarity were found in various plant species (including Poaceae, Asteraceae, Solanaceae,

Phaseoleae and other). We presume that GAG and KELP were fused together with further creation of newly domesticated dGAG gene on early stages of plant evolution. Knowing various other examples of retroviral protein domestication, including GAG [4, 5], and their anti-pathogen activity as well as KELP protein ability to bind

viral proteins [6], we presume that dGAG protein may contribute in host response to pathogen (viral) response.

This research was funded by the Russian Science Foundation (grant No 22-74-10055).

References

1. Epigenetic Stress and Long-Read cDNA Sequencing of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Revealed the Origin of the Plant Retrotranscriptome / I.V. Kirov [et al.] // Plants. 2022. Vol. 11. P. 3579. <https://doi.org/10.3390/plants11243579>.

2. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold / J. Jumper [et al.] // Nature. 2021. Vol. 596. PP. 583-589.

3. AlphaFold Protein Structure Database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models / M. Varadi [et al.] // Nucleic Acids Research. 2022. Vol. 50. D439-D444.

4. Jangam D., Feschotte C., Betrán E. Transposable Element Domestication As an Adaptation to Evolutionary Conflicts / Trends Genet. 2017. Vol. 33(11). PP. 817-831. doi: 10.1016/j.tig.2017.07.011.

5. Domesticated retroviral GAG gene in Drosophila: New functions for an old gene / L.N. Nefedova, I.V. Kuzmin, P.A. Makhnovskii, A.I. Kim. // Virology. 2014. Vol. 450-451. PP. 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2013.12.024>.

6. The Tomato Mosaic Tobamovirus Movement Protein Interacts with a Putative Transcriptional Coactivator KELP / Y. Matsushita [et al.] // Mol. Cells. 2001. Vol. 12. PP. 57-66.

УДК 579.253.2: 615.011.4

АНАЛИЗ МОБИЛЬНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗОЛЯТАХ БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ПРИ ВЕТЕРИНАРНОМ МОНИТОРИНГЕ РЕЗИСТЕНТНОСТИ

Пырников А.С.^а, Крылова Е.В., Солтынская И.В., Гордеева В.Д., Прасолова О.В., Иванова О.Е.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский государственный центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов», 123022, г. Москва, Звенигородское шоссе, д. 5, Российская Федерация
e-mail: ^а a.pyrnikov@vgnki.ru*

Молекулярно-генетические исследования изолятов бактерий направлены на поиск мобильных элементов, которые в том числе способствуют распространению генов антибиотикорезистентности. Данные полногеномного секвенирования позволяют выявить не только факт наличия генов резистентности, но и установить их локализацию в составе мобильных элементах – плаزمидов, транспозон, интегрон или генных каскадах, выявить их структуру и особенности.

Ключевые слова: полногеномное секвенирование, бактерии, антибиотикорезистентность

Мобильные генетические элементы (МГЭ) были открыты в конце 1940-х годов прошлого века американским цитогенетиком Барбарой Мак-Клинтон, за что в 1983 году она была удостоена Нобелевской премии. МГЭ представляют собой последовательности ДНК, которые могут перемещаться, копироваться и включаться в другие сайты генома за счет горизонтального переноса генов. МГЭ представлены плазмидами, транспозонами, интегронами, генными каскадами и др. Все перечисленные элементы являются важными структурами, участвующими в горизонтальном переносе генов и обеспечивающими передачу генетической информации между бактериями [1]. Приобретенные чужеродные элементы ДНК часто кодируют гены, которые могут глубоко влиять на приспособленность, устойчивость к противомикробным

препаратам (AMR), образ жизни бактерии и, следовательно, играют одну из ключевых ролей в эволюции бактерий [2].

Полногеномное секвенирование позволяет провести точную таксономическую и/или штаммовую идентификацию микроорганизмов с определением сиквенс-типов, функциональную аннотацию генов и филогенетический анализ геномов различными способами, выявить наличие генетических детерминант резистентности.

В работе был проведен биоинформатический анализ данных полногеномного секвенирования изолятов бактерий *Salmonella enterica* и *Staphylococcus spp.*

Для анализа использовались следующие программы: FastQC 0.11.17, Trimmomatic v.0.36, SPAdes

2.11.1, QCAST 4.6.3, MAUVE v.20150226. Для определения видовой принадлежности бактерий (генотипирование) с использованием собранных контигов использовался метод поиска общих k-меров, реализованный в программе KmerFinder, а также метод мультилокусного типирования MLST на онлайн-сервисе Центра геномной эпидемиологии Датского технического университета. Поиск плазмидных контигов осуществлялся с помощью собственного алгоритма на языке Python 2.7. Для поиска интегронов была применена программа IntegronFinder v.5 с параметрами по умолчанию. Для поиска и характеристики мобильных генетических каскет *SCCmec* использовали программу *SCCmecFinder* 1.1.2 с параметрами: идентичность не менее 90 %, пересечение не менее 60 %.

В результате проведенной работы из 23 исследованных изолятов *Salmonella enterica* были выявлены 14 полирезистентных изолятов, содержащих rESI-подобную плазмиду, несущую в себе гены антибиотикостойчивости: blaCTX-M-14, tetA/tetR, tetM, aadA1, dfrA14, sul1 и др., некоторые гены – в составе интегронов. Были выявлены интегроны 1 и 2 классов. В состав каждого из интегронов входят обязательные элементы – сайт-специфичная интегразы Int, сайты рекомбинации attC и attI, а также каскеты с генами антибиотикорезистентности. Интегрон 1 класса содержал гены устойчивости к триметоприму dfrA, аминокликозидам aadA и к сульфаниламидам sul1. Интегрон 2 класса нес ген резистентности к триметоприму dfrA14. Следует отметить, что в плаزمидях выявлено от 2 до 4 инсерционных последовательностей IS26, способствующих гибкой адаптации бактериального генома к изменяющимся условиям окружающей среды. Плазмиды сходного генного состава ранее были обнаружены учеными в США, Европе, Израиле, Японии и Латинской Америке [3-8].

В работе так же было исследовано 17 изолятов бактерий рода *Staphylococcus*: 4 изолята *Staphylococcus haemolyticus* и 13 изолятов *Staphylococcus aureus*. Ни один из 17 изолятов *Staphylococcus spp.* не содержал гены *Int1*, *Int2*, а также сайты *attC*, характерные для интегронов. Дополнительный поиск интеграз среди аннотированных генов также подтвердил этот факт.

Поиск генных каскет показал, что среди 13 секвенированных *S. aureus* у 9 обнаружены каскета *SCCmec*, которая находится в бактериальной хромосоме и несет ген устойчивости к бета-лактамам *mecA* или его близкий гомолог *mecC*. Всего было выявлено два типа каскет: *SCCmec* type IVh [GenBank CP007659.1] и *SCCmec* type Vc (5C2&5) [GenBank AB505629.1]. Для первого типа характерны комплексы Class B *mec* и Type 2*ccr*, для второго – Class C2 *mec* и Type C1 *ccr*. Каскета *SCCmec* type IVh выявлена у одного изолята *S. aureus* с сиквенс-типом ST22, причем второй образец *S. aureus* с тем же сиквенс-типом такой каскеты не имел. Каскета *SCCmec* type Vc (5C2&5) выявлена у 8 стафилококков с сиквенс-типом ST398.

Использование полногеномного секвенирования позволило нам всестороннее охарактеризовать мультирезистентные штаммы бактерий, выделенные в рамках ветеринарного мониторинга, в том числе описать структуры, участвующие в горизонтальном переносе генов.

Мобильные элементы, несущие в своем составе гены резистентности, способствуют множественной устойчивости бактерий. Масштабные микробиологические и генетические исследования, а также постоянный обмен биоинформатическими данными, поможет контролировать распространение резистентных штаммов бактерий в ветеринарии и сельском хозяйстве.

Работа выполнена в рамках выполнения прикладных научных исследований в сфере деятельности Россельхознадзора по теме: «Ветеринарный мониторинг резистентности бактерий к антимикробным средствам».

Список литературы

1. Шмид Р. Наглядная биотехнология и генетическая инженерия / 3-е изд., пер. с нем. М.: Лаборатория знаний, 2019. 324 с.
2. A unique megaplasmid contributes to stress tolerance and pathogenicity of an emergent *Salmonella enterica* serovar Infantis strain / G. Aviv [et al.] // Environ. Microbiol. 2014. Vol. 16. № 4. PP. 977-994.
3. Emergence of a clonal lineage of multidrug-resistant ESBL-producing *Salmonella Infantis* transmitted from broilers and broiler meat to humans in Italy between 2011 and 2014 / A. Franco [et al.] // PLoS One. 2015. Vol. 10. P. 12.
4. *Salmonella enterica* serovar Infantis from food and human infections, Switzerland, 2010–2015: poultry-related multidrug resistant clones and an emerging esbl producing clonal lineage / D. Hindermann [et al.] // Front. Microbiol. 2017. Vol. 8. P. 1322.
5. Exploring poultry farm environment for antibiotic resistant *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., and *Staphylococcus* spp. having public health significance / M.J. Hossain [et al.] // Journal of the Bangladesh Agricultural University. 2020. Vol. 18. PP. 1-622.
6. Molecular epidemiology of the endemic multiresistance plasmid pSI54/04 of *Salmonella Infantis* in broiler and human population in Hungary / A. Szmolka [et al.] // Food Microbiol. 2018. Vol. 71. PP. 25-31.
7. Comparative analysis of extended spectrum beta-lactamase CTX-M-65-producing *Salmonella Infantis* isolates from humans, food animals, and retail chickens in the United States / H. Tate [et al.] // Antimicrob. Agents Chemother. 2017. Vol. 61. P. 7.
8. A novel subpopulation of *Salmonella enterica* serovar Infantis strains isolated from broiler chicken organs other than the gastrointestinal tract / E. Yokoyama [et al.] // Vet. Microbiol. 2015. Vol. 175. № 2-4. PP. 312-318.

IDENTIFICATION OF MOBILE GENETIC ELEMENTS IN BACTERIAL ISOLATES OBTAINED IN VETERINARY RESISTANCE MONITORING

Pyrsikov A.S.^a, Krylova E.V., Soltynskaya I.V., Gordeeva V.D., Prasolova O.V., Ivanova O.E.

*All-Russian State Centre for Quality and Standardisation of Veterinary Drugs and Feed,
Zvenigorodskoe shosse 5, Moscow, Russian Federation, 123022*

e-mail: ^a a.pyrnikov@vgnki.ru

Molecular genetic studies of bacterial isolates are aimed at searching for mobile elements, which contribute to the spread of antibiotic resistance genes as well. Full genome sequencing data allows to identify not only the presence of resistance genes but also their localization in mobile elements - plasmids, transposons, integrons or gene cassettes - to be detected and their structure and features to be revealed.

Keywords: *full genome sequencing, bacteria, antibiotic resistance*

Whole-genome sequencing allows accurate taxonomic and/or strain identification of microorganisms with determination of sequencing types, functional annotation of genes and phylogenetic analysis of genomes in different ways, revealing the presence of genetic determinants of resistance.

A bioinformatic analysis of full genome sequencing data of *Salmonella enterica* and *Staphylococcus spp.* bacterial isolates was performed in this work.

As a result of the work performed 14 multiresistant isolates of 23 studied *Salmonella enterica* isolates were found to contain a pESI-like plasmid carrying the following antibiotic resistance genes: blaCTX-M-14, tetA/tetR, tetM, aadA1, dfrA14, sul1, etc., some genes being part of the integrons. Class 1 and 2 intergrons were identified.

Seventeen isolates of *Staphylococcus spp.* were also studied: four isolates of *Staphylococcus haemolyticus* and 13 isolates of *Staphylococcus aureus*. None of the 17 isolates of *Staphylococcus spp.* contained Int1, Int2

genes, and attC sites characteristic of integrons. An additional search for integrases among the annotated genes also confirmed this fact.

The use of whole-genome sequencing allowed us to comprehensively characterize multiresistant bacterial strains isolated as part of veterinary monitoring, including the description of structures involved in horizontal gene transfer.

Mobile elements carrying resistance genes contribute to multiple resistance in bacteria. Large-scale microbiological and genetic studies, as well as the continuous exchange of bioinformatic data, will help to control the spread of resistant bacterial strains in veterinary medicine and agriculture.

The work was carried out as the part of the implementation of applied scientific research in the field of Rosselkhoznadzor on "Veterinary Monitoring of Bacterial Resistance to Antimicrobial Agents".

УДК 639

НОВЫЕ БИОТЕХНОЛОГИИ В РЫБОВОДСТВЕ И АКВАКУЛЬТУРЕ

Саркисян Д.С.^a, Кротова О.Е.^b

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет, 344003, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, Российская Федерация

e-mail: ^a juliasarkisyan16@yandex.ru, ^b alb9652@yandex.ru

В статье рассмотрены современные методы в области биотехнологий, применяемые в рыбоводстве и аквакультуре. Особое внимание уделяется разработке новых методов и технологий, направленных на оптимизацию процессов выращивания рыбы и повышения ее продуктивности. Обсуждена значимость развития новых биотехнологий для повышения эффективности и устойчивости рыбоводства и аквакультуры в условиях изменяющейся экосистемы.

Ключевые слова: *генная инженерия, биотехнология, аквакультура, новые методы, рыбоводство*

В последнее время сектор аквакультуры стал одним из самых динамично развивающихся отраслей в мире. Однако, рост производства рыбы и других водных организмов не всегда сопровождается усовершенствованием методов и технологий, используемых в этой сфере. В связи с этим, появляется необходимость поиска новых биотехнологических решений, которые позволят улучшить эффективность и рентабельность рыбоводства.

Среди методов современной биотехнологии выделяют следующие: гендерные, получение эмбриональных стволовых клеток, трансгенные, криоконсервация половых продуктов, протеомика, картирование геномов рыб.

Генетические технологии

Они могут быть использованы для получения новых пород рыб, которые были бы более устойчивыми к заболеваниям и другим неблагоприятным факторам окружающей среды. Также, генетические технологии позволяют ускорить процесс отбора животных с желаемыми качествами и повысить уровень генетической вариативности популяции.

Основой проведения генно-инженерных исследований является и молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты. При этом придерживаются такой последовательности: сначала выделяют гены из отдельных клеток или синтезируют их вне организма, потом включают новые гены в вектор (молекула ДНК, имеющая собственный аппарат репликации и способная поставлять в клетку необходимые гены и реплицировать их), соединяют ДНК гена и вектора и получают рекомбинантную ДНК; затем переносят определенные гены в геном хозяина, проводят их клонирование в составе вектора и получают генный продукт путем экспрессии чужеродного гена в реципиентной клетке [1].

Известны два способа выделения генов и создания рекомбинантной ДНК. Первый – с помощью химического синтеза, второй, более распространенный, с помощью особых ферментов (рестриктаз), которые имеют способность распознавать чужеродную ДНК, проникающую в организм и расщеплять ее в соответствующих участках. В результате создаются фрагменты разнообразных размеров по длине. Известны более 500 рестриктаз и каждая специфически

расщепляет ДНК. Они лишены всякой видовой специфичности. Благодаря этому можно объединять в одно целое фрагменты ДНК любого происхождения и преодолевать природные видовые барьеры [2].

Первыми генно-модифицированными (ГМ) рыбами стали радужная форель *Oncorhynchus mykiss* и серебряный карась *Carassius auratus gibelio* [3]. В настоящее время таких видов более 30, причем ГМО-группа включает как модельные организмы, так и объекты товарного выращивания [4].

Известны: трансгенная семга *Salmo salar*, кижуч *Oncorhynchus kisutch*, чавыча *O. tshawytscha*, лосось Кларка *O. clarkii clarkii*, тилапии (нильская *Oreochromis niloticus* и мозамбикская *O. mossambicus*), медака (рисовая рыбка) *Oryzias latipes*, карп *Cyprinus carpio*, канальный сомик *Ictalurus punctatus*, африканский сомик *Clarias gariepinus*, мешкожаберный сом *Heteropneustes fossilis*, караси – серебряный (золотая рыбка) и его подвид *Carassius auratus grandoculis*, а также золотой *C. carassius*, светлоперый (желтый) судак *Sander vitreus*, обыкновенная щука *Esox lucius*, амурский сом *Parasilurus asotus*, вьюны (обыкновенный *Misgurnus fossilis* и амурский *M. anguillicaudatus*), дорада *Sparus aurata*, красный пагр (красный морской карась) *Pagrus major*, лещ черный *Melanobrama amblycephala*, данио (дамский чулочек) *Brachydanio rerio*. В России исследования по введению ГМО в аквакультуру выполняются с представителями пяти видов. Получена рекомбинантная конструкция, обеспечивающая сайт-специфическую интеграцию гена зеленого флюоресцирующего белка (GFP), с помощью которой можно маркировать породы рыб [5].

Большая часть (65 %) ГМ рыб, используемых в этих экспериментах, представляют собой ценные объекты пресноводной (радужная форель, тилапия, карп и др.) и морской (семга, чавыча) аквакультуры [6]. Декоративные виды удобны как модельные формы в исследованиях структурно-функциональных изменений генома при встраивании генных конструкций (трансгенов), что необходимо для дальнейшего эффективного применения биотехнологических методов в промышленном рыбоводстве. В коммерческой аквариумистике под торговой маркой *GloFish* уже используется трансгенная рыбка данио, флюоресцирующая зеленым, красным или оранжевым цветом, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Генные конструкции, разработанные и репортированные в геном рыб семейства *Salmonidae* [7]

Целевой ген	Промоторная последовательность
<i>hgh</i> (гормон роста человека)	<i>mmt-1</i> (промотор гена металлотиионаина мыши)
<i>bgh</i> (гормон роста быка)	
<i>rgg</i> (гормон роста крысы)	
<i>csgh</i> (гормон роста чавычи)	<i>opafp</i> (промотор гена антифризного белка угревидной бельдюги <i>Zoarcesamericanus</i>)
<i>sbgh</i> (гормон роста морского окуня <i>Pagrus major</i>)	<i>wfafp</i> (промотор гена антифризного белка камбалы <i>Pseudopleuronectesamericanus</i>)

Coligf (инсулиноподобный фактор роста кижуча)	<i>csmt-1</i> (промоторгена белка металлотионеина чавычи)
wflafp-6 (антифризный белок камбалы <i>Pleuronectes americanus</i>)	<i>t-OP5a-AFP</i> (промотор гена антифризного белка камбалы)
AFP (антифризный белок камбалы)	<i>GHcdna</i> (промотор гена гормона роста чавычи)

В экспериментальной аквакультуре в основном применяются генные конструкции (кассеты), обеспечивающие ускорение роста (ген гормона роста – ГР) или устойчивость организма к неблагоприятным условиям (ген антифризного белка – АФБ) (табл. 1) [8]. В числе первых была разработана векторная конструкция для введения в геном карпа гена ГР белого толстолобика *Hypophthalmichthys molitrix* под контролем промотора гена металлотионеина радужной форели и NOS-терминатора (терминатор нопалинсинтазы *Agrobacterium tumefaciens*). При внедрении в геном конструкций с геном ГР зарегистрировано 11-30-кратное увеличение скорости роста у трансгенного лосося. К 2012 году более 10 лабораторий из разных стран заявили об успешном создании быстрорастущих рыб нескольких видов.

Технологии искусственного интеллекта и автоматизации процессов

Они позволяют создать автоматизированные системы контроля и управления рыбоводством, которые могут значительно повысить эффективность производства и снизить затраты на его поддержание. Также, автоматизация процессов позволяет снизить риски, связанные с уходом за животными и улучшить условия их содержания.

Технологии биотехнологической обработки рыбного мяса

Они могут быть использованы для увеличения срока хранения продукции, улучшения ее вкусовых и пищевых свойств, а также для создания новых продуктов на основе рыбы, которые были бы более высококачественными и конкурентоспособными на рынке.

Технологии контроля качества воды

Они позволяют мониторить качество воды в аквариумах и водоемах, где происходит выращивание рыбы. Контроль качества воды является важным фактором для здоровья рыб и эффективности производства. С помощью современных технологий контроля качества воды можно быстро обнаруживать и ликвидировать вредные вещества, которые могут навредить рыбам.

Технологии криопресервации рыбного мяса

Они позволяют сохранять свежесть и качество рыбы на длительный период времени, что позволяет

расширять географию ее продажи и увеличивать объемы производства.

Таким образом, новые биотехнологии могут значительно улучшить эффективность и рентабельность рыбоводства и аквакультуры. Генетические технологии позволяют улучшить качество пород рыб, технологии автоматизации исключают ошибки человеческого фактора и снижают затраты на управление, технологии биотехнологической обработки рыбного мяса и криопресервации позволяют сохранять качество продукции на длительный период времени и расширять географию ее продажи. Контроль качества воды является необходимым условием для здоровья рыб и эффективности производства. Все эти технологии могут быть успешно применены в рыбоводстве и аквакультуре, что позволит улучшить качество и доступность продукции, а также способствовать развитию этой важной отрасли экономики.

Список литературы

1. Микодина Е.В. Генетически модифицированные организмы (ГМО) и биологическая безопасность рыб в аквакультуре // Повышение эффективности использования водных биологических ресурсов: мат. II межд. науч.-практ. конф. М., 2008. С. 167-170.
2. Pandian T.J. Guidelines for research and utilization of genetically modified fish // Cur. Sci.. 2001. Vol. 81. № 9. PP. 1172-1178.
3. Махров А.А., Карабанов Д.П., Кодухова Ю.В. Генетические методы борьбы с чужеродными видами // Российский журнал биологических инвазий. 2014. № 2. С. 110-125.
4. The potential impact of modern biotechnology on fish aquaculture / P. Melamed [et. al] // Aquaculture. 2002. Vol. 204. PP. 255-269.
5. Beaumont A.R., Hoare K. Biotechnology and genetics in fisheries and aquaculture // Blackwell Science Ltd. 1998.
6. Реакция популяции атлантического лосося (*Salmo salar* L.) реки Кереть на инвазию паразита *Gyrodactylus salaris* Malmberg / В.С. Артамонова, А.А. Махров, Б.С. Шульман [и др.] // Российский журнал биологических инвазий. 2011. № 1. С. 2-14.
7. Заславский В.А. Экологические последствия генетического взаимодействия популяций // Журнал общей биологии. 1967. Т. 28. № 1. С. 3-11.
8. Орлова М.И. Биологическая инвазия – горнило для эволюции? // Экологическая генетика. 2011. Т. 9. № 3. С. 33-46.

NEW BIOTECHNOLOGIES IN FISH FARMING AND AQUACULTURE

Sarkisian D.S.^a, Krotova O.E.^b

Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Rostow region, Russian Federation, 344003

e-mail: ^ajuliasarkisyan16@yandex.ru, ^balb9652@yandex.ru

The article deals with modern methods in the field of biotechnology used in fish farming and aquaculture. Particular attention is paid to the development of new methods and technologies aimed at optimizing the processes of growing fish and increasing its productivity. The significance of the development of new biotechnologies for improving the efficiency and sustainability of fish farming and aquaculture in a changing ecosystem was discussed.

Keywords: *genetic engineering, biotechnology, aquaculture, new methods, fish farming*

Recently, the aquaculture sector has become one of the fastest growing industries in the world. However, the growth in the production of fish and other aquatic organisms is not always accompanied by an improvement in the methods and technologies used in this area. In this regard, there is a need to search for new biotechnological solutions that will improve the efficiency and profitability of fish farming.

Among the methods of modern biotechnology, the following should be singled out: gender, obtaining embryonic stem cells, transgenic, cryopreservation of reproductive products, proteomics, and mapping of fish genomes.

New biotechnologies can significantly improve the efficiency and profitability of fish farming and aquaculture. Genetic technologies improve the quality of fish breeds, automation technologies eliminate human error and reduce management costs, technologies for biotechnological processing of fish meat and cryopreservation allow maintaining product quality for a long period of time and expanding the geography of its sale. Water quality control is essential for fish health and production efficiency. All these technologies can be successfully applied in fish farming and aquaculture, which will improve the quality and availability of products, as well as contribute to the development of this important sector of the economy.

УДК 577.15

ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ФЕРМЕНТЫ

Саркисян Д.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Донской государственный технический университет, 344003, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, Российская Федерация

e-mail: dengorden00@mail.ru

В статье рассмотрены проблемы и перспективы использования ферментов в пищевом производстве.

Ключевые слова: *биотехнология, ферменты, биохимия, продукты питания, здоровье*

Введение

На протяжении многих тысяч лет человек использовал встречающиеся в природе микроорганизмы (бактерии, дрожжи и плесень) и вырабатываемые ими ферменты для приготовления таких продуктов, как хлеб, сыр, пиво и вино. Например, в хлебопечении фермент амилаза используется для расщепления муки на растворимые сахара, которые дрожжи превращают в спирт и двуокись углерода. Благодаря этому хлеб поднимается.

Сегодня ферменты используются для все более широкого спектра применений: в хлебопечении, сыроделии, переработке крахмала и производстве фруктовых соков и других напитков. Здесь они могут улучшать текстуру, внешний вид и питательную ценность, а также могут придавать желаемый вкус и аромат. Используемые в настоящее время пищевые ферменты иногда получают из животных и растений (например, фермент, расщепляющий крахмал, амилаза, может быть получен из прорастающих семян

ячменя), но большинство из них получают из целого ряда полезных микроорганизмов [1].

Преимущества

Ферменты приветствуются в качестве альтернативы традиционным химическим технологиям и могут заменить синтетические химикаты во многих процессах. Это может обеспечить реальные достижения в области экологических показателей производственных процессов за счет снижения энергопотребления и способности к биологическому разложению.

Они более специфичны по своему действию, чем синтетические химикаты. Следовательно, процессы, в которых используются ферменты, имеют меньше побочных реакций и отходов, что дает более качественные продукты и снижает вероятность загрязнения.

Они позволяют осуществлять некоторые процессы, которые в противном случае были бы невозможны. Примером может служить производство прозрачного концентрата яблочного сока, в основе которого лежит использование фермента пектиназы [2].

Получение улучшенных продуктов

С начала 1980-х годов компании, производящие ферменты, используют методы генной инженерии для повышения эффективности и качества производства и разработки новых продуктов. Здесь есть явные преимущества как для промышленности, так и для потребителей, поскольку значительные усовершенствования в производстве ферментов дают более качественные продукты и процессы. Однако прогресс замедляется, поскольку по всей Европе продолжаются дебаты о некоторых других, более противоречивых применениях биотехнологии, таких как генная инженерия у животных.

В настоящее время современная биотехнология может быть использована для ряда достижений в технологии ферментативного производства:

- Повышение производительности и экономической эффективности существующих процессов. Благодаря более эффективному производству ферментов количество сырья, энергии и воды, необходимых для приготовления продукта, может быть сокращено вдвое за счет замены традиционного штамма микроба на генетически модифицированный.

- Компании могут более точно адаптировать свои ферменты к требованиям клиентов к продуктам с особыми свойствами.

- Производители могут поставлять ферменты, которые иначе невозможно было бы производить в достаточных количествах, предоставляя потребителю доступ к более широкому ассортименту продуктов. Примером может служить продукт на основе амилазы, благодаря которому хлеб дольше остается свежим [3].

Краткая история ферментов

- 2000 г. до н.э. Египтяне и шумеры разработали ферментацию для использования в пивоварении, выпечке хлеба и производстве сыра.

- 800 г. до н.э. Желудки телят и фермент химозин использовались для производства сыра.

- 1878. Были идентифицированы компоненты дрожжевых клеток, которые вызывают ферментацию, и впервые был использован термин «фермент», происходящий от греческого термина, означающего «в дрожжах».

- 1926. Впервые было показано, что ферменты являются белками.

- В 1980-х годах были разработаны ферментные препараты для улучшения усвояемости и доступности питательных веществ в некоторых кормах для животных.

- В 1982 году произошло первое пищевое применение продукта генной технологии – альфа-амилазы.

- 1988. Рекombинантный химозин был одобрен и представлен в Швейцарии, что ознаменовало раннее одобрение продукта генной технологии для использования в пищевых продуктах.

- 1990. С использованием генной технологии получены два вспомогательных средства для обработки пищевых продуктов: фермент для производства сыра в США и дрожжи, используемые в выпечке в Великобритании [4].

Возможность аллергии

На сегодняшний день не поступало сообщений об аллергии потребителей на остатки ферментов в пищевых продуктах. Уровни остатков ферментов, содержащихся в пищевых продуктах, настолько низки, что крайне маловероятно, что они когда-либо вызовут аллергию. Как и все белки, ферменты могут вызывать аллергические реакции, когда у людей повышена чувствительность в результате воздействия больших количеств. По этой причине ферментные компании принимают различные защитные меры, и некоторые ферменты производятся в виде жидкостей, гранул, капсул или в виде иммобилизованных препаратов, чтобы ограничить воздействие на работников [5].

Выводы

Таким образом, ферменты являются природными белками, которые обеспечивают протекание всех биохимических процессов жизнедеятельности, содержатся во всех пищевых продуктах. При очистке и использовании в приготовлении пищи некоторые из этих ферментов обладают такими полезными свойствами, как улучшенный вкус, текстура и усвояемость.

Список литературы

1. Егорова Т.А., Клунова С.М., Живухина Е.А. Основы биотехнологии: учеб. пособие для высш. пед.

учеб. заведений. 4-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.

2. Методы анализа пищевых, сельскохозяйственных продуктов и медицинских препаратов / Под ред. канд. техн. наук А.Ф. Наместникова; пер. с англ. М.: Пищевая промышленность, 1974. 743 с.

3. Егорова Т.А. Основы биотехнологии. М.: Академия, 2006. 207 с.

4. Сарафанова Л.А. Применение пищевых добавок. Технические рекомендации, 6-е изд., исп. и доп. Санкт-Петербургом., 2005 г. 193 с.

5. Капрельянц Л.В. Ферменты в пищевых технологиях: вчера, сегодня, завтра // Пищ. ингредиенты: сырье и добавки. 2006 г. № 2. С. 48-51.

APPLICATION OF BIOTECHNOLOGY IN THE FOOD INDUSTRY: ENZYMES

Sarkisian D.S.

Don State Technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-Don, Rostow region, Russian Federation, 344003

e-mail: dengorden00@mail.ru

The article discusses the problems and prospects of the use of enzymes in food production.

Keywords: *biotechnology, enzymes, biochemistry, food, health*

УДК 577.29

PROTEOMIC ANALYSIS OF WHITE LUPIN CULTIVARS INFECTED BY COLLETOTRICHUM LUPINI STRAINS TO REVEAL KEY BIOLOGICAL PATHWAYS FOR RESISTANCE TO ANTHRACNOSE

Sidorov L.¹, Boldyrev S.¹, Baik A.¹, Martynova E.¹, Bondarenko E.², Volkova P.³, Bondarenko V.², Lukashevich M.⁴, Gentzbittel L.¹, Samad S.¹, Ben C.^{1,a}

¹ *Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, Russian Federation, 121205*

² *Russian Institute of Radiology and Agroecology, Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249032*

³ *Independent Researcher, Geel, Belgium, 2440*

⁴ *Russian Lupine Scientific Research Institute – branch of the Federal Williams Research Centre of Forage Production and Agroecology, Berezovaya st. 2, Michurinskiy, Bryansk region, Russian Federation, 241524*

e-mail: ^a C.Ben@skoltech.ru

Anthracnose of white lupine (*Lupinus albus* L.) is a plant disease caused by the facultative parasite *Colletotrichum lupini*. In most cases, it is transmitted through infected seeds, and its appearance in the field can cause up to 100 % crop loss. The aim of the work was to identify proteins based on proteomic data that are presumably involved in the mechanisms of plant response to infection with different strains of *C. lupini*.

Ключевые слова: *white lupin, anthracnose, resistance, omics technologies, proteomics, plant immunity*

Introduction

White lupin (*Lupinus albus* L.) is a grain legume which has a high protein content (35-48 %) in the seeds [1]. For Russia, it has a special interest as this crop is able to perform well under the harsh conditions, such as low sums of temperatures and poor soil. It can be consumed by both animals and humans, due to the low content of alkaloids in modern cultivars [2].

However, the propagation of this crop is negatively affected by anthracnose, a highly destructive disease

caused by fungal phytopathogen *Colletotrichum lupini*. It can be transmitted via seeds (primary infection) and air (secondary infection). In the last decade, the anthracnose became an epyphytotic [3].

There is the study which reveal a candidate gene conferring the resistance of white lupin to *C. lupini* [4]. Although, the breeding of resistant varieties is lagging. The goals of this project are to identify the key proteins which are involved in the response to the attack of *C. lupini* and to elucidate the molecular pathways for

resistance. In order to reach these objectives, the proteomic analysis was performed and the results are presented here. Later, it will be used for integrative omics analysis with transcriptomic and metabolomic data to obtain deeper view on the plants' responses to infection.

Materials and methods

For this research project, Completely Randomized Design was used. In total, we had 27 samples of

proteins, which were isolated from three white lupin cultivars (Andromeda, SN and Michurin). The varieties were infected with two *C. lupini* strains 139 and 3. Also, the mock control without infection was present for each cultivar. For each combination of factors there were three replicates. In the study, Andromeda was considered as the resistant to anthracnose cultivar, SN as semi-resistant, and Michurin as fully susceptible. The summarized experimental design can be found in Table 1.

Table 1

Experimental design

Elements	Number of elements
Seeds	5 seeds per cultivar/strain/replicate in one box
Cultivars	3 (Andromeda, SN, and Michurin)
Strains	2 (3 and 139) + 1 mock control = 3
Replicates	3
Total number of samples	$3 * 3 * 3 = 27$

For inoculation, 5 seeds for each sample were taken and submerged into the inoculum with the *C. lupini* spores (10^5 spores/ml). After one hour the seeds were arranged on the sterilized boxes with wet filter paper (2 filter papers and 5 mL of sterile water). After 2 days post-inoculation (dpi), another 5 mL of water was added. The seeds were incubated at 25 °C in darkness. At the 7th dpi all the seeds were ground in liquid nitrogen.

Chromato-mass spectrometric analysis of samples after protein hydrolysis was performed using an Ultimate™ 3000 RSLCnano System chromatographic HPLC system coupled to a Q-Exactive HF Orbitrap mass spectrometer. Samples were analyzed by LC-MS/MS in two technical repeats. The protein's identification was performed with the MaxQuant v.1.6.17.0 program using the Andromeda search algorithm. The UniProt (Swiss-prot) database was used to identify proteins by specifying the species. These steps were done in the Advanced Mass Spectrometry Core Facility (AMS) at Skoltech.

The bioinformatic analysis presented here was performed in R software of version 4.2.2 (2022-10-31 ucrt). The basic manipulations with the data were done with the *tidyverse* packages [5]. Quality control and statistical analysis were provided using the freshly released package *prolfqua* [6]. All LFQ (label-free quantitation) intensities were log₂-transformed and normalized using robust scaling. Five samples were deleted during the analysis due to a high proportion of missing values.

For statistical inference, a general linear model (GLM) for each protein was fitted with the following formula (1):

$$y_{ij} = \mu + C_i + S_j + CS_{ij}, \quad (1)$$

where y_{ij} is a protein expression for the given cultivar and strain, μ is overall mean, C_i is the fixed effect for a cultivar, S_{ij} is the fixed effect for a strain, and CS_{ij}

is the fixed effect for interaction between the i -th cultivar and j -th strain.

For contrast testing, moderated Wald test on regression coefficients was performed to find evidence whether the protein expression in one sample is different from another one with the confidence level 95 %. The multiple testing correction was done using Benjamini-Hochberg adjustment method. The protein was considered as an up-regulated with log₂ fold change (FC) > 1, and down-regulated when log₂ FC < -1. The infected plants were compared with the control samples, and also Andromeda and SN cultivars (as they are considered as resistant ones) were compared with Michurin (susceptible ones).

Gene Ontology (GO) enrichment analysis was performed using *enrichplot* R package [7]. The white lupin proteins were searched against the Gene Ontology Annotation (GOA) database with annotated white lupin proteome, which is deposited in the European Nucleotide Archive (ENA) at EMBL-EBI under accession ID 3870. The IDs for protein accessions were derived from UniProt.

Results and discussion

The Figure 1 demonstrates the results of group comparisons. The most common up-regulated protein in infected cultivars was a putative peptidylprolyl isomerase (ID in UniProt data base: *A0A6A5LVK1*), which is involved in the first component of plant defense – pathogen-associated molecular pattern (PAMP)-primed immune response (PTI) [8]. Also, both SN and Andromeda cultivars share a putative thaumatin (*A0A6A4R1R2*) as an up-regulated DAP, which is known for exhibiting a strong antifungal activity [9]. We discovered a fungal protein called translation elongation factor 1-alpha (Tef-1 α or eEF1A) that was differentially abundant in infected cultivars. The bacterial elongation factor Tu

(EF-Tu) is known as a PAMP, and it is likely that the found fungal protein functions in a similar manner [10].

From the comparison of Andromeda and Michurin cultivars both infected with the strain 139 we found: 1) G-patch domain-containing protein (*AOA6A5LVA3*); 2) putative sterol 14- α -demethylase (*AOA6A4PH12*, CYP51); 3) ATP synthase, F0 complex, subunit G

(*AOA6A5LMJ4*); 4) putative 1-acylglycerophosphocholine O-acyltransferase (*AOA6A5MD10*); 5) putative plant specific mitochondrial import receptor subunit TOM20 (*AOA6A5N8I3*). The GO enrichment analysis indicates that these proteins are primarily associated with lipid metabolism and ATP synthesis, as demonstrated in Figure 3.

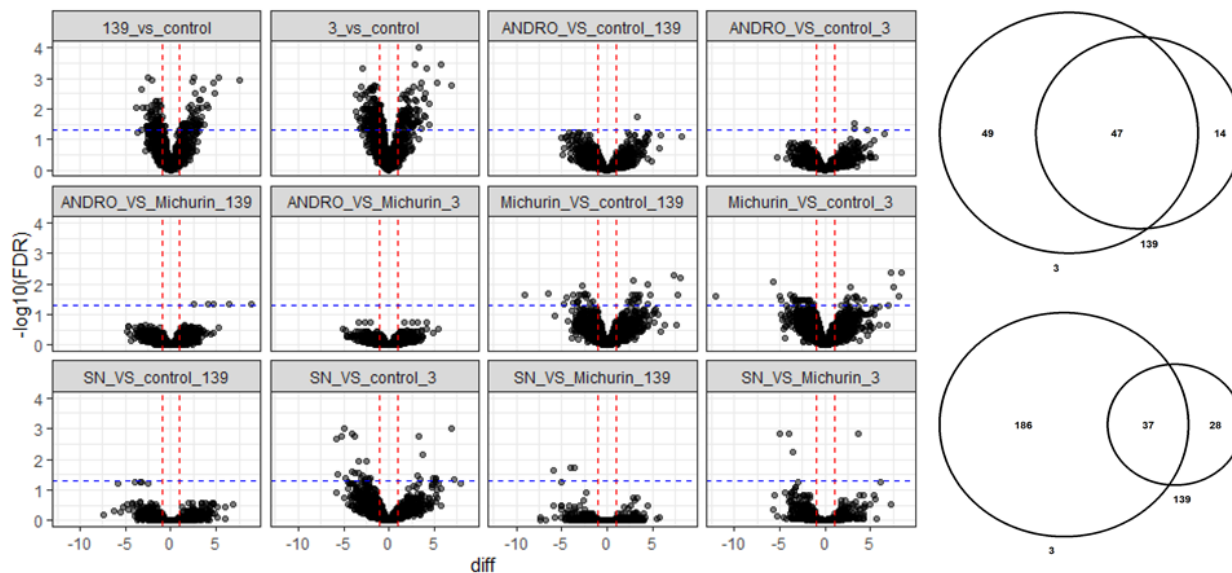


Figure 1. Volcano plots with the results of Wald test (left; adjusted p-value is on y-axis, log₂ fold change is on x-axis) and Venn diagram (right) with the intersection of up- (upper part) and down-regulated (lower part) differentially abundant proteins (DAPs) between 139 and 3 strains

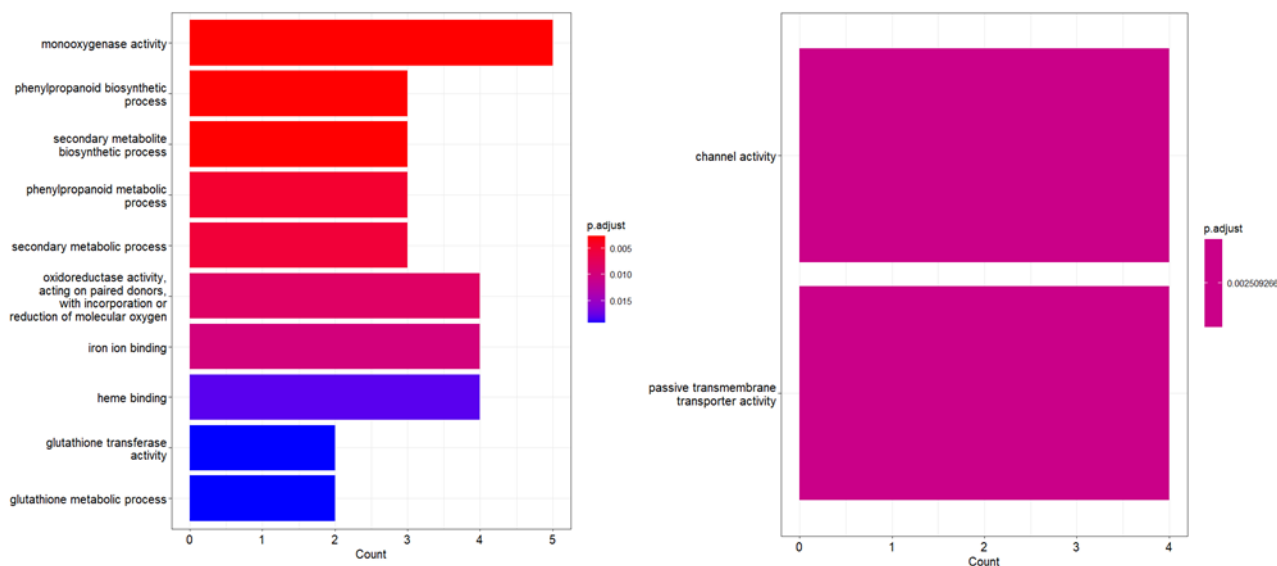


Figure 2. The barplots for gene ontology enrichment analysis of intersected (Figure 1) up- (left) and down-regulated differentially abundant proteins

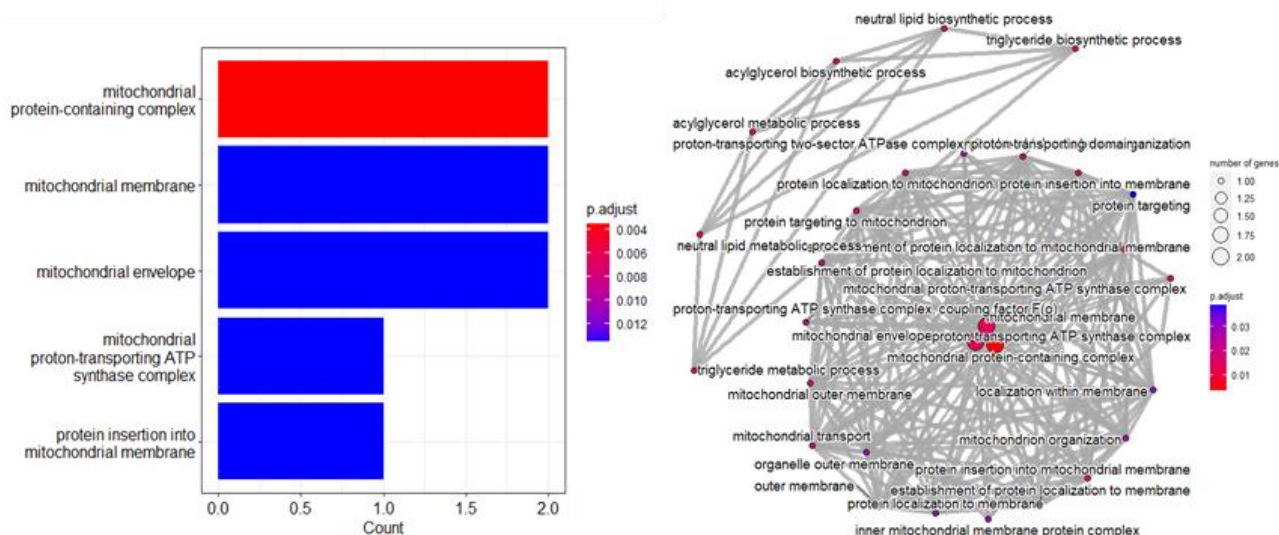


Figure 3. The barplot (left) and emmaplot (right) for GO analysis of up-regulated DAPs in Andromeda cultivar in comparison to Michurin

Conclusions

As a result of this analysis, we obtained some evidence for some differentially expressed proteins to be involved in the response of white lupin to *C. lupini* infection. Worth mentioning that the fungal protein eEF1A was hypothesized as PAMP in the plant-pathogen interaction between white lupin and *C. lupini*. However, these results have to be validated via the further analyses.

References

1. *Rutskaya V.I.* Lupin anthracnose and its biological properties // *Legumes and Groat Crops*. 2018. Vol. 4. № 28. PP. 130-135.
2. *Talhinhas P., Barancelli R., Le Floch G.* Anthracnose of lupins caused by *Colletotrichum lupini*: A recent disease and a successful worldwide pathogen // *Journal of Plant Pathology*. 2016. Vol. 97. № 4. PP. 5-14.
3. Genetic diversity of *Colletotrichum lupini* and its virulence on white and Andean lupin // *J.A. Alkemade [et al.] // Scientific reports*. 2021. Vol. 11. № 1. P. 13547.
4. Genome-wide association study reveals white lupin candidate gene involved in anthracnose resistance

// *J.A. Alkemade [et al.] // Theoretical and Applied Genetics*. 2022. Vol. 135. № 3. PP. 1011-1024.

5. Welcome to the Tidyverse // *H. Wickham [et al.] // Journal of open source software*. 2019. Vol. 4. № 43. P. 1686.

6. Prolfqua: a comprehensive R-package for Proteomics Differential Expression Analysis // *W.E. Wolski [et al.] // Journal of Proteome Research*. 2023. Vol. 22. № 4. PP. 1092-1104.

7. *Yu G.* ClusterProfiler: An universal enrichment tool for functional and comparative study // *BioRxiv*. 2018. P. 256784.

8. *Shaw P.E.* Peptidyl-prolyl isomerases: a new twist to transcription // *EMBO reports*. 2002. Vol. 3. № 6. PP. 521-526.

9. *Saeidi M., Zareie R.* Prediction, isolation, overexpression and antifungal activity analysis of *Medicago truncatula* var. *truncatula* putative thaumatin like proteins (TLP-1,-2,-3,-4 and-5) // *Turkish Journal of Biology*. 2020. Vol. 44. № 4. PP. 176-187.

10. The N terminus of bacterial elongation factor Tu elicits innate immunity in Arabidopsis plants // *G. Kunze [et al.] // The Plant Cell*. 2004. Vol. 16. № 12. PP. 3496-3507.

ЦИАНОБАКТЕРИИ КОЛЛЕКЦИИ ACSSI КАК ПРОДУЦЕНТЫ ЦЕННЫХ МЕТАБОЛИТОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА: СИНТЕЗ КУЛЬТУРОМИКИ И ГЕНОМИКИ

Темралеева А.Д.^{1,а}, Редькина В.В.¹, Портная Е.А.¹, Дидович С.В.^{2,б}, Букин Ю.С.^{3,в}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», 142290, Московская обл., г. Пушкино, просп. Науки, д. 3, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 295043, г. Симферополь, ул. Киевская, д.150, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3, Российская Федерация

e-mail: ^а temraleeva.anna@gmail.com, ^б sv-alex.68@mail.ru, ^в bukinyura@mail.ru

Показана перспективность цианобактериальных штаммов коллекции ACSSI для разработки микробных препаратов стимулирующего и ингибирующего характера на основе данных молекулярно-генетического анализа, полногеномного секвенирования, вегетационных и полевых опытов. Инокуляция ряда штаммов вызывала положительный эффект на рост и развитие ценных сельскохозяйственных культур пшеницы и лаванды, в то время как другие штаммы угнетали сорные травы – щирицу, марь, амброзию. Выявлена способность ряда цианобактериальных штаммов к продукции фитогормонов и цианотоксинов.

Ключевые слова: цианобактерии, геном, штаммы, цианотоксины, фитогормоны, сельскохозяйственные культуры, биостимуляторы, биопротекторы

Цианобактерии (Cyanophyta/Cyanobacteriota) являются разнообразной группой оксигенных фототрофных бактерий, обладающих уникальными физиолого-биохимическими свойствами, которые позволяют им успешно колонизировать различные экосистемы мира, включая экстремальные местообитания (холодные и жаркие пустыни, термальные источники, гиперсоленые и щелочные водоемы, пещеры, вулканические субстраты и пр.) [1]. Их вездесущность в биосфере основана на большом наборе стратегий для выживания в сложных природных условиях и защиты от конкурентов. Функциональная роль цианобактерий связана с их способностью к оксигенному фотосинтезу, азотфиксации, растворению иммобилизованных форм фосфора, недоступных для растений, продукции внеклеточных полисахаридов, которые усиливают агрегацию почвенных частиц, обладают водоудерживающими свойствами и адсорбируют питательные вещества. Также цианобактерии продуцируют ряд ценных веществ, включая фитогормоны, цианотоксины, витамины, пигменты, сидерофоры и др., и являются, таким образом, экосистемными инженерами [2, 3]. Именно благодаря этим способностям они считаются перспективным объектом для агробиотехнологии и могут быть использованы в сельском хозяйстве при производстве биопрепаратов стимулирующего и ингибирующего характера [4, 5]. Цианобактерии и их метаболиты используются в пищевой и фармацевтической промышленности, при производстве биотоплива, а также для биоремедиации и биоиндикации загрязненных сред [6, 7]. Более

того, культивирование цианобактерий помогает снизить уровень парниковых газов (CO₂) [4, 8].

В альгологическую коллекцию ACSSI депонировано 94 штамма цианобактерий, изолированных из различных типов почв (серой лесной, каштановой, луговой, бурой полупустынной, солонцов), из таллома лишайника *Lobaria pulmonaria*, а также биопленок и биокорочек естественных и искусственных субстратов. В коллекции представлены 6 порядков цианобактерий, 14 семейств, 19 родов, из них азотфиксирующих – 61 штамм.

Для разработки микробных препаратов был выполнен скрининг 15 цианобактериальных штаммов коллекции на наличие стимулирующего действия на рост и развитие пшеницы *Triticum aestivum*. В качестве биоудобрений были рекомендованы штаммы *Desmonostoc muscorum* ACSSI 091 и ACSSI 149, *Nostoc* sp. ACSSI 57, *N. linckia* ACSSI 271. Кроме того, в полевых опытах установлено, что цианоризобияльный консорциум на основе последнего штамма повышает продуктивность лаванды узколистной на 35-40 % и сбор эфирного масла на 35-48 % [9]. В серии вегетационных опытов была установлена эффективность ингибирования штаммом цианобактерии *N. sphaeroides* ACSSI 150 растений *Amaranthus retroflexus* (щирицы) и *Chenopodium album* (мари белой) [10], а также штаммами *N. linckia* f. *muscorum* ACSSI 149 (= *D. muscorum*) и *N. commune* ACSSI 30 угнетение сорняка *Ambrosia artemisiifolia* (амброзии полыннолистной) [11].

Стимулирующее действие может быть связано с продукцией цианобактериями фитогормонов. Например, для штаммов *N. sphaeroides* ACSSI 150 и *N. linckia* ACSSI 271 показано максимальное количество гетероауксина в диапазоне от 0.10 до 0.17 мкг/мг абсолютно сухой биомассы. Биогербицидные способности цианобактерий возможно связаны с продукцией цианотоксинов, поэтому был проведен молекулярно-генетический скрининг цианобактерий

коллекции ACSSI, который выявил 24 штамма, содержащих гены синтеза нейротоксина – сакситоксина. Среди них доминировали штаммы, принадлежащие порядку Nostocales – роды *Tolypothrix*, *Nostoc*, *Trichormus*, *Cylindrospermum*, *Nodularia* и Synechococcales – роды *Nodosilinea*, *Leptolyngbya*, *Muxacorys*, *Trichocoleus*, *Phormidesmis*, *Synechococcus*. Самыми немногочисленными были штаммы из порядка Oscillatoriales – род *Microcoleus* (рис. 1).

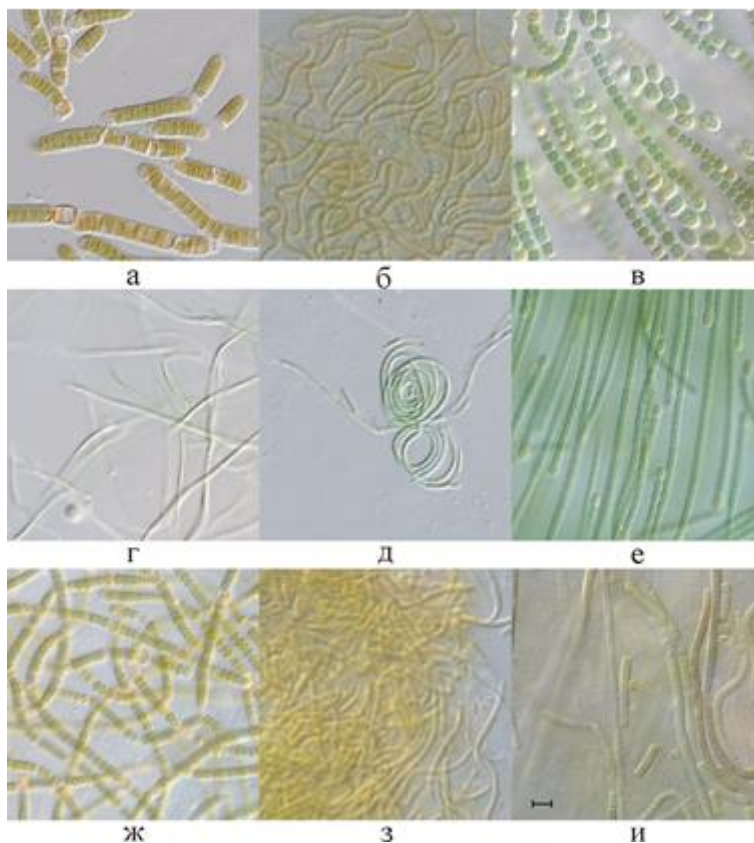


Рисунок 1. Некоторые штаммы цианобактерий коллекции ACSSI, имеющие ген синтеза цианотоксинов *sxtG*: а – *Tolypothrix* sp. ACSSI 038, б – *Nostoc commune* ACSSI 030, в – *Trichormus variabilis* ACSSI 154, г – *Nodosilinea epilithica* ACSSI 169, д – *Leptolyngbya frigida* ACSSI 171, е – *Cylindrospermum* sp. ACSSI 028, ж – *Nodularia sphaerocarpa* ACSSI 239, з – *Muxacorys* sp. ACSSI 298, и – *Microcoleus* sp. ACSSI 312. Шкала 10 мкм

Далее в 2023 году были начаты работы по полно-геномному секвенированию фонда альгологической коллекции ACSSI на примере штамма нитчатой цианобактерии ACSSI 383. 16S рПНК-анализ установил положение данного штамма внутри недавно описанного рода *Cumatolege* [12] с независимым филогенетическим положением. Впервые для представителей рода нами был секвенирован и аннотирован драфт-геном с полнотой сборки 99,2 %. Драфт-геном штамма *Cumatolege* sp. ACSSI 383 удалось собрать в 120 контигов со средним покрытием 199,06 и общим размером 4495438 п.н. Г+Ц состав, рассчитанный на основании геномной последовательности, составил

50,8 %. В процессе аннотации и анализа генома ACSSI 383 были определены 4463 белок-кодирующие последовательности, из них только 924 с известными функциями. В геноме кодируется 43 РНК. Наибольшее количество генов (163) в исследуемом драфт-геноме соответствует метаболической подсистеме «Углеводы», 151 ген – подсистеме «Белковый метаболизм», 136 генов – подсистеме «Аминокислоты и их производные» и 135 генов – подсистеме «Кофакторы, витамины, простетические группы, пигменты». На рисунке 2 приведены результаты функциональной аннотации генома с помощью веб-сервера RAST (<https://rast.nmpdr.org/>).

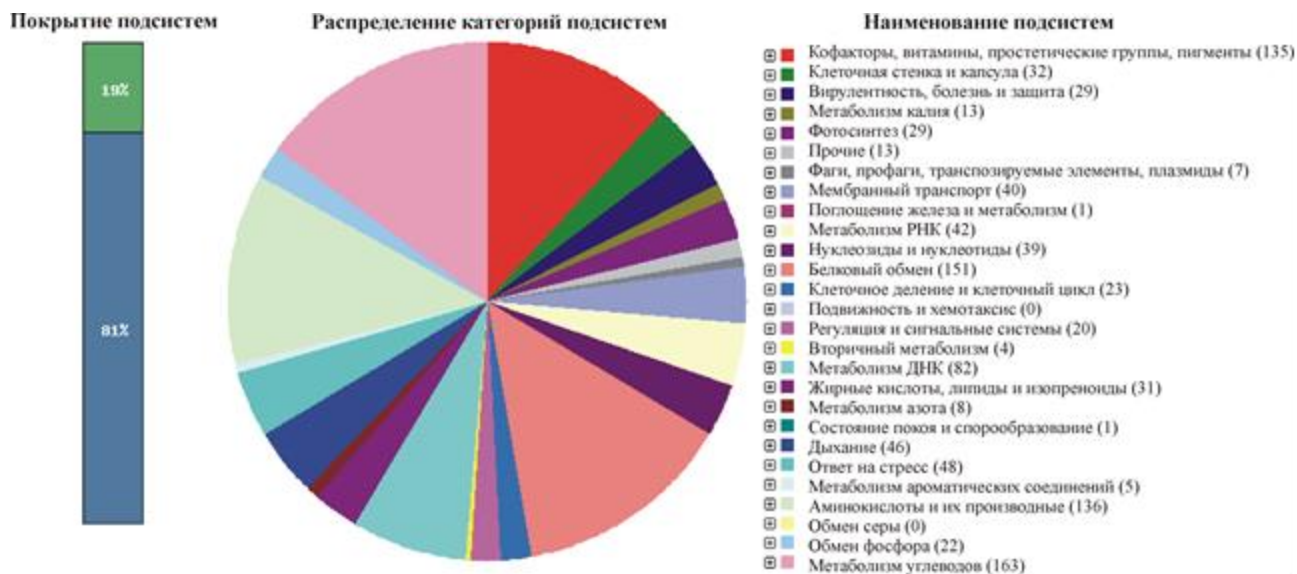


Рисунок 2. Распределение категорий подсистем клеточного метаболизма у штамма *Cymatolege* sp. ACSSI 383

Также были обнаружены гены, ответственные за синтез белков теплового шока, аллофикоцианинов и фикоэритринов, цианотоксина микроцистина и экзотоксина гемолизина, антибиотиков (окситетрациклина, бациллаена, виргиниамицина), сидерофоров, ферментов, способствующих разложению неорганических полифосфатов, а также гены, ответственные за устойчивость к цинку, кадмию, свинцу, ртути и мышьяку. Полученные данные позволяют предположить биотехнологическую ценность штамма *Cymatolege* sp. ACSSI 383. Планируется дальнейшее продолжение работ по полногеномному секвенированию цианобактериальных штаммов коллекции.

Ввиду того, что проблемы повышения продуктивности и борьбы с сорной растительностью в агроценозах России актуальна из-за потерь урожая зерновых культур, составляющих 15-18 %, а для пропашных культур до 50 % и более [13], а также с целью снижения химического прессинга на экосистемы, поиск штаммов для создания эффективных и безопасных биопрепаратов на основе цианобактерий и их метаболитов является приоритетной целью для агропромышленного комплекса страны.

Список литературы

1. Seckbach J. Algae and Cyanobacteria in extreme environments // Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology. New York: Springer Science, Business Media, 2007. Vol. 11. 811 p.
2. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture / A.L. Alvarez [et al.] // Algal Research. 2021. Vol. 54. P. 102200.
3. Cyanobacteria as a Valuable Natural Resource for Improved Agriculture, Environment, and Plant

Protection / A.M. Abo-Shady [et al.] // Water Air Soil Pollut. 2023. Vol. 234. № 5. P. 313.

4. Cyanobacterial Farming for Environment Friendly Sustainable Agriculture Practices: Innovations and Perspectives / J. Pathak [et al.] // Front. Environ. Sci. 2018. Vol. 6. P. 7.

5. Cyanobacteria: A Natural Source for Controlling Agricultural Plant Diseases Caused by Fungi and Oomycetes and Improving Plant Growth / H. Righini [et al.] // Horticulturae. 2022. Vol. 8. № 1. P. 58.

6. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) / С.В. Дидович, С.В. Москаленко, А.Д. Темралева, С.А. Хапчаева // Вопросы современной альгологии. 2017. № 2 (14). С. 1.

7. Role of cyanobacteria in agricultural and industrial sectors: an outlook on economically important by-products / D. Garlapati [et al.] // Appl Microbiol Biotechnol. 2019. Vol.103. PP. 4709-4721.

8. Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture / D. Chittora [et al.] // Biochem Biophys Rep. 2020. Vol. 22. P. 100737.

9. Эффективность полифункциональных биопрепаратов при выращивании лаванды узколистной / С.В. Дидович [и др.] // Научный и инновационный потенциал развития, производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений: материалы Международной научно-практической конференции. Симферополь: Издательство Типография «Ариал», 2019. С. 160-163.

10. Дидович С.В., Алексеенко О.П. Эффективность ингибирования сорных растений при бактеризации фототрофными и гетеротрофными микроорганизмами // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы IV международной научно-практической конференции.

Ялта: Издательство Типография «Ариал», 2019. С. 257-259.

11. Дидович С.В. Микробиометод контроля численности сорных растений // Системы контроля окружающей среды: тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Севастополь: Издательство «Институт природно-технических систем», 2019. С. 178.

12. Revealing new sponge-associated cyanobacterial diversity: novel genera and species / D. Konstantinou [et al.] // Mol. Phyl. Evol. 2021. Vol. 155. P. 106991.

13. Куликова Н.А., Лебедева Г.Ф. Гербициды и экологические аспекты их применения: учебное пособие. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 152 с.

CYANOBACTERIA OF THE ACSSI COLLECTION AS PRODUCERS OF VALUABLE METABOLITES FOR AGRICULTURE: SYNTHESIS OF CULTUROMICS AND GENOMICS

Temraleeva A.D.^{1,a}, Redkina V.V.¹, Portnaya E.A.¹, Didovich S.V.^{2,b}, Bukin Yu.S.^{3,c}

¹ Federal Research Center «Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences, prospect Nauki 3, Pushchino, Moscow region, Russian Federation, 142290

² Federal State Budget Scientific Institution «Research Institute of Agriculture of Crimea», Kievskaya st. 150, Simferopol, Russian Federation, 295453

³ Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya st. 3, Irkutsk, Russian Federation, 664033
e-mail: ^a temraleeva.anna@gmail.com, ^b sv-alex.68@mail.ru, ^c bukinyura@mail.ru

The prospects of cyanobacterial strains of the ACSSI collection for the development of stimulating and inhibitory microbial preparations based on the data of molecular genetic analysis, whole genome sequencing, vegetation and field experiments are shown. The inoculation of a number of strains caused a positive effect on the growth and development of valuable agricultural crops of wheat and lavender, while other strains inhibited weeds - amaranth, marshmallow, and ragweed. The ability of a number of cyanobacterial strains to produce phytohormones and cyanotoxins was revealed.

Keywords: cyanobacteria, genome, strains, cyanotoxins, phytohormones, crops, biostimulators, bioprotectors

Cyanobacteria (Cyanophyta/Cyanobacteriota) are a diverse group of oxygenic phototrophic bacteria with unique physiological and biochemical properties that allow them to successfully colonize various ecosystems of the world, including extreme habitats (cold and hot deserts, thermal springs, hypersaline and alkaline reservoirs, caves, volcanic substrates). etc.) [1]. For the development of microbial preparations, 15 cyanobacterial strains of the collection were screened for the presence of a stimulating effect on the growth and development of *Triticum aestivum* wheat. Strains of *Desmonostoc muscorum* ACSSI 091 and ACSSI 149, *Nostoc* sp. ACSSI 57, *N. linckia* ACSSI 271. In addition, in field experiments it was found that the cyanorizobial consortium based on the latter strain increases the productivity of angustifolia lavender by 35-40 % and the collection of essential oil by 35-48 % [9]. In a series of vegetation experiments, the effectiveness of inhibition by the strain of cyanobacterium *N. sphaeroides* ACSSI 150 of plants *Amaranthus retroflexus* and *Chenopodium album* [10], as well as strains of *N. linckia* f. *muscorum* ACSSI 149 (= *D.*

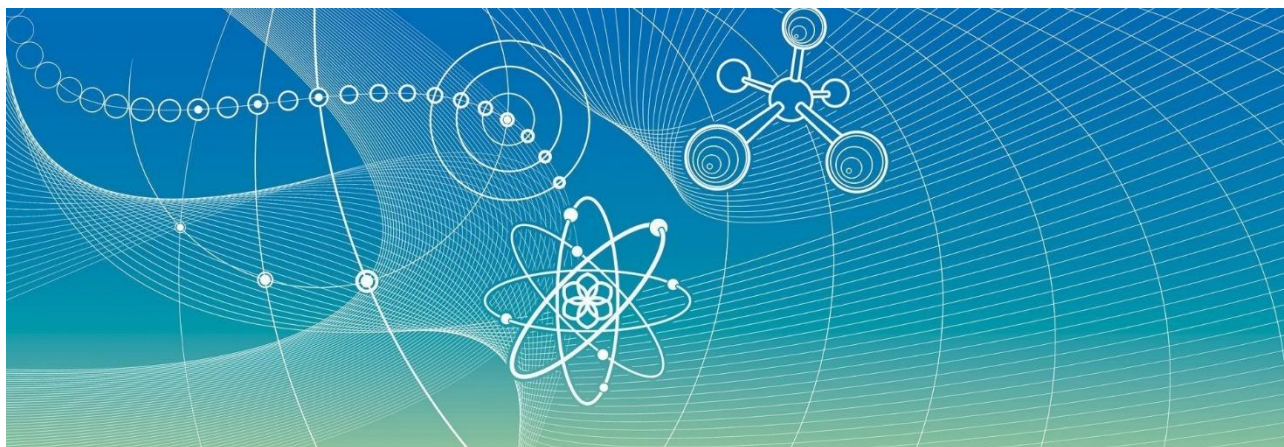
muscorum) and *N. commune* ACSSI 30 suppression of the weed *Ambrosia artemisiifolia* [11].

The stimulating effect may be associated with the production of phytohormones by cyanobacteria. For example, for strains *N. sphaeroides* ACSSI 150 and *N. linckia* ACSSI 271, the maximum amount of heteroauxin was shown in the range from 0.10 to 0.17 µg/mg of absolutely dry biomass. The bioherbicidal abilities of cyanobacteria are possibly associated with the production of cyanotoxins, therefore, molecular genetic screening of cyanobacteria from the ACSSI collection was carried out, which revealed 24 strains containing genes for the synthesis of neurotoxin-saxitoxin. In view of the fact that the problems of increasing productivity and combating weeds in the agrocenoses of Russia are relevant due to losses in the yield of grain crops of 15–18%, and for row crops up to 50 % or more [13], as well as in order to reduce chemical pressure on ecosystems, the search for strains to create effective and safe biological products based on cyanobacteria and their metabolites is a priority goal for the country's agro-industrial complex.

Секция

**РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ**

RADIATION BIOLOGY RESEARCH IN AGRICULTURE



ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА АДЕНИНОВЫХ НУКЛЕОТИДОВ И НИКОТИНОВЫХ КОФЕРМЕНТОВ В ЛИСТЯХ ХЛОПЧАТНИКА ПРИ РАДИАЦИОННЫХ И СОЛЕВЫХ СТРЕССАХ

Алакбарова Ш.Э.

Азербайджанский государственный аграрный университет (Агрономический факультет),
AZ2000, г. Гянджа, ул. Озан, д. 146, Азербайджанская Республика
e-mail: shahla.alakbarova.551@gmail.com

В статье рассматривается динамика изменения количества адениновых нуклеотидов и никотиновых коферментов в течение первых 10, 20 и 30 дней развития проростков, сформированных при посеве семян вида хлопчатника *Gossypium hirsutum* сорта Гянджа-182, семена которого были облучены γ -лучами, а также при солевом стрессе. Обсуждена роль полученных результатов в поддержании энергетического статуса растения при стрессе.

Ключевые слова: *Gossypium hirsutum* L, радиация, соль, АДФ, АТФ, НАД, НАДФ, стресс

Известно, что при радиационном и солевом стрессах происходят серьезные изменения энергетического обмена высших растений. Эти стрессы резко снижают энергетическую эффективность дыхания, нарушая связь между окислением и фосфорилированием. В результате нарушается нормальное протекание метаболических реакций, так как синтез АТФ в клетке затруднен. Перемещение ионов Na^+ в цитозоль в условиях повышенной солености вызывает нарушение процесса поглощения фотонов, а также цепи переноса электронов и, как следствие, отрицательно сказывается на образовании молекул АТФ и НАДФ в ФС II и скорости реакций цикла Кальвина. В это время полностью нарушается синтез белков в связи с нарушением биосинтеза АТФ в клетке. В результате количество АТФ внутри митохондрий в клетке уменьшается [1].

Можно отметить, что ускорение дыхания у растений после воздействия солей (NaCl , Na_2SO_4) является следствием перехода процесса фосфорилирования (переноса энергии) в процесс окисления (переноса электронов). Поскольку в этом случае нарушается синтез АТФ в клетках, вскоре возникает эффект, называемый «энергетическим голоданием», и целый ряд процессов в клетке, в том числе и синтез белков, полностью нарушается [2].

Фотосинтетический процесс у зеленых растений зависит от лабильности физико-химических и физиологически-биохимических механизмов, связанных с фотосинтезом, и от количества запасных веществ, которые растения накапливают, а также от того, как клетка регулирует свою энергию, снабжая ее промежуточными веществами и пластическими веществами [3].

В качестве объекта исследования был взят местный сорт Гянджа-182 хлопчатника вида *Gossypium hirsutum* и исследовательские работы проводились

на 10, 20 и 30 дни развития растения. Схема посева семян:

- 1) В качестве контроля были посажены необлученные семена хлопчатника;
- 2) Посев семян, облученных γ -лучами в дозах 1, 5, 10, 50, 100 и 200 Гр в нормальных условиях;
- 3) Посев необлученных семян при концентрациях 1, 5, 10, 50, 100 и 200 мМ NaCl .

Семена хлопчатника облучали с помощью Co^{60} -источника на облучательной установке RUXUND 20.000 научно-экспериментального отдела «Изотопные источники излучения» Института Радиационных Проблем НАНА. Семена, облученные в дозах 1, 5, 10, 50, 100 и 200 Гр, дезинфицировали 0,3 % раствором H_2O_2 в течение 15 мин, затем 2-3 раза промывали дистиллированной водой от этого вещества и проращивали в чашках Петри в термостате.

Все выращенные проростки периодически поливали, а в солевых вариантах проростки пересаживали в вегетационные емкости, наполненные солевыми растворами различной концентрации по вариантам, затем поместили для развития в термостат с температурным режимом 25-28 °С, фотопериодом 14 часов, относительной влажностью воздуха 60-70 %, интенсивностью света 15-20 клюкс. Количество нуклеотидов аденина определяли методами, предложенными Ермаковым [4], а количество никотиновых коферментов-методами [5].

Полученные результаты обрабатывали статистически. Значения, указанные в таблице 1, являются средними математическими показателями и отражают стандартное среднее квадратичное отклонение. Для изучения дыхания на уровне тканей, проведен количественный анализ адениновых нуклеотидов (АТФ, АДФ) и никотиновых коферментов (НАД⁺, НАДФ) в листьях хлопчатника под действием стресса, полученные результаты представлены в таблице 1.

Влияние радиационного и солевого стресса на содержание адениновых нуклеотидов и никотиновых коферментов в листьях хлопчатника

Вариант	АТФ, АДФ, мкг						НАД ⁺ , НАДФ, мкг					
	10 день		20 день		30 день		10 день		20 день		30 день	
	АТФ	АДФ	АТФ	АДФ	АТФ	АДФ	НАД ⁺	НАДФ	НАД ⁺	НАДФ	НАД ⁺	НАДФ
Радиация, Гр.												
К	62,0	34,0	67,5	20,5	74,0	12,0	171,8	96,1	169,6	933,7	139,1	66,4
1	63,0	26,0	72,0	22,0	81,0	21,0	173,0	92,3	172,3	90,9	141,6	59,3
5	62,0	32,0	64,0	30,0	76,0	23,0	174,7	93,1	171,8	90,0	142,1	56,6
10	61,0	28,0	62,0	27,0	64,0	25,0	175,5	92,0	174,4	88,14	143,7	54,4
50	55,0	14,0	61,0	12,0	68,0	7,0	189,7	90,6	178,5	85,7	145,8	51,6
100	48,0	13,0	54,0	11,0	56,0	10,0	188,9	78,9	178,7	76,2	146,1	49,5
200	37,0	7,0	47,0	5,0	47,0	9,0	166,8	77,7	162,9	74,6	137,3	47,7
NaCl, мМ												
К	39,3	12,0	41,0	13,0	47,0	17,6	144,4	78,3	133,6	73,9	122,6	67,8
1	32,0	9,0	42,0	14,0	58,0	14,0	130,3	75,5	128,9	72,5	120,7	61,5
5	36,0	10,0	37,0	15,0	45,0	11,0	129,8	74,3	126,0	69,7	115,6	58,7
10	32,0	5,0	33,0	14,0	34,0	9,0	134,3	72,2	132,7	68,5	116,4	56,9
50	25,0	1,0	25,0	15,0	35,0	9,0	135,7	71,7	134,0	65,8	115,1	54,7
100	23,0	1,0	25,0	8,0	30,0	7,0	132,7	70,1	131,9	63,9	113,2	51,7

Примечание: АТФ – аденозинтрифосфат; АДФ – аденозиндифосфат; НАД⁺ – никотинамидадениндинуклеотид; НАДФ – никотинамидадениндинуклеотиддифосфат. Показатель точности ниже 3 %.

Как видно из таблицы 1, во всех экспозициях контрольных и экспериментальных вариантов количество АТФ от воздействия стресса постепенно увеличивалось с течением времени, уменьшаясь при последующих дозах облучения, несмотря на незначительное повышение при низких дозах облучения. Это снижение составило 10-20 % по сравнению с низкими дозами облучения 1-100 Гр. В отличие от АТФ, изменения количества АДФ были другими. Таким образом, количество АДФ в контрольном и опытных вариантах снижалось с течением времени в течение активной фазы роста растения. Как видно из таблицы 1, снижение количества АДФ охватывает все дозы облучения. Наибольшее снижение количества АДФ наблюдалось при дозировке 200 Гр.

Как упоминалось выше, в то время как количество АТФ со временем увеличивалось из-за радиационного стресса в листьях хлопчатника, количество никотиновых коферментов, наоборот, уменьшалось. При этом у 10, 20 и 30-дневных растений содержание НАД⁺ постепенно увеличивалось при дозах облучения 1-100 Гр, а при последующих дозах облучения, как видно из таблицы 1, уменьшалось. На основании полученных результатов было замечено, что существуют аналогичные вариации между количеством АДФ и количеством НАДФ⁺ в зависимости от времени и доз радиации. Полученные результаты можно объяснить тем, что угнетение гликолиза при радиационном и солевом стрессе вызывает ослабление синтеза АТФ в цикле Кребса, что снижает энергоснабжение тканей.

Кун и др. доказали, что высокая концентрация NaCl в горохе активирует альтернативный путь дыхания, который не связан с синтезом АТФ. При этом

ослабление цитохромного пути дыхания ослабляет и синтез АТФ [6].

В отличие от действия радиации, количество АТФ и АДФ в клетках листа местного сорта хлопчатника Гянджа-182 при различных концентрациях NaCl изменялось по-разному по сравнению с контролем. Как видно из таблицы 1, количество АТФ в контроле и концентрации NaCl в листьях 10-, 20- и 30-дневных растений с течением времени постепенно увеличивались. Однако в каждый день эксперимента увеличение концентрации соли вызывало снижение количества АТФ по сравнению с контролем, а количество АДФ увеличивалось со временем в контрольном и солевом вариантах в условиях солевого стресса, в отличие от радиационного. В день каждого эксперимента количество АДФ увеличивалось при низких концентрациях соли, но уменьшалось при последующих концентрациях соли.

Анализ результатов, приведенных в таблице 1, относительно количества никотиновых коферментов, показывает, что количество НАД⁺ и НАДФ со временем уменьшалось во всех вариантах под влиянием радиационного и солевого стресса. В обоих стрессовых условиях количество НАД⁺ и НАДФ в контрольных вариантах выше, чем во всех вариантах. Как видно из таблицы 1, на 10-й и 20-й дни развития растений количество НАД⁺ увеличивалось при повышении концентрации соли от 1 мМ до 50 мМ и уменьшалось при концентрации 100 мМ. Стимулирующее действие 1-50 мМ NaCl на адаптационные процессы у растений со временем ослабевало, поэтому количество НАД⁺ уменьшалось с увеличением концентрации NaCl у 30-дневных растений. В отличие от НАД⁺, количество НАДФ постепенно снижается со

временем и в зависимости от концентрации при всех воздействиях соли (табл. 1).

На основании полученных результатов можно сказать, что количественные изменения АТФ, АДФ, являющихся основными параметрами энергообмена в клетках листьев хлопчатника, и количественные изменения НАД⁺ и НАДФ происходят синхронно, и в это время окисление НАД⁺ сопровождается выделением энергии, а его восстановление – поглощением энергии. Обработанные НАДФ затем участвуют в процессе выработки энергии. При стрессе молярные количества НАД⁺ и НАДФ значительно повышены, что свидетельствует об их окислении под влиянием стресса, а НАД⁺ и НАДФ снижены, что свидетельствует о взаимном соответствии активности аденин-фосфатов и никотиновых коферментов.

На основе полученных данных можно отметить, что адениновые нуклеотиды и никотиновые коферменты могут участвовать в регуляции энергетического метаболизма клетки и генерации адаптивных признаков за счет высокой регуляции активности ОАД-азы, осуществляющей биосинтез пирувата в условиях радиационного и солевого стресса.

Сходное и параллельное увеличение количества никотиновых коферментов (НАД⁺, НАДФ) в норме и при стрессе, снижение АТФ за счет адениновых коферментов и увеличение АДФ доказывают их эффективную роль в регуляции энергетического баланса организма в условиях высокой радиации и концентрации солей.

Список литературы

1. Касумов Н.А. Механизм действия солей на растительный организм. Физиолого-биофизические аспекты механизма действия солей на растения. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 184 с.

2. Абдыев В.Б., Касумов Н.А. Поглощение кислорода корнями растения при кратковременном и длительном воздействии солей // Доклады Национальной Академии Наук Азербайджана. 2012. № 5. С. 75-84.

3. He W., Hou H. Chemistry of Biomimetic mixed valence oxomanganese-based materials mimicking photosynthetic water splitting // Contemporary problems of Photosynthesis. Izhevsk–Moscow: Institute of Computer Science, 2014. Vol. 1. PP. 381-405.

4. Физиология растений / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балнокин, В.Ф. Гавриленко [и др.]. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 640 с.

5. Wahl R.A., Kozaloff L.M. The nucleotide triphosphate content of various bacteriophages // J. Biol. Chem. 1962. Vol. 237. № 6. P. 1953.

6. Физиологические характеристики и альтернативный путь дыхания у двух сортов пшеницы, различающихся по солеустойчивости / И. Кун, Г. Чжоу, Ю. Бу [и др.] // Физиол. раст. 2001. Т. 48. С. 692-698.

INVESTIGATION OF THE QUANTITY OF ADENINE NUCLEOTIDES AND NICOTINE COFERMENTS IN COTTON LEAVES UNDER RADIATION AND SALT STRESS

Alakbarova Sh.E.

Azerbaijan State Agricultural University (Faculty of Agronomy), Ozan st. 146, Ganja, Republic of Azerbaijan, AZ2000
e-mail: shahla.alakbarova.551@gmail.com

The article discusses the dynamics of changes in the amount of adenine nucleotides and nicotinic coenzymes during the first 10, 20 and 30 days of development of seedlings formed during the sowing of seeds of the *Gossypium hirsutum* L. plant energy status under stress.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L, radiation, salt, ADP, ATP, NAD, NADP, stress

Based on the results obtained, it can be said that the quantitative changes in ATP, ADP, which are the main parameters of energy metabolism in the cells of cotton leaves, and the quantitative changes in NAD⁺ and NADP occur synchronously, and at this time, the oxidation of NAD⁺ is accompanied by the release of energy, and its restoration is accompanied by absorption energy. The processed NADPs are then involved in the energy production process. Under stress, the molar amounts of NAD⁺ and NADP are

significantly increased, which indicates their oxidation under the influence of stress, and NADH and NADP are reduced, which indicates the mutual correspondence of the activity of adenine phosphates and nicotinic coenzymes.

The results obtained provide a basis for the fact that adenine nucleotides and nicotinic coenzymes can participate in the regulation of cell energy metabolism and the generation of adaptive traits due to the high regulation of the activity of OAD-ase, which

biosynthesises pyruvate. under conditions of radiation and salt stress.

A similar and parallel increase in the amount of nicotinic coenzymes (NAD⁺, NADPH) in normal conditions and under stress, a decrease in ATP due to

adenine coenzymes, and an increase in ADP prove their effective role in regulating the body's energy balance under conditions of high radiation and salt concentration.

УДК 636.085.3:577.18:543:54.724:539.1.04

СРАВНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА НАТИВНУЮ СТРУКТУРУ БЕЛКА

Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Браун А.В.¹, Хмелевский О.Ю.¹, Ухина П.М.^{1,а}, Ипатова В.С.², Никитченко А.Д.¹, Черняев А.П.^{1,2}, Юров Д.С.², Родин И.А.^{1,3}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Российская Федерация

e-mail: ^а polya.ukhina@mail.ru

В работе представлены результаты воздействия ионизирующего излучения разной мощности на структурные характеристики белка бычьего сывороточного альбумина (БСА) в водном растворе с помощью разработанного метода количественной оценки содержания нативной формы молекул путем идентификации уникальных пептидов доменных структур белка с использованием жидкостной хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения. Приведено сравнение облучения образцов БСА пучком ускоренных электронов с энергией 1 МэВ при мощностях 3,7 Гр/с и 18,5 Гр/с и рентгеновским излучением с энергией 60 кэВ при мощностях 0,9 Гр/с и 1,8 Гр/с в дозах 0,15–8 кГр. Поглощенная доза в объеме образца оценивалась с помощью ферросульфатного метода дозиметрии. Было показано, что при большей мощности излучения увеличивается количество молекул белка с повреждениями нативной структуры. Отмечен различный характер кривых уменьшения концентрации пептидов БСА в зависимости от дозы при воздействии ускоренными электронами и рентгеновским излучением.

Ключевые слова: белок бычий сывороточный альбумин, ускоренные электроны, рентгеновское излучение, жидкостная хроматография, мощность дозы

Радиационная обработка активно применяется в качестве метода обработки сельскохозяйственной продукции от насекомых [1], при производстве кормов и кормовых добавок для животных, для радиационной обработки продуктов питания [2]. Также радиационную обработку применяют для селекционно-генетических исследований [3], она позволяет стимулировать скорость роста и развития растений [1], и иммунитет животных [4].

В зависимости от задач радиационной обработки применяются различные диапазоны доз ионизирующего излучения. Воздействие в малых дозах на клетки может стимулировать их рост и деление, при воздействии больших доз – подавлять размножение патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, но при этом воздействие может приводить к изменению клеточных структур в тканях за счет прямых реакций или при взаимодействии с радикалами, образующимися вследствие ионизации молекул.

Воздействие излучения на биологические объекты может повреждать клеточные структуры, различные высоко- и низкомолекулярные вещества, содержащиеся в межклеточном пространстве. Все эти процессы значительно могут влиять на биохимические свойства биообъектов в результате изменения межмолекулярных связей в клетках тканей [5].

Так, например, при радиационной обработке происходят разрывы химических связей белковых молекул как в результате взаимодействия с радикалами, образующимися в результате радиолиза воды, так и при прямом поглощении энергии излучения. В аминокислотах, формирующих нативную структуру белковых молекул, происходит отщепление или присоединение водорода, карбоксильной группы аминокислот в виде CO₂ и NH₃, сшивка аминокислот и изменение количественного соотношения между ними. В результате молекулярных процессов возможен распад или агрегация белков, образование новых

соединений полипептидов [5]. Инициаторами многих реакций белковых превращений являются ферменты. Так как большинство ферментов сами являются белками, они так же изменяются под воздействием ионизирующего излучения. Следовательно, между процессами разрушения белков и ферментов происходит конкуренция, которая влияет на конечный химический состав вещества [5].

При радиационной обработке возможна полная или частичная деструкция белков. В исследованиях [5] показано, что при облучении в дозах 1-6 кГр разрушается вторичная и третичная структура белка, но сохраняется его первичная структура, тем самым улучшается усваиваемость макромолекул у людей с различными заболеваниями желудочно-кишечного тракта и другими проблемами с перевариванием пищи. В ряде статей, посвященных радиационной пищевой обработке, показано, что аминокислотный состав белков сохраняется неизменным в дозах до 10кГр [5-7]. Выраженность эффектов от воздействия ионизирующего излучения зависит от параметров обработки и от особенностей биологической системы.

В биологических исследованиях в качестве модельного часто применяется белок бычий сывороточный альбумин (БСА) [5]. Количество данного белка в плазме крови составляет более 50 % от всех белков. Он относится к группе альбуминов – простых, растворимых в воде белков, последовательности цепочек аминокислот которых хорошо изучены.

Альбуины содержатся как в продуктах животного происхождения, так и в продуктах растительного происхождения.

Цель данной работы состояла в исследовании влияния разных типов ионизирующего излучения при различных мощностях на структурные характеристики белка жидкостной хроматомасс-спектрометрией высокого разрешения.

В качестве исследуемого образца был выбран белок бычий сывороточный альбумин в водном растворе.

Установление присутствия белка бычьего сывороточного альбумина в активной (нативной) форме в водном растворе и количественная оценка его содержания в контрольных и облученных образцах проводилась с использованием метода жидкостной хроматомасс-спектрометрией с тандемным масс-спектрометрическим детектированием высокого разрешения (ВЭЖХ-МС/МС).

Образцы БСА в физиологическом 0,9 % растворе NaCl с разведением до концентрации 0,5 мг/л помещались в микроцентрифужные пробирки по 2 г и облучались в дозах от 0,15 кГр до 8 кГр на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ при мощностях 3,7 Гр/с и 18,5 Гр/с (НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына) и рентгеновской трубкой 1БПВ23-100 с энергией 60 кэВ (ГНЦ имени А.И. Бурназяна) при мощностях 0,9 Гр/с и 1,8 Гр/с. Схема облучения источниками ионизирующего излучения представлена на рисунке 1.

а) Источник пучка электронов б) Источник рентгеновского излучения

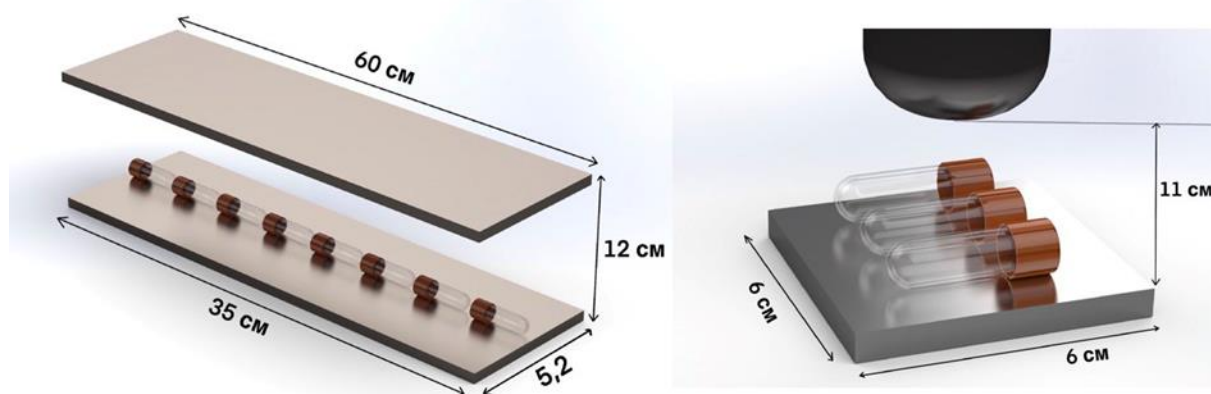


Рисунок 1. Схема облучения образцов на:

- а) непрерывном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ;
- б) рентгеновской трубке с энергией 60 кэВ

Для оценки поглощенной дозы в объеме образца использовался ферросульфатный метод дозиметрии. По изменению оптической плотности в растворе $FeSO_4$, облучаемом при тех же условиях, что и опытные образцы, была рассчитана поглощенная доза. Исходя из данных значений мощности и времени накопления заряда при каждом облучении образцов

были рассчитаны дозы, поглощенные образцами БСА.

Для количественной оценки молекул БСА, сохранивших первичную структуру после облучения в разных дозах, был разработан и апробирован метод, включающий в себя ферментативный гидролиз с использованием трипсина и выделение, подсчет и

анализ содержания уникальных пептидов белка, по наличию которых оценивалась структурная целостность молекул. Подсчет уникальных пептидов, содержащихся в доменах белковых молекул, проводился с помощью ВЭЖХ–МС/МС.

Полученные зависимости изменения концентрации уникальных пептидов от поглощенной дозы показали, что с увеличением дозы облучения концентрация пептидов в водном растворе становилась меньше независимо от типа излучения, а следовательно, меньше концентрация нативного белка БСА. При одной и той же дозе при большей мощности излучения количество повреждений нативной формы белка было больше по сравнению с меньшей мощностью излучения. Так, при радиационном воздействии со средней мощностью 3,7 Гр/с с увеличением дозы наблюдалось уменьшение содержания нативной формы БСА в водном растворе на 20-30 % каждый раз по сравнению с предыдущими значениями для доз 0,15 кГр, 0,3 кГр, 0,45 кГр, 0,6 кГр и 1,0 кГр. При дозе 4 кГр концентрация пептидов снизилась в 4-5 раз по сравнению с контрольными значениями. При облучении в дозе 8 кГр пептиды не были обнаружены или их концентрации не были достаточны для определения методом ВЭЖХ–МС/МС. При средней мощности 18,5 Гр/с концентрация нативной формы БСА снизилась в два раза по сравнению с контрольным значением при дозе 0,15 кГр. В диапазоне доз от 0,15 кГр до 1,0 кГр концентрация изменилась не более, чем на 10 %. При дозе 4 кГр концентрация составила 10-20 % от контрольного значения. Данные изменения, вероятно, связаны с денатурацией белка в результате разрыва пептидных связей молекул с образованием низкомолекулярных фрагментов.

Список литературы

1. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Г.В. Козьмин, Н.И. Санжарова, И.И. Кибина [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 5. С. 87-92.

2. Тышкыбаева С.Б., Ошакбаева Н.М., Степасюк В.С. Использование ионизирующих излучений при производстве кормов и кормовых добавок для сельскохозяйственных животных // 3I: Intellect, idea, innovation – интеллект, идея, инновация. 2016. №1-1. С. 108-113.

3. Ramazan Beyaz, Mustafa Yildiz. Breeding The Use of Gamma Irradiation in Plant Mutation Breeding // Intech. DOI: 10.5772/intechopen/69974.

4. Effect of low dose gamma-radiation upon Newcastle disease virus antibody level in chicken / M. Vilić, Ž. Gottstein, Grozdanić I. Ciglar [et al.] // Iran. J. Radiat. Res. 2009. Vol. 7(1). PP. 27-31.

5. Исследование влияния ускоренных электронов на структурные характеристики бычьего сывороточного альбумина с использованием жидкостной хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения / А.В. Браун, У.А. Близнюк, П.Ю. Борщегородская [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 3. С. 14-24.

6. Giroux M., Lacroix M. Nutritional adequacy of irradiated meat – a review // Food Res. Int. 1998. Vol. 31. № 4. PP. 257-264. DOI: 10.1016/S0963-9969(98)00092-1.

7. Spectroscopic study of gamma irradiation effect on the molecular structure of bovine serum albumin / H. Zarei, M. Bahreinipour, K. Eskandari [et al.] // Vacuum. 2016. Vol. 136. PP. 91-96. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.11.029.

COMPARISON OF THE EFFECT OF DIFFERENT POWERS OF ACCELERATED ELECTRONS AND X-RAYS ON THE NATIVE PROTEIN STRUCTURE

Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshevskaya P.Yu.^{1,2}, Brown A.V.¹, Khmelevsky O.Yu.¹, Ukhina P.M.^{1, a}, Ipatova V.S.², Nikitchenko A.D.¹, Chernyaev A.P.^{1,2}, Yurov D.S.², Rodin I.A.^{1,3}

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Trubetskaya st. 8, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991
e-mail: ^a polya.ukhina@mail.ru

The paper presents the results of exposure to ionizing radiation of different power on the structural characteristics of bovine serum albumin (BSA) protein in aqueous solution using the developed method of quantitative assessment of the native form content of molecules by identifying unique peptides of protein domain structures using high resolution liquid chromatomass spectrometry. Irradiation of BSA samples with accelerated electrons of 1 MeV at 3.7 Gy/s and 18.5 Gy/s and X-rays of 60 keV at 0.9 Gy/s and 1.8 Gy/s at 0.15 - 8 kGy doses are compared. The absorbed dose in the sample

volume, was estimated by ferrosulfate dosimetry. It was shown that at higher dose rates the number of protein molecules with damage of native structure increases. A different character of curves of BSA peptide concentration reduction in dependence on the dose when exposed to accelerated electrons and X-rays was noted.

Keywords: *bovine serum albumin, accelerated electrons, X-rays, liquid chromatography, dose rate*

The obtained dependences of changes in the concentration of unique peptides on the absorbed dose showed that as the radiation dose increased, the concentration of peptides in the aqueous solution became lower regardless of the type of radiation, and, consequently, the concentration of the native BSA protein became lower. At the same dose, the amount of damage to the native form of the protein was greater at higher radiation powers compared to lower radiation powers. Thus, under radiation exposure with an average power of 3.7 Gy/s, with increasing dose there was a 20-30 % decrease in the content of the native form of BSA in the aqueous solution each time compared to the

previous values for doses of 0.15 kGy, 0.3 kGy, 0.45 kGy, 0.6 kGy, and 1.0 kGy. At a dose of 4 kGy, the concentration of peptides decreased 4-5 times compared to the control values. At a dose of 8 kGy, peptides were not detected or their concentrations were not sufficient for determination by HPLC-MS/MS. At an average rate of 18.5 Gy/s, the concentration of the native form of BSA decreased by a factor of two from the control value at a dose of 0.15 kGy. In the dose range from 0.15 kGy to 1.0 kGy, the concentration changed by no more than 10 %. At a dose of 4 kGy the concentration was 10-20 % of the control value.

УДК 539.1.047

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАРТОФЕЛЯ, ЗАРАЖЕННОГО *RHIZOCTONIA SOLANI*

Зубрицкая Я.В.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Золотов С.А.¹, Ипатова В.С.², Чуликова Н.С.³, Черняев А.П.^{1,2}, Малюга А.А.³, Юров Д.С.²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, 630501, Новосибирская обл., Новосибирский р-он, р.п. Краснообск, ул. Центральная, д. 2Б, Российская Федерация

e-mail: ^аzubritckaia.iv18@physics.msu.ru

Данная работа посвящена исследованию влияния ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на биометрические параметры растений и фитосанитарное состояние клубней нового урожая картофеля сорта «Лина». Двухгодичное исследование показало снижение скорости роста и урожайности культуры при облучении дозами 20 Гр и более. Дозы выше 150 Гр в первый год и 200 Гр во второй полностью подавили прорастание картофеля. Тем не менее, радиационная обработка в дозах от 20 Гр до 150 Гр привела к снижению поражения нового урожая грибом *Rhizoctonia solani* на 9-100 % по сравнению с контрольными образцами в оба года наблюдений, тем самым повысив качество полученных клубней. С учетом суммарного влияния ионизирующего излучения на биометрические показатели культуры картофеля и степень подавления фитопатогенного гриба выработан эффективный диапазон доз обработки: от 22 Гр до 28 Гр в первый год исследования и не выработан во второй.

Ключевые слова: *картофель, Rhizoctonia solani, ионизирующее излучение, ускоренные электроны, урожайность, биометрические параметры, фитосанитарное состояние*

Картофель является не только одной из основных продовольственных сельскохозяйственных культур, но и служит ключевым сырьем для производства крахмала, глюкозы и спирта [1]. Необходимость

качественного посевного материала данной культуры подчеркивается проблемами, связанными с изменением климата. Глобальный рост температуры и повышение влажности неизбежно повлияют как на

запросы к семенному материалу, так и на распространенность различных бактериальных, вирусных и грибковых инфекций [2, 3]. Часто встречающиеся заболевания, вызываемые фитопатогенным грибом *Rhizoctonia solani*, широко распространены в мире и, в частности, в России. Мировые потери урожая картофеля от болезней ежегодно составляют до 11,6 % валового сбора [4, 5].

В промышленности для борьбы с инфекциями растений используются химически активные вещества и удобрения, применение которых может негативно повлиять на микрофлору почв и состояние окружающей среды, а также привести к росту устойчивости патогенов к действию химических реагентов. На сегодняшний день в связи с тенденциями перехода к экологически чистым технологиям в сельском хозяйстве учеными проводятся исследования по внедрению радиационной предпосевной обработки для микробиологической защиты растений и увеличения урожайности и скорости роста культур [6, 7].

В данной работе исследовалось влияние предпосадочной обработки клубней картофеля с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani*, низкоэнергетическими ускоренными электронами на рост, урожайность и фитосанитарное состояние клубней картофеля нового урожая.

В двухлетнем исследовании клубни картофеля сорта «Лина» с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* (*R. solani*), предоставленные СФНЦА РАН, подвергались облучению ускоренными электронами в дозах от 20 Гр до 3000 Гр в первый год исследования, и в дозах от 20 до 200 Гр – во второй. В качестве источника ионизирующего излучения был использован ускоритель электронов УЭЛР-1-25-Т-001 с максимальной энергией пучка 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт (НИИЯФ МГУ, Россия). В целях повышения равномерности облучения во время каждого сеанса обработки клубни картофеля подвергались облучению с двух противоположных сторон.

Контроль равномерности облучения проводился посредством компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения Geant4 (CERN, Швейцария), базирующегося на методе Монте-Карло. В результате моделирования было получено, что вся доза поглощалась в поверхностных слоях водной сферы, представляющей собой клубень картофеля, находящихся не глубже 4 мм. Таким образом, внутренние слои картофеля не подвергались воздействию излучения.

Полевые исследования, направленные на изучение фенологии и урожайности культуры, проводились на сельскохозяйственной опытной станции Элитная, расположенной в лесостепном Приобском районе в окрестностях г. Новосибирска. Полученный урожай проходил фракционный анализ и анализ

фитосанитарного состояния на предмет склероциальных и несклероциальных форм заболеваний, вызываемых *R. solani*.

По результатам полевых исследований для двух годов наблюдения выявлено отставание всех фаз роста растений, а именно всходов, бутонизации и цветения, а также снижение урожайности культуры для всех клубней, подвергшихся обработке ускоренными электронами. В первый год исследования обработка в дозах свыше 150 Гр ингибировала рост культуры, во второй год доза 200 Гр привела к полному подавлению нового урожая.

Фракционный анализ нового урожая показал рост средней фракции весом от 40 г до 80 г клубней при радиационной обработке в оба года исследования. Исключение составляет доза 150 Гр, облучение которой в первый год исследования увеличило численность картофеля крупной фракции весом более 80 г на 13,2 %, сведя малую фракцию весом менее 40 г клубней к нулю.

В оба года исследования удалось добиться полного ингибирования склероциальной формы ризоктониоза посредством облучения картофеля в дозе 150 Гр. Для доз менее 150 Гр также наблюдалось существенное подавление *R. Solani* на 9-96 % по сравнению с контрольными клубнями. В силу поверхностного характера обработки ускоренными электронами того же успеха в борьбе с несклероциальными формами заболеваний, залегающими в более глубоких слоях клубней, достичь не удалось.

На основании полученных данных об урожайности и фитосанитарном состоянии клубней нового урожая были построены кривые зависимостей эффекта ионизирующего излучения на культуру и поражающий ее фитопатоген в зависимости от поглощенной при обработке дозы (рис. 1). Общий вид зависимостей выражается формулой:

$$U(D) = \frac{u_1}{1 + \exp\{a_1(D - \bar{D}_1)\}} + \frac{u_2}{1 + \exp\{a_2(D - \bar{D}_2)\}}, \quad (1)$$

где $u_1 + u_2 = 1$ – максимальное значение функции; \bar{D}_i – дозы, при обработке в которых значение функции уменьшается вдвое, a_i – параметр скорости для функций статистических ансамблей, представляемых клубнями картофеля или фитопатогеном.

Эффективный дозовый диапазон обработки подбирался с учетом баланса между подавлением фитопатогенного гриба *R. Solani* на культуре и снижением ее урожайности. В первый год исследования было получено, что предпосевное облучение в диапазоне доз от (22±2) Гр до (28±2) Гр позволяет подавить склероциальные формы заболевания не менее чем на 10 % от контрольных значений при снижении урожайности культуры менее чем на 25 %.

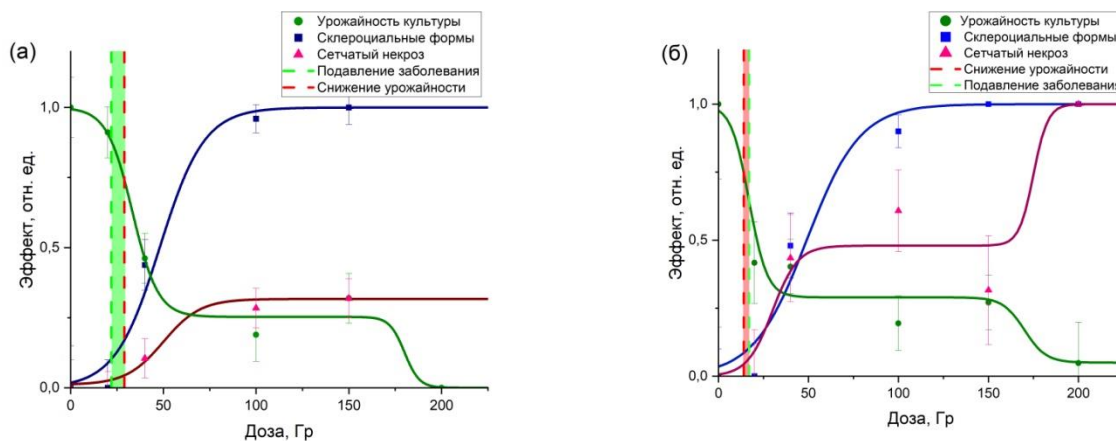


Рисунок 1. Зависимости показателей урожайности культуры и подавления грибкового заболевания на культуре от дозы облучения для: а) первого года; б) второго года исследования

Второй год исследования отличался более резким спадом показателей урожайности с увеличением дозы облучения, поэтому эффективного диапазона доз для него выработано не было.

Таким образом, эффективный дозовый диапазон радиационной предпосевной обработки клубней картофеля низкоэнергетическими ускоренными электронами составил от 22 Гр до 28 Гр в первый год исследования и не был выработан во второй год. Причиной различий дозового диапазона могли послужить как отличия в погодных условиях в разные годы полевых исследований, так и другие особенности условий высадки и состояние семенного материала, разнящиеся год от года.

Список литературы

1. Регулирование качества картофеля при выращивании. АГРОМАРТ [Электронный ресурс]. URL: <https://agro-mart.kz/regulirovanie-kachestva-kartofelya-pri-vyrashhivanii/> (дата обращения: 29.06.2023).

2. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward / B.K. Singh [et al.] //

Nature Reviews Microbiology. 2023. PP. 1-17. doi: 10.1038/s41579-023-00900-7.

3. The Potatoworld magazine Newsletter [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.potatoworld.eu/what-effect-does-climate-change-have-on-fungal-potato-diseases> (дата обращения 28.06.2023).

4. Роль предшественников в борьбе с ризоктониозом картофеля / А.А. Малуга [и др.] // Защита и карантин растений. 2011. № 1. С. 28-30.

5. Неменуца Л.А. Современные технологии защиты клубней картофеля в технологиях семеноводства // Защита картофеля. 2020. № 1. С. 15-16.

6. Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе Российской Федерации / Р.М. Алексахин [и др.] // Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 1. С. 78-85.

7. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Бондаренко В.С. Радиационные технологии в сельском хозяйстве: стратегия научно-технологического развития // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2016. № 1. С. 197-206.

EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON THE BIOMETRIC INDICATORS OF POTATO TUBERS INJECTED WITH *RHIZOCTONIA SOLANI*

Zubritskaya Ya.V.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Zolotov S.A.¹, Ipatova V.S.², Chulikova N.S.³, Chernyaev A.P.^{1,2}, Maluyga A.A.³, Yurov D.C.²

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Central st. 2B, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Russian Federation, 630501
e-mail: ^a zubritckaia.iv18@physics.msu.ru

This work investigates the impact of 1 MeV accelerated electrons on the biometric parameters and phytosanitary status of a new Lina variety potato crop tubers. A two-year study showed a decrease in the growth rate and crop yield when it was irradiated with doses of 20 Gy and more. Doses above 150 Gy in the first year and 200 Gy in the second year completely suppressed potato germination. However, irradiation at doses ranging from 20 Gy to 150 Gy resulted in a 9-100 % reduction in *Rhizoctonia solani* infection of the new crops compared to control samples in both years of investigation, thereby increasing the quality of the resulting tubers. Taking into account the total effect of ionizing radiation on the biometric indicators of the potato culture and the degree of suppression of the phytopathogenic fungus, an effective dose range has been developed: from 22 Gy to 28 Gy in the first year of the study and not developed in the second year.

Keywords: potatoes, *Rhizoctonia solani*, ionizing radiation, accelerated electrons, crop yield, biometric parameters, phytosanitary state

УДК 539.1.047

ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МЭВ НА РОСТ И ВЫЖИВАЕМОСТЬ БАКТЕРИЙ *ESCHERICHIA COLI* И ГРИБОВ *ASPERGILLUS FUMIGATUS*

Иванцова В.С.^{1,a}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Ипатов В.С.², Насибов Э.М.³, Никитина З.К.³, Черняев А.П.^{1,2}, Юров Д.С.²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», 117216, г. Москва, ул. Грина, д. 7, Российская Федерация
e-mail: ^a ivantcova.vs@physics.msu.ru

Проведено исследование по влиянию ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на выживаемость суспензий бактерий *Escherichia coli* в физиологическом растворе и суспензий грибов *Aspergillus fumigatus* при различных начальных концентрациях и с последующим после облучения высеванием на различные питательные среды. Облучение образцов проводилось в диапазоне доз от 0,15 кГр до 4 кГр. Установлено нелинейное снижение концентраций жизнеспособных клеток бактерий и грибов от дозы облучения. Дозы, необходимые для сокращения популяций в 10 раз составили от 0,20 кГр до 0,56 кГр для *Escherichia coli* при начальных концентрациях от 10³ КОЕ/г до 10⁵ КОЕ/г при высевании на агаризованную тиогликолевую среду; 1,14 кГр и 1,09 кГр для *Aspergillus fumigatus* в начальной концентрации 10⁶ КОЕ/г при высевании на среды Сабуро и Чапека-Докса соответственно.

Ключевые слова: радиационная обработка, электронное излучение, доза облучения, доза D10, бактерии *Escherichia coli*, грибы *Aspergillus fumigatus*

Продукты питания являются благоприятной средой для размножения широкого спектра микроорганизмов, включая условно-патогенные и патогенные бактерии, плесневые грибы, а также различные вирусы и паразиты, опасные для жизнедеятельности человека. По данным Всемирной Организации Здравоохранения, ежегодная смертность от заболеваний пищевого происхождения достигает 420 тысяч человек, и в мире остро стоит вопрос обеспечения безопасности продуктов питания на всех этапах их производства и транспортировки [1].

Во всем мире наблюдается возрастающий интерес к использованию методов радиационной обработки в пищевой и сельскохозяйственной отрасли для сохранения качества продуктов питания и достижения их микробиологической безопасности. Использование источников ионизирующего излучения, таких как ускоренные электроны с энергией до 10 МэВ, тормозное и рентгеновское излучения с энергией до 5 МэВ и гамма-излучение от источников ⁶⁰Со и ¹³⁷Cs, позволяет обеспечить высокую

микробиологическую и радиационную безопасность продуктов без изменения их вкусовых качеств [2].

Работы по исследованию влияния ионизирующего излучения на микробиологические, биохимические и органолептические показатели продуктов питания с целью изучения радиочувствительности различных микроорганизмов, населяющих пищевую продукцию, ведутся по всему миру [3-8]. В отношении продуктов мясного и рыбного происхождения исследуется жизнеспособность микроорганизмов, наиболее часто встречающихся в продуктах, требующих термическую обработку. Такими микроорганизмами являются условно-патогенные и патогенные бактерии родов *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Listeria* и др., а также плесневые грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Cryptococcus* и др.

Целью данного исследования было изучение влияния ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на изменение концентраций жизнеспособных клеток суспензий бактерий *Escherichia coli* при различных начальных концентрациях и суспензий грибов *Aspergillus fumigatus* при последующем высевании на различные питательные среды Сабуро и Чапека-Докса от дозы облучения.

В качестве объектов исследования использовались условно-патогенные бактерии *Escherichia coli* (референтный штамм Американской коллекции типовых культур (ATCC) – *Escherichia coli* ATCC 25922), выращенные на агаризованной тиогликолевой среде в течение суток при 37 °С в стерильных условиях, и грибы *Aspergillus fumigatus*, выращенные в течение 3 суток при 25-27 °С на агаризованной среде Сабуро. Образцы бактерий и грибов были предоставлены из коллекции чистых культур ФГБНУ ВИЛАР. Начальные концентрации бактерий в суспензиях составили $(4,2 \pm 0,4) \cdot 10^3$, $(4,3 \pm 0,6) \cdot 10^4$ и $(5,0 \pm 0,7) \cdot 10^5$ КОЕ/г. Начальные концентрации спор грибов в суспензиях составили $(3,7 \pm 0,3) \cdot 10^6$ КОЕ/г для среды Сабуро и $(2,6 \pm 0,2) \cdot 10^6$ КОЕ/г для модифицированной среды, содержащей солевой фон среды Чапека-Докса с заменой сахарозы на 2 % коллаген.

Суспензии бактерий и грибов по 0,5 мл помещались в стерильные пробирки типа Эппендорф объемом 2 мл. Общее количество подготовленных образцов суспензий бактерий и грибов составило 36 и 28 штук соответственно, экспериментальные исследования проводились в двух итерациях.

Облучение суспензий бактерий и грибов проводилось на ускорителе электронов УЭЛР-1-25-Т-001 (НИИЯФ МГУ, Россия) с максимальной энергией 1 МэВ, средним током пучка 200 ± 5 нА при температуре

окружающей среды 20 °С. Образцы в количестве 6 штук выкладывались на дюралюминиевую пластину на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов. Контроль и расчет дозы, поглощенной образцами, проводился с использованием инструментария Geant4 (ЦЕРН, Швейцария). Дозы облучения составили 0,15 кГр, 0,3 кГр, 0,6 кГр, 1 кГр и 4 кГр для бактерий *E.coli*; образцы суспензий *A.fumigatus* облучались в дозах 0,25 кГр, 0,5 кГр, 1 кГр, 1,5 кГр, 2 кГр и 3 кГр. Мощность дозы составила $(3,7 \pm 0,5)$ Гр/с.

После облучения для всех исследуемых образцов делались последовательные разведения с физиологическим раствором в соотношениях от 1:2 до 1:10000, и далее суспензии по 0,1 мл наносили на питательную среду (агаризованная тиогликолевая среда для бактерий, модифицированная среда и среда Сабуро для грибов). На третьи сутки после облучения происходил подсчет концентрации жизнеспособных клеток (в КОЕ/г) для облученных и контрольных образцов.

По результатам исследования были построены зависимости концентраций жизнеспособных микроорганизмов от дозы облучения (рис. 1а и рис. 2а) и зависимости $\log_{10}(N/N_0)$ от дозы облучения, по которым определялись значения доз D_{10} как обратные коэффициенты наклона прямых (рис. 1б и рис. 2б).

Из рисунка 1б видно, что с увеличением начальной концентрации бактерий *E.coli* с 10^3 КОЕ/г до 10^5 КОЕ/г значение D_{10} увеличивается от $(0,20 \pm 0,03)$ кГр до $(0,56 \pm 0,07)$ кГр соответственно. При начальной концентрации 10^4 КОЕ/г значение D_{10} составило $(0,31 \pm 0,06)$ кГр. Таким образом, при увеличении начальной обсемененности продукта необходимо воздействовать на него в большей дозе для подавления микробиологической контаминации до определенного уровня.

Из рисунка 2 видно, что статистически значимых различий в концентрациях грибов *A. fumigatus*, выращенных на разных питательных средах после обработки различными дозами электронного излучения, обнаружено не было. Значения дозы D_{10} совпали в пределах погрешности измерений для обеих питательных сред и составили $(1,14 \pm 0,09)$ кГр и $(1,09 \pm 0,11)$ кГр для среды Сабуро и модифицированной среды соответственно.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что на эффективность радиационной обработки пищевой продукции могут оказывать влияние как начальная обсемененность микроорганизмов и их штаммы, так и тип продукции, температура хранения, источник ионизирующего излучения и др.

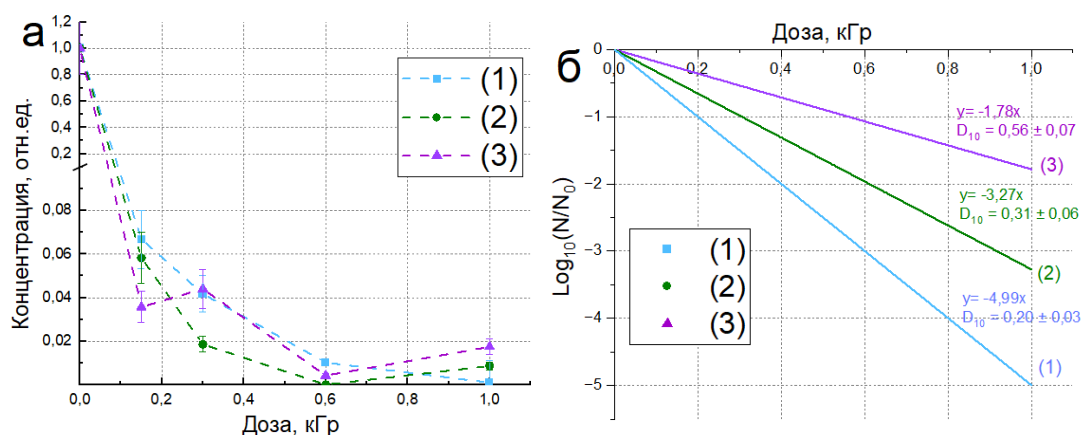


Рисунок 1. Зависимости относительной концентрации *Escherichia coli* (а) и $\text{Log}_{10}(N/N_0)$ (б) от дозы облучения для различных начальных концентраций 10^3 КОЕ/г (1), 10^4 КОЕ/г (2) и 10^5 КОЕ/г (3)

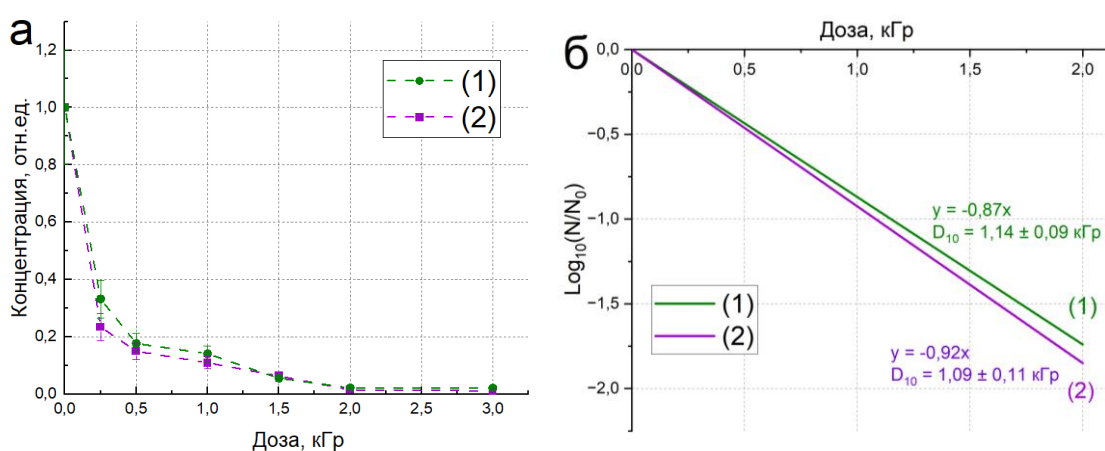


Рисунок 2. Зависимости относительной концентрации *Aspergillus fumigatus* (а) и $\text{Log}_{10}(N/N_0)$ (б) от дозы облучения при высевании на различные питательные среды: среда Сабуро (1) и модифицированная среда (2)

Экспериментально установлено, что при большей начальной обсемененности продукта для подавления концентрации микроорганизмов в N раз необходима большая доза облучения, чем для подавления в N раз микроорганизмов с меньшей начальной концентрацией.

Показано, что грибы *Aspergillus fumigatus* более радиоустойчивы к воздействию низкоэнергетических ускоренных электронов по сравнению с бактериями *Escherichia coli*, что необходимо учитывать при выборе дозы облучения при проведении радиационной обработки продуктов с различным микробиологическим составом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

Список литературы

1. Estimating the burden of foodborne diseases, WHO, Geneva, Switzerland. Retrieved from:

<https://www.who.int/activities/estimating-the-burden-of-foodborne-diseases>.

2. Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food, ISO/TC 34 Food products, ICS: 67.020 Processes in the food industry, Geneva, Switzerland. 2004. PP. 7-39.

3. Adu-Gyamfi A., Torgby-Tetteh W., Appiah V. Microbiological quality of chicken sold in Accra and determination of D 10-value of *E. coli* // Food and Nutrition Sciences. 2012. Vol. 3. PP. 693-698.

4. Sommers C.H., Scullen O.J., Sheen S. Inactivation of uropathogenic *Escherichia coli* in ground chicken meat using high pressure processing and gamma radiation, and in purge and chicken meat surfaces by ultraviolet light // Front Microbiol. 2016. Vol. 7. PP. 1-6.

5. Inactivation of extraintestinal pathogenic *E. coli* clinical and food isolates suspended in ground chicken meat by gamma radiation / A. Xu [et al.] // Food Microbiology. 2019. Vol. 84. 103264.

6. Radiation sensitivity of *Aspergillus flavus* in semi-dried beef jerky / J. Lee [et al.] // Food Science and Biotechnology. 2004. Vol. 13(5). PP. 613-615.

7. N. Aziz et al. Reduction of fungi and mycotoxins formation in seeds by gamma-irradiation // Journal of Food Safety. 2004. Vol. 24. PP. 109-127.

8. Aziz N.H., Moussa L.A.A., Far F.M.E. Radiosensitization of *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum* using basil essential oil and ionizing radiation for food decontamination // Food Control. 2014. Vol. 45. PP. 156-162.

IMPACT OF 1 MEV ACCELERATED ELECTRONS ON GROWTH AND SURVIVAL OF BACTERIA *ESCHERICHIA COLI* AND FUNGUS *ASPERGILLUS FUMIGATUS*

Ivantsova V.S.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Ipatova V.S.², Nasibov E.M.³, Nikitina Z.K.³, Chernyaev A.P.^{1,2}, Yurov D.S.²

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Federal State Budget Scientific Institutional «All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants», Grina st. 7, Moscow, Russian Federation, 117216

e-mail: ^a ivantsova.vs@physics.msu.ru

The effect of accelerated electrons with 1 MeV energy on the survival of *Escherichia coli* bacteria suspensions in physiological solution and *Aspergillus fumigatus* fungi suspensions at different initial concentrations and with subsequent inoculation on different nutrient media after irradiation was studied. The samples were irradiated in the dose range from 0.15 kGy to 4 kGy. A nonlinear decrease in the concentration of viable bacterial and fungal cells was detected with respect to the irradiation dose. The doses required to reduce the population by a factor of 10 were 0.20 kGy to 0.56 kGy for *Escherichia coli* at an initial concentration of 10³ CFU/g to 10⁵ CFU/g when plated on Thioglycollate Medium; 1.14 kGy and 1.09 kGy for *Aspergillus fumigatus* at an initial concentration of 10⁶ CFU/g when plated on Sabouraud Agar and Czapek-Dox medium, respectively.

Keywords: radiation treatment, electron radiation, radiation dose, D10 dose, *Escherichia coli* bacteria, *Aspergillus fumigatus* fungi

УДК 635.264: (631.531.027.2+581.1.043)

ВЛИЯНИЕ АКТИВАЦИИ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПЛАЗМОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ЛУКА-БАТУНА

Кайгородова И.М.^{1,a}, Марчева М.М.¹, Луканин В.И.², Козарь Е.Г.¹, Середин Т.М.¹, Ушаков В.А.¹, Данилейко Ю.К.², Белов С.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства», 143072, Московская обл., Одинцовский р-он, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук», 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, Российская Федерация

e-mail: ^a kaigorodova-i@mail.ru

В ФГБНУ ФНЦО (Московская область) в рамках национального проекта «Наука и университеты» организована новая лаборатория физиологических основ семеноведения овощных культур, где проводятся исследования и поиск новых методов предпосевной обработки семян с целью повышения посевных качеств семян. Совместно с

лабораторией ядерных технологий института ИОФ РАН начаты испытания водных растворов электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда, на всхожесть семян и развитие растений различных овощных культур. В статье представлены результаты применения данной технологии на культуре лук-батун

Ключевые слова: предпосевная подготовка, биоактивация семян, лук-батун, всхожесть, проростки, активация плазмой

Решение продовольственной безопасности нашей страны стало одним из основных направлений, необходимых для развития нашей экономики. Традиционные технологии уже не в состоянии обеспечить рост урожайности, а процесс интенсификации агротехнологических приемов выращивания сельскохозяйственных культур становится все более затратным и менее эффективным. В связи с этим необходим поиск принципиально новых методов повышения урожайности на всех этапах возделывания сельскохозяйственных культур, начиная с использования качественного посевного материала. Поэтому поиск новых способов повышения посевных качеств семян приведет к увеличению их конкурентоспособности и возможности максимально уйти от импорта.

В последнее время все более активно ведутся исследования с применением физических, химических и биологических воздействий, направленных на реализацию генетического потенциала, повышения неспецифической устойчивости к абиотическим и биотическим стрессам, усиления адаптивных свойств растений с целью роста и стабилизации урожая. В настоящее время уже накоплен определенный экспериментальный материал по эффективности физических способов стимулирования роста и развития растений. Например, известны приемы предпосевной обработки семян, с помощью которых можно увеличить всхожесть семян и урожайность сельскохозяйственных культур на 15-25 %, такие как ионизирующая радиация в малых дозах, звуковая, ударно-волновая и кратковременная тепловая обработки, экспонирование в электрических и магнитных полях, лазерное облучение, облучение ультрафиолетовыми и инфракрасными лучами и другие внешние физические воздействия [1, 2].

Ученые непрерывно разрабатывают совершенно новые экологически безопасные и экономически эффективные методы, одновременно обеззараживающие от семенной инфекции и стимулирующие прорастание семян сельскохозяйственных культур. Метод предпосевной обработки семян зерновых культур оптическим когерентным излучением для повышения урожайности известен еще с 70-80-х годов прошлого века. Ученые из Удмуртского ГАУ занимаются исследованиями технологии предпосевной оптической (лазерной) обработки семян сельскохозяйственных культур. Проведено испытание в условиях производства на сельскохозяйственных угодьях многих хозяйств Удмуртской Республики в 2018-2021 годы. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: лазерная предпосевная обработка улучшает устойчивость развития растений в неблагоприятных погодных условиях, повышает

полевую всхожесть семян, увеличивает кущение в ходе развития растений, позволяет существенно снизить норму высева семенного материала, увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур, снижает затраты на производство продукции растениеводства. Как результат, рост урожайности ячменя после лазерной предпосевной обработки составил 25 %, а пшеницы в разных хозяйствах республики от 3-7 % до 63-73 % [3].

В лаборатории биофизики Смоленской ГСХА для более эффективного применения плазменных технологий в сельском хозяйстве были разработаны базовые плазменные технологии для основных культур Нечерноземной зоны России: озимых и яровых зерновых, гречихи, льна-долгунца, горчицы, однолетних и многолетних трав, картофеля и кормовых культур, а также сои и амаранта [4].

Еще одним из перспективных способов воздействия на органические и неорганические структуры является излучение плазмы [5]. Воздействие плазмы близко по своей природе к импульсному концентрированному солнечному свету, а в качестве объекта для плазменной биоактивации могут быть использованы семена, т.е. биологические структуры, из которых формируется новый растительный организм. Предпосевная подготовка методом смачивания или замачивания семян в водных растворах электролитов, активированных тлеющим разрядом плазмы, на ряде сельскохозяйственных культур дали обнадеживающие результаты [6].

Цель исследований: изучить влияние различных электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда, на всхожесть семян и развитие растений лука-батуна.

Материал и методы

Лук-батун *Allium fistulosum* L. – сорт «Русский зимний». Семена были обработаны 1 % водными растворами электролитов KCl и KNO₃ без активации (исходные) и активированных плазмой при комнатной температуре (активированные). В качестве контрольных вариантов – сухие семена (без обработки) и семена, обработанные дистиллированной водой. Экспозиция замачивания семян – шесть часов, с последующим подсушиванием на воздухе до сыпучего состояния. На четвертые сутки после обработки производили посев семян в чашки Петри для определения лабораторной всхожести и в кассеты для выращивания рассады с торфосмесью для изучения роста и развития растений (рис. 1).

Лабораторную всхожесть определяли согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 12038-84

«Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Через месяц после посева провели измерение высоты сеянцев, а через три

месяца – определение сырой массы листьев растений после срезки пера.

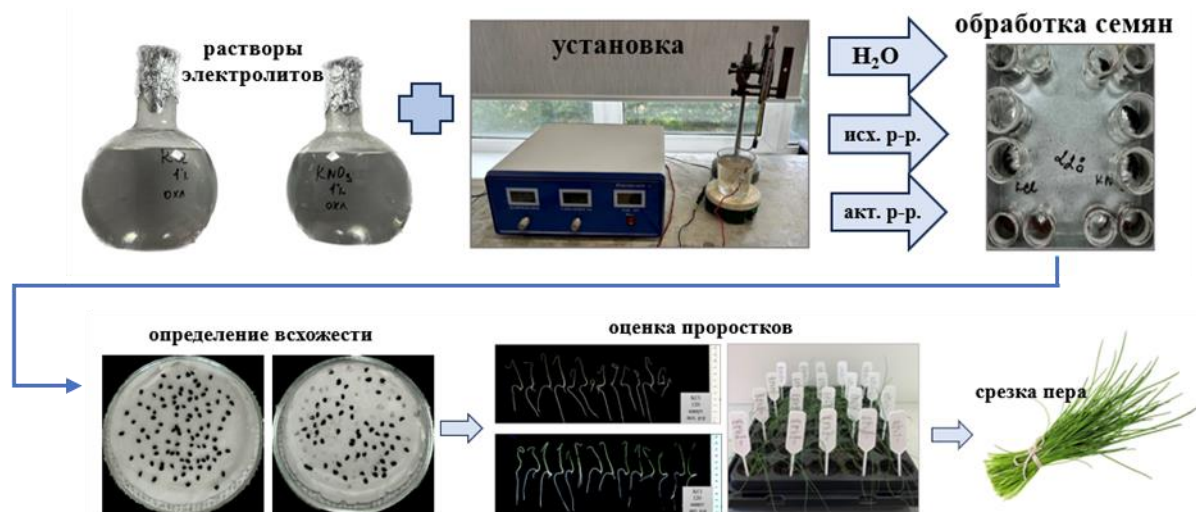


Рисунок 1. Общая схема эксперимента

Результаты исследований

Известно, что используемые для замачивания семян препараты по-разному влияют на посевные качества и развитие растений лука репчатого, не всегда давая ожидаемые результаты [7]. В наших исследованиях в зависимости от природы электролита также выявлено разнонаправленное действие исходных и активированных растворов на всхожесть и развитие

растений лука-батуна относительно контрольных вариантов (рис. 2).

Шестичасовое замачивание в дистиллированной воде и исходном растворе KCl заметно повысили лабораторную всхожесть семян до 95 % и 90 % соответственно. При замачивании в активированных плазмой растворах электролитов, как и в исходном растворе KNO_3 , показатели всхожести получены на уровне контрольного варианта с семенами без обработки (65-70 %).

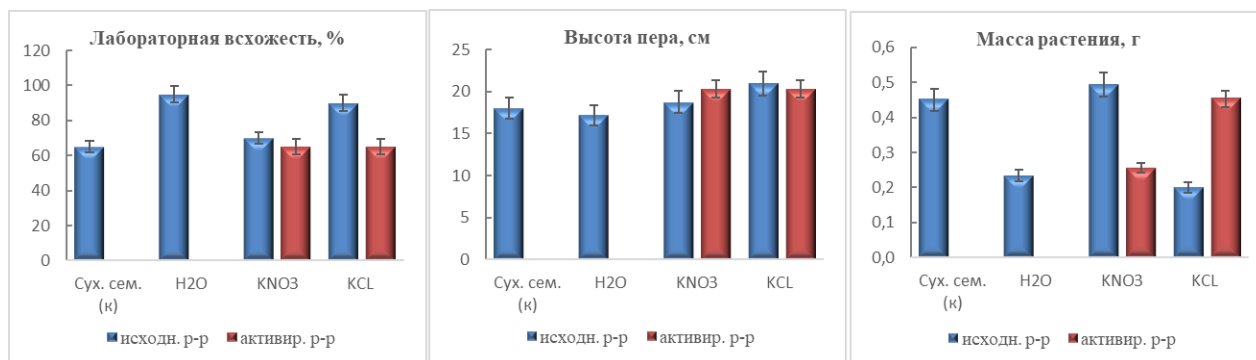


Рисунок 2. Лабораторная всхожесть семян, высота пера и масса растения лука-батуна в зависимости от варианта предпосевной обработки

В то же время на высоту сеянцев в целом отмечено благоприятное действие как исходных, так и активированных растворов электролитов – высота пера увеличилась на 4-22 % относительно варианта с замачиванием в дистиллированной воде, где выявлено ингибирование линейного роста листьев по сравнению с вариантом посева сухих семян без обработки. При этом наибольшая биологическая активность на данном этапе развития растений отмечена

при обработке семян активированным раствором KNO_3 .

Однако оценка дальнейшего развития растений лука-батуна показала более выраженные различия в направленности действия тестируемых растворов на накопление листовой биомассы. Так, максимальный положительный эффект отмечен при замачивании в исходном растворе KNO_3 , тогда как при использовании KCl лучший результат получен с использованием активации раствора плазмой тлеющего разряда.

Сырая масса одного растения в этих вариантах превышала или была на уровне показателей контрольного варианта – без обработки, но были в два раза выше, чем у варианта с замачиванием семян в дистиллированной воде.

Таким образом, полученные результаты лабораторного и оранжерейного опыта по испытанию водных растворов электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда, на всхожесть семян и развитие растений лука-батуна позволяют сделать следующие выводы:

- по эффективности действия на посевные качества семян они уступают исходным растворам, нивелируя стимулирующее влияние шестичасового замачивания в дистиллированной воде или в 1 % растворе KCl;

- на рост и развитие растений данные обработки оказывают разнонаправленное действие в зависимости от природы электролита и этапа онтогенеза, снижая негативное последствие замачивания в воде;

- на ранних фазах развития сеянцев они положительно влияют на линейный рост листьев, как и исходные растворы, однако в дальнейшем активированный раствор KNO₃ снижает свою биологическую активность относительно исходного, в то время как обработка плазмой высокочастотного тлеющего разряда раствора KCl приводит к повышению эффективности его стимулирующего действия на развитие растений лука-батуна.

Список литературы

1. Шмигель В.В. Сепарация и стимуляция семян в электрическом поле. Кострома: КГСХА, 2003. 233 с.

2. Веселова Т.В. Изменение состояния семян при их хранении, проращивании и под действием

внешних факторов (ионизирующего излучения в малых дозах и других слабых воздействий), определяемое методом замедленной люминесценции: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра биол. наук: 03 00.01-03 – радиобиология, 03 00 02-03 – биофизика. М., 2008. 48 с.

3. Крылов О.Н. Метод предпосевной обработки семян оптическим когерентным излучением. URL: <https://direct.farm/post/metod-predposevnoy-obrabotki-semyan-optiche-skim-kogerentnym-izlu-cheniym-22322> (дата обращения: 21.08.2023).

4. Гордеев Ю.А. Основные принципы формирования базовых плазменных технологий возделывания с.-х. культур // Плодородие. 2011. № 6. С. 5-7.

5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры // Отв. ред. С.И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005. 820 с.

6. Increase of productivity and neutralization of pathological processes in plants of grain and fruit crops with the help of aqueous solutions activated by plasma of high-frequency glow discharge / Y.K. Danileiko, S.V. Belov, A.B. Egorov [et al.] // Plants. 2021. Vol. 10(10). P. 2161. DOI: 10.3390/plants10102161.

7. Тымченко Л.Н., Карпунин М.Ю. Исследование всхожести семян многолетних луков при их предварительной обработке биопрепаратами и барботированием // От импортозамещения к экспортному потенциалу: научно-инновационное обеспечение производства и переработки продукции растениеводства: сборник трудов конференции. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет, 2021. С. 146-149.

EFFECT OF ACTIVATION OF ELECTROLYTE SOLUTIONS BY HIGH-FREQUENCY GLOW DISCHARGE PLASMA ON GERMINATION SEEDS AND PLANT DEVELOPMENT OF WELSH ONION

Kaigorodova I.M.^{1,a}, Marcheva M.M.¹, Lukanin V.I.², Kozar E.G.¹, Seredin T.M.¹, Ushakov V.A.¹

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center», Selektionsnaya st. 14, VNISSOK, Moscow region, Odintsovo district, Russian Federation, 143072

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Vavilova st. 38, Moscow, Russian Federation, 119991
e-mail: ^a kaigorodova-i@mail.ru

In the framework of the national project «Science and Universities», a new laboratory of physiological foundations of vegetable seed science has been organized in the FSBSI FSVC (Moscow region), where research and search for new methods of pre-sowing seed treatment are carried out to increase the sowing qualities of seeds. Together with the laboratory of nuclear technologies of the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, tests of aqueous solutions of electrolytes activated by the plasma of a high-frequency glow discharge for seed germination and the development of plants of various vegetable crops have begun. The article presents the results of the application of this technology on the welsh onion culture.

Keywords: pre-sowing preparation, bioactivation of seeds, welsh onion, germination, seedlings, plasma activation

As a result of testing of aqueous solutions of electrolytes activated by high-frequency glow discharge plasma, the following effects were revealed on the germination of seeds and the development of welsh onion plants:

- in terms of the effect on the sowing qualities of seeds, they are inferior to the initial solutions, leveling the stimulating effect of six-hour soaking in distilled water or in 1 % KCl solution;
- these treatments have a multidirectional effect on the growth and development of plants, depending

on the nature of the electrolyte and the stage of ontogenesis, reducing the negative aftereffect of soaking in water;

- in the early stages of seedling development, they positively affect the linear growth of leaves, as well as the initial solutions, however, in the future, the activated KNO₃ solution reduces its biological activity relative to the initial one, while plasma treatment of a high-frequency glow discharge of the KCl solution leads to an increase in the effectiveness of its stimulating effect on the development of welsh onion plants.

УДК 619:614.31:616:637.636.085.67

КОНЦЕНТРАЦИЯ БЕЛКОВОСВЯЗАННОГО ЙОДА И ГОРМОНОВ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ В КРОВИ ПРИ ЙОДОДЕФИЦИТНОМ СОСТОЯНИИ КРОЛИКОВ

Курбангалеев Я.М., Вагин К.Н.^а, Гайнутдинов Т.Р., Усольцев К.В., Идрисов А.М.

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности», 420075, г. Казань, ул. Научный городок-2, Республика Татарстан, Российская Федерация
e-mail: "kostya9938@yandex.ru*

В результате проведенных исследований спектрофотометрическим и иммуноферментным методами определено содержание белковосвязанного йода (БСЙ) и гормонов щитовидной железы (ЩЖ) в крови кроликов при добавлении в основной рацион (ОР) йодида калия и биологически активной добавки (БАД) «Ламинария – морская капуста БИО». Значения концентрации белковосвязанного йода в крови кроликов и гормонов щитовидной железы коррелируют между собой, а два использованных метода дополняют друг друга. Спектрофотометрический метод позволяет определить наличие или отсутствие йододефицита, а количество гормонов трийодтиронина и тироксина, которые регулируют основные процессы жизнедеятельности, характеризует функциональную активность щитовидной железы.

Ключевые слова: белковосвязанный йод, гормоны, щитовидная железа, методы определения, кормовая добавка, кровь, кролики

Введение

Йод является одним из микроэлементов, играющим решающую роль в развитии животных и сельскохозяйственной птицы [1]. Более половины всего йода, находящегося в организме, аккумулируется в тканях ЩЖ [2].

Тироксин и трийодтиронин образуются в фолликулярных клетках ЩЖ из аминокислоты тирозина и неорганического йода. Органический йод плазмы крови представлен в основном гормонами ЩЖ, связанными с глобулинами и частично с альбуминами. Связанный с белком йод плазмы крови от 90 % до 95 % состоит из тироксина, поэтому его уровень в крови служит критерием для оценки функционального состояния ЩЖ.

В ЩЖ йод окисляется до атомарного йода, который включается в молекулу тиреоглобулина с образованием органически связанного йода. Основными йодированными тиреоглобулинами являются производные аминокислоты тирозина – йодтирозин и

йодтиронин. Наиболее высокое содержание йода в тироксине – его молекула на 65 % состоит из йода. Йод в ЩЖ катализирует превращение тироксина в трийодтиронин. Около 2 % йода остается в неорганической форме (йодидов) и может возвращаться в плазму крови. Этот йод называется лабильно связанным. Из организма йод выводится от 70 % до 80 %, в основном почками [3].

Для определения йододефицита в организме предложены различные методы. Однако каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, применение этих методов требует детальной апробации и объективной оценки. В связи с изложенным, отбор и испытание наиболее оптимального способа определения биоорганического йода в организме является важнейшей задачей выявления и устранения йододефицита для обеспечения продовольственной безопасности [4].

Одним из наиболее чувствительных и доступных методов определения йода в крови является

спектрофотометрический метод, который основан на измерении каталитической активности йода в системе $Ce^{+4}-As^{+3}$ по Е.В. Sandell, I.M. Kolthoff.

Целью проведенных исследований явилось определение концентрации белковосвязанного йода и гормонов щитовидной железы в крови кроликов при коррекции йододефицитного состояния.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований использованы 24 кролика обоего пола в возрасте от 9 до 12 месяцев, массой от 2,8 до 3,5 кг, разделенных по принципу аналогов на четыре группы по шесть животных в каждой.

Животные первой группы получали ОР, соответствующий зоотехническим требованиям, без био добавок и служили контролем, животные второй группы получали йододефицитный рацион. Животных третьей и четвертой групп кормили ОР с добавлением ежедневно в течение 30 суток, соответственно, неорганического йода в виде йодида калия и биоорганического йода в виде биологически активной добавки (БАД) «Ламинария – морская капуста БИО». Неорганический йод добавляли в питьевую воду в дозе 3 мг/животное. БАД давали с кормом в виде порошка с частицами размером 3,0 мм из расчета 2 г на 1 кг корма.

Определение БСЙ в сыворотки крови кроликов проводили с использованием спектрофотометрического метода по Е.В. Sandell, I.M. Kolthoff в модификации К.Б. Яцимирского [5]. Для этого у животных брали пробы крови и выделяли сыворотку общепринятым методом. Техника определения белковосвязанного йода по указанному методу состоит из следующих процессов:

- осаждение белков сыворотки крови белковыми осадителями и отмывание белкового осадка от неорганического йода;
- выделение элементарного йода из белкового осадка;
- количественное определение йода спектрофотометрическим методом.

Кровь для определения БСЙ спектрофотометрическим методом и функциональной активности ЩЖ методом иммуноферментного анализа (ИФА) по концентрации трийодтиронина (T_3) и тироксина (T_4) отбирали из ушной вены утром до кормления ($n = 6$). Исследования крови проводили перед началом опытов и через 30 суток после кормления животных опытных и контрольных групп вышеуказанными рационами.

Для определения БСЙ спектрофотометрическим методом в пробирку из термостойкого стекла вносили 0,5 см³ сыворотки крови, добавляли бидистиллированную воды до 8 см³, перемешивали, добавляли 1 см³ 10 %-ного раствора $ZnSO_4$ и 1 см³ 0,5 н. раствора КОН. Перемешивали стеклянной палочкой и центрифугировали при 3000 об/мин в течение 15 мин. Надосадочный слой сливали. Осадок

промывали 3 раза в бидистиллированной воде (по 10 см³), к промытому осадку приливали 1 см³ 2 н. раствора КОН, в котором растворяли осадок. Пробу помещали в сушильный шкаф на время от 16 до 18 ч при температуре (90±5) °С. Высушенный осадок сжигали в муфельной печи при температуре (600±25) °С в течение 1 ч. К охлажденному минерализованному осадку добавляли 10 см³ бидистиллированной воды, перемешивали и центрифугировали при 3000 об/мин в течение 15 мин.

В спектрофотометрические пробирки переносили по 4 см³ надосадочной жидкости (две пробы), добавляли 1 см³ мышьяковистого ангидрида, перемешивали и помещали в водяную баню при температуре 37 °С. Через 10 мин в каждую пробирку добавляли по 1 см³ 0,04 н. раствора церия-аммония сернокислого окисного той же температуры. Энергично встряхивали и инкубировали в водяной бане 20 мин, после чего проводили спектрофотометрию при длине волны 420 нм в кювете с толщиной слоя 1 см против бидистиллированной воды.

Калибровочную кривую строили в диапазоне доз 0,02–0,04–0,06 мкг йода в пробе. Для этого в пробирки (№ 1, 2, 3, 4) вносили по 0,5 см³ 2 М раствора соляной кислоты. В пробирку № 1 добавляли 3,5 см³ бидистиллированной воды, № 2 – 2,5 см³ бидистиллированной воды и 1 см³ калибровочного раствора с 0,02 мкг йода, № 3 – 1,5 см³ бидистиллированной воды и 2 см³ калибровочного раствора с 0,04 мкг йода, № 4 – 0,5 см³ бидистиллированной воды и 3 см³ калибровочного раствора с 0,06 мкг йода. Во все пробирки добавляли по 0,5 см³ мышьяковистого ангидрида. Затем все операции выполняли так же, как с испытуемыми образцами.

Концентрацию йода в 1 дм³ сыворотки крови C , мкг/дм³, вычисляли по формуле (1)

$$C = \frac{A}{B} \times 2500, \quad (1)$$

где A – количество йода в пробе, определенное по калибровочной кривой, мкг; B – количество сыворотки крови, взятой в опыт, дм³.

Определение функциональной активности ЩЖ с использованием иммуноферментного анализа (ИФА) проводили согласно Инструкции по применению «Набора реагентов для иммуноферментного определения концентрации общего трийодтиронина (T_3) и тироксина (T_4) в сыворотке крови», утвержденной приказом Росздравнадзора от 23.08.2017 № 7381. Наборы произведены АО «Вектор-Бест» (г. Новосибирск). Статистическую обработку результатов исследований проводили методом вариационной статистики с использованием компьютерной программы «Microsoft office Excel».

Результаты исследований

Исследованиями установлено (табл. 1), что количество БСЙ в сыворотке крови контрольных кроликов в ходе опыта повысилось на 2,8 %; у животных второй группы, получавших йододефицитный рацион, снизилось на 39,8 % ($P < 0,01$); у животных третьей группы, получавших неорганический йод, повысилось на 9,8 %; у животных четвертой группы, получавших БАД «Ламинария – морская капуста БИО», на 21,4 % ($P < 0,01$).

Результаты иммуноферментного определения концентрации гормонов ЩЖ (табл. 2) показали, что количество T_3 в сыворотке крови кроликов контрольной группы в ходе опыта повысилось на 1,6 %; у

животных второй группы, получавших йододефицитный рацион, снизилось на 40,8 % ($P < 0,01$); у животных третьей группы, получавших неорганический йод, повысилось на 14,4 %; у животных четвертой группы, получавших БАД, повысилось на 35,0 % ($P < 0,01$). Количество T_4 в сыворотке крови кроликов контрольной группы в ходе опыта повысилось на 3,6 %; у животных второй группы, получавших йододефицитный рацион, снизилось на 44,3 % ($P < 0,01$); у животных третьей группы, получавших неорганический йод, повысилось на 16,3 %; у животных четвертой группы, получавших БАД, повысилось на 45,4 % ($P < 0,01$).

Таблица 1

Результаты спектрофотометрического определения содержания БСЙ в сыворотке крови кроликов до и после добавки в рацион неорганического и органического йода, мкг/дм³

Группа	Исход (фон)	Результат через 1 месяц
1 (контроль) – ОР	43,10 ± 1,43	44,33 ± 1,45
2 – йододефицитный рацион	43,90 ± 1,55	26,43 ± 1,95*
3 – ОР + йодид калия	43,95 ± 1,63	48,27 ± 1,62
4 – ОР + БАД	43,28 ± 1,25	52,55 ± 2,13*

* – $P < 0,01$.

Таблица 2

Концентрация трийодтиронина (T_3) и тироксина (T_4) в сыворотке крови кроликов (нмоль/л)

Группа	Исход (фон)		Результат через 1 месяц	
	T_3	T_4	T_3	T_4
1 (контроль) – ОР	1,87±0,15	75,72±4,67	1,90±0,12	78,43±4,47
2 – йододефицитный рацион	1,91±0,12	78,20±4,88	1,13±0,08*	43,57±2,23*
3 – ОР + йодид калия	1,88±0,14	80,68±4,25	2,15±0,13	93,85±5,77
4 – ОР + БАД	1,80±0,12	72,13±3,03	2,43±0,15*	104,90±5,50*

* – $P < 0,01$.

На 30 сутки опыта у животных третьей группы, получавших основной рацион с добавлением неорганического йода (ОР + йодид калия) ($P > 0,05$), а также у животных четвертой группы, получавших основной рацион с добавлением БАД (ОР + БАД) ($P < 0,01$), показатели T_3 и T_4 были значительно выше контроля.

Результаты исследований по моделированию йододефицита у лабораторных животных с использованием кормов с различным содержанием йода показали, что кормление опытных животных в течение одного месяца йододефицитным рационом создает у них йододефицитное состояние.

Заключение

По данным спектрофотометрических исследований количество БСЙ в сыворотке крови контрольных

кроликов (первая группа) в ходе опыта повысилось на 2,8 %; у животных второй группы, получавших йододефицитный рацион, снизилось на 39,8 %; у животных третьей группы, получавших неорганический йод, повысилось на 9,8 %; у животных четвертой группы, получавших БАД «Ламинария – морская капуста БИО», повысилось на 21,4 %.

При этом результаты иммуноферментного анализа показали, что изменения количества трийодтиронина (T_3) и тироксина (T_4) в сыворотке крови кроликов в ходе опыта были аналогичны изменениям количества БСЙ в сыворотке крови определенного спектрофотометрическим методом.

Установлено, что поступление йода в организм животных в виде БАД «Ламинария – морская капуста БИО» на фоне кормления ОР сопровождается более

выраженным усвоением йода щитовидной железой, чем при поступлении в виде калия йодида.

Значения концентрации белковосвязанного йода в крови кроликов и гормонов щитовидной железы коррелируют между собой, а два использованных метода дополняют друг друга. Спектрофотометрический метод позволяет определить наличие или отсутствие йододефицита, а количество гормонов трийодтиронина и тироксина, которые регулируют основные процессы жизнедеятельности, характеризует функциональную активность щитовидной железы.

Список литературы

1. Перспективы использования липосомальных технологий в животноводстве и птицеводстве для производства биологически полноценных и функциональных продуктов питания, обогащенных органическим йодом, в условиях Крыма / Р.Г. Ильязов, В.С. Паштецкий, С.Ю. Стройнова [и др.] // Современное

состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы международной IV научно-практической конференции, 9-13 сентября 2019 г. Симферополь: Ареал, 2019. С. 341-343.

2. Карабаева М.Э. Проблема йододефицита у животных // Эффективное животноводство. 2018. № 2 (141). С. 28-29.

3. European Thyroid Association Survey on the Use of Selenium Supplementation in Hashimoto's Thyroiditis / K.H. Winther, E. Papini, R. Attanasio [et al.] // Eur Thyroid J. 2020. № 9. PP. 99-105.

4. Конструирование дефицита йода в организме кроликов / К.Н. Вагин, Т.Р. Гайнутдинов, Ф.Р. Вафин, Я.М [и др.] // Инновационные решения актуальных вопросов биобезопасности: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Казань: Альянс, 2022. С. 93-97.

5. Яцимирский К.Б. Кинетические методы анализа. М.: Химия, 1967. 204 с.

THE CONCENTRATION OF PROTEIN-BOUND IODINE AND THYROID HORMONES IN THE BLOOD IN IODINE-DEFICIENT CONDITIONS OF RABBITS

Kurbangaleev Y.M., Vagin K.N.^a, Gaynutdinov T.R., Usolsev K.V., Idrisov A.M.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety», Nauchny Gorodok-2 st., Kazan, Russian Federation, 420075

e-mail: "kostya9938@yandex.ru

As a result of the conducted studies, the content of protein-bound iodine (PBI) and thyroid hormones in the blood of rabbits was determined by spectrophotometric and enzyme immunoassay methods when potassium iodide and biologically active additive (dietary supplement) «Laminaria – sea kale BIO» were added to the main diet (MD). The values of the concentration of protein-bound iodine in the blood of rabbits and thyroid hormones correlate with each other, and the two methods used complement each other. The spectrophotometric method allows to determine the presence or absence of iodine deficiency, and the amount of triiodothyronine and thyroxine hormones, which regulate the main processes of vital activity, characterize the functional activity of the thyroid gland.

Keywords: *protein-bound iodine, hormones, thyroid gland, determination methods, feed additive, blood, rabbits*

As a result of the conducted studies, the content of protein-bound iodine (PBI) and thyroid hormones in the blood of rabbits was determined by spectrophotometric and enzyme immunoassay methods when potassium iodide and biologically active additive (dietary supplement) «Laminaria – sea kale BIO» were added to the main diet (MD). According to spectrophotometric studies, the amount of PBI in the blood serum of control rabbits during the experiment increased by 2.8 %; decreased by 39.8 % in animals of the second group

receiving an iodine-deficient diet; increased by 9.8 % in those receiving inorganic iodine; increased by 21.4 % in those receiving bioorganic iodine dietary supplement «Laminaria – sea kale BIO». At the same time, the results of enzyme immunoassay showed that changes in the amount of triiodothyronine (T₃) and thyroxine (T₄) in the blood serum of rabbits during the experiment were similar to changes in the amount of PBI in the blood serum determined by the spectrophotometric method.

СТЕРИЛЬНОСТЬ ПЫЛЬЦЫ ЛЮПИНА ПРИ ОСТРОМ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Макаренко Е.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru

Изучена частота стерильных пыльцевых зерен люпина желтого и белого, облученных в дозах 25, 50, 100, 200, 400 и 800 Гр. По результатам работы обнаружено устойчивое увеличение частоты стерильности пыльцевых зерен у люпина желтого при поглощенной дозе ≥ 50 Гр, у люпина белого при ≥ 200 Гр и рост вариабельности данного показателя при возрастании полученной дозы.

Ключевые слова: γ -облучение семян, качество пыльцы, *Lupinus luteus* L., *Lupinus albus* L.

Качество пыльцы растений, испытавших острое радиационное воздействие, представляет научный интерес в качестве примера радиационно-индуцированных биологических эффектов. Пыльцевые зерна гаплоидны и поэтому более чувствительны к повреждающим факторам, чем диплоидные клетки, имеющие большие возможности для репарации повреждений. Одной из важных сельскохозяйственных культур является люпин, который ценится как растение с высокой азотфиксирующей способностью, а также как высокобелковый и дешевый корм в животноводческой и птицеводческой отраслях [1].

Целью работы являлась оценка стерильности пыльцы люпина желтого и белого после острого γ -облучения.

Материалы и методы

Для определения влияния острого облучения на качество пыльцы использовали люпин желтый (*Lupinus luteus* L.) сорт «Надежный» и люпин белый (*Lupinus albus* L.) сорт «Мичуринский», предоставленные ВНИИ люпина – филиал ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса» (г. Брянск). Для люпина желтого и белого, облученных на стадии семян, рекомендуемая доза для индуцирования мутагенеза (SD) ~ 400 Гр и 200 Гр соответственно [2]. Доза гамма-излучения, вызывающая 50 % уменьшение длины гипокотила (RD_{50}) для люпина желтого сорта «Надежный» составила 660 Гр, а для люпина белого сорта «Мичуринский» – 400 Гр [3]. Семена были облучены в дозах 25, 50, 100, 200, 400 и 800 Гр мощностью 100 Гр/час на УНУ ГУР-120 (^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ),

также присутствовал контроль (К). Семена проращивали в контролируемых условиях климатической камеры Фитотрон ЛиА-2 при температуре + 20 °С. Для анализа отбирали по 10-11 соцветий для каждой дозы. Пыльцу окрашивали йодным методом [4] и анализировали на микроскопе при 240-кратном увеличении. Просматривали по 500 пыльцевых зерен с растения.

На рисунках представлены минимальные значения, первые квартили (Q1), медианы (M), третьи квартили (Q3), максимальные значения и выбросы, рассчитанные как $\text{inf} < Q1 - 1,5 \times IQR$ и $\text{sup} > Q3 + 1,5 \times IQR$, где $IQR = Q3 - Q1$. Для определения значимости отличия от контроля выбросы были удалены из анализа, использовали критерий Манна-Уитни (U-тест).

Результаты и обсуждение

У люпина желтого при дозе 800 Гр не образовалось соцветий, при 400 Гр – только у 4-х растений. При облучении семян люпина желтого в дозе выше 50 Гр стерильность пыльцы значительно превышала контрольный уровень (рис. 1). Обнаружена корреляция данного показателя с поглощенной дозой ($r=0,89$, $p<0,05$).

У люпина белого при 800 Гр удалось отобрать соцветия у 3-х растений. Частота стерильной пыльцы *L. albus* значительно превышает контрольный уровень при поглощенной дозе от 200 Гр (рис. 2), при 100 Гр $p=0,057$. Корреляционный анализ выявил зависимость данного показателя от поглощенной дозы ($r=0,95$, $p<0,01$).

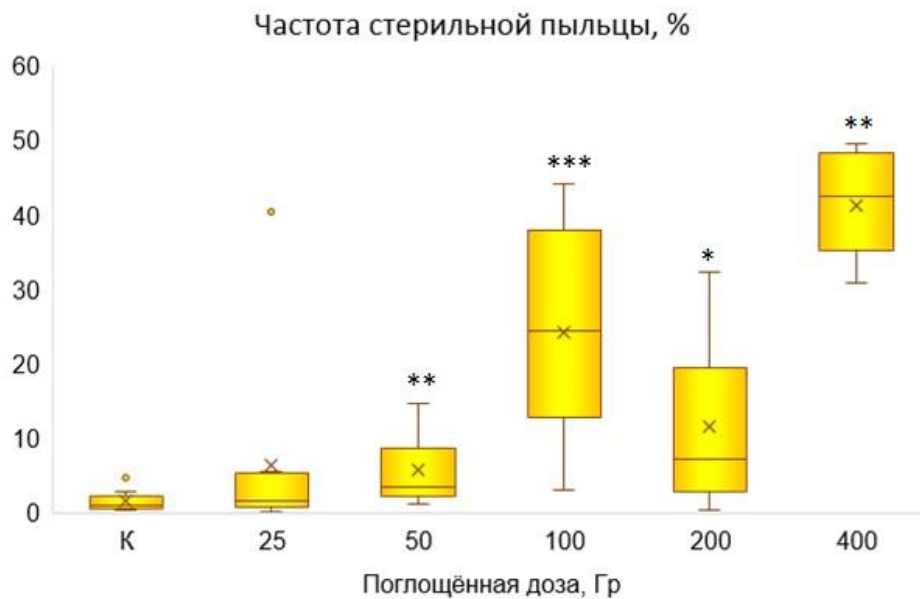


Рисунок 1. Частота встречаемости стерильных пыльцевых зерен люпина желтого (%) в зависимости от поглощенной дозы
*, **, *** – значимое отличие от контроля, $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$

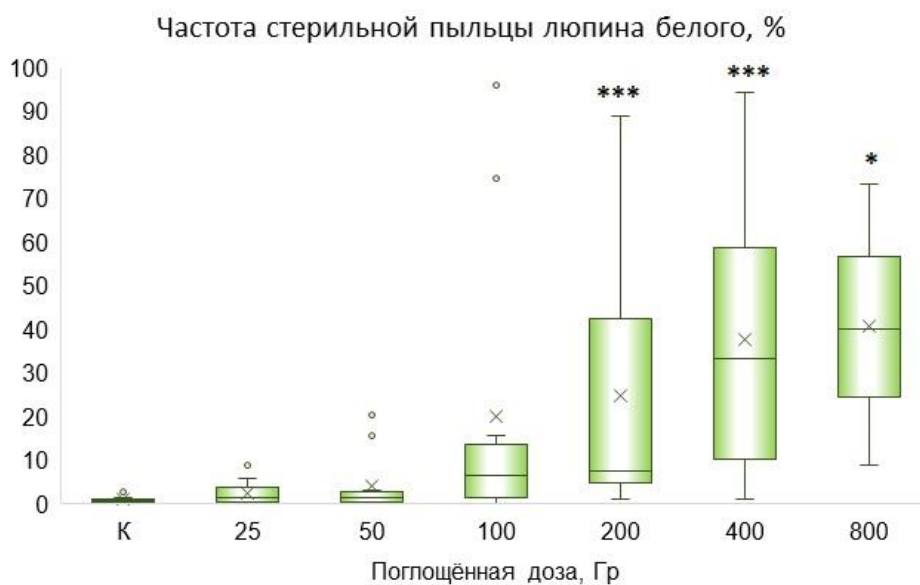


Рисунок 2. Частота встречаемости стерильных пыльцевых зерен люпина белого (%) в зависимости от поглощенной дозы
*, *** – значимое отличие от контроля, $p < 0,05$, $p < 0,001$

Помимо дозозависимого роста частоты стерильных пыльцевых зерен, обнаружено увеличение вариабельности данного показателя (рис. 1, рис. 2). Подобный рост изменчивости наблюдали на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа на качестве семян одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale*) [5], жизнеспособности и радиорезистентности семян подорожника большого (*Plantago major* L.) [6].

Таким образом, при изучении качества пыльцы люпина желтого и белого обнаружено устойчивое увеличение частоты стерильности пыльцевых зерен и рост вариабельности данного показателя при возрастании поглощенной дозы.

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 5ф.6.3), а также 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. Артюхов А., Сорокин А., Афонина Е. Люпин в кормлении сельскохозяйственных животных и птицы // Комбикорма. 2017. № 12. С. 43-46.

2. Shu Q.Y., Forster B.P., Nakagawa H. Plant mutation breeding and biotechnology. Rome: FAO, 2012. 595 p.

3. Сравнительная оценка влияния гамма-облучения семян на развитие проростков *Lupinus luteus* L. и *Lupinus albus* L. / А.С. Ханова, П.С. Крылова, В.С. Бондаренко [и др.] // Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов I международной молодежной конференции, Обнинск, 18–21 октября 2022. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2022. С. 97-100.

4. Горшкова Т.А., Амосова Н.В. Фитотестирование и фитоиндикация: от клетки до фитоценоза: учебно-

методическое пособие для проведения полевой и лабораторной учебно-исследовательской работы. Обнинск: ИАТЭ, 2008. 75 с.

5. Pozolotina V.N., Antonova E.V. Temporal variability of the quality of *Taraxacum officinale* seed progeny from the East-Ural radioactive trace: is there an interaction between low level radiation and weather conditions? // International journal of radiation biology. 2017. Vol. 93. № 3. PP. 330-339. <http://dx.doi.org/10.1080/09553002.2016.1254835>.

6. Shimalina N.S., Antonova E.V., Pozolotina V.N. Multiannual Assessment of Quality of *Plantago major* L. Seed Progeny from Kyshtym Radiation Accident Area: Weather-Dependent Effects // Plants. 2023. Vol. 12. № 13. 2528. <https://doi.org/10.3390/plants12132528>.

STERILITY OF LUPINE POLLEN UNDER ACUTE RADIATION EXPOSURE

Makarenko E.S.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: makarenko_ek_obninsk@mail.ru*

The frequency of sterile pollen grains of *Lupinus luteus* and *Lupinus albus* irradiated at doses of 25, 50, 100, 200, 400 and 800 Gy was studied. According to the results of the work, a steady increase in the frequency of sterility of pollen grains was found in *Lupinus luteus* at an absorbed dose of ≥ 50 Gy, in *Lupinus albus* at ≥ 200 Gy and an increase in the variability of this indicator with an increase in the dose received.

Keywords: γ -irradiation of seeds, pollen quality, *Lupinus luteus* L., *Lupinus albus* L.

УДК 539.1.06

КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ГЕМОГЛОБИНА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ГОВЯДИНЫ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Межетова И.Т.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Козлова Е.К.^{1,3}, Черняев А.П.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Российская Федерация

e-mail: ^a mezhetova.it19@physics.msu.ru

В данном исследовании предлагается рассматривать концентрацию производных гемоглобина в качестве критерия выбора дозы радиационной обработки мяса говядины, при которой окисление гемоглобина, вызванного воздействием излучения, становится необратимым. Данное предположение было сделано на основе экспериментальных данных, указывающих на то, что с увеличением дозы облучения образцов говядины ее цвет менялся от ярко-красного до темно-коричневого, что связано с окислением оксигемоглобина до метгемоглобина. Была

предложена математическая модель, описывающая кинетику изменения производных гемоглобина в говядине после обработки ускоренными электронами, основанная на том, что существуют три механизма окисления гемоглобина в говядине после радиационной обработки: прямая ионизация за счет воздействия ускоренных электронов, жизнедеятельность бактерий и активные формы кислорода, возникающие как при хранении продукта, так и в результате косвенного действия излучения.

Ключевые слова: производные гемоглобина, метгемоглобин, спектрофотометрия, ускоренные электроны, кинетическая модель

В настоящий момент в мире наблюдается повышенный интерес к применению радиационной обработки продуктов питания с целью повышения сроков хранения продукции и обеспечения ее микробиологической безопасности, что особенно актуально в мире в связи с текущими проблемами, связанными с нарушением логистических цепочек поставок продукции.

Обработка ионизирующим излучением биологических объектов решает широкий спектр задач, начиная от задачи увеличения скорости роста растений и заканчивая полной стерилизацией отдельных категорий пищевой продукции. В радиационной обработке пищевой продукции эффект определяется дозой облучения. Международные стандарты ISO [1] разрешают радиационную обработку в дозах до 10 кГр, для разных целей обработки в отношении каждой категории продуктов регламентированы максимальные дозы излучений. Вместе с тем существует необходимость точного определения эффективного диапазона поглощенной дозы для каждого облучаемого объекта, выход за верхний предел которого приводит к необратимым физико-химическим изменениям в продукте, а облучение в дозах, меньших нижней границы диапазона, не решает задачу, стоящую перед радиационной обработкой. Сложность определения границ диапазонов доз для отдельных категорий продукции определяется различием в их биохимическом составе. Согласно литературным данным [2], радиационная обработка продуктов с содержанием красных клеток крови приводит к изменению цвета продукта, что может быть связано с изменением концентрации производных гемоглобина в продуктах.

Целью работы являлось исследование изменений концентраций производных гемоглобина в мясе говядины после воздействия ускоренных электронов в течение трех суток хранения.

В качестве объекта исследования была выбрана охлажденная говяжья вырезка, хранившаяся при 4 °С в течение суток после забоя, купленная на местном рынке. Были подготовлены куски массой (3,5±0,5) г,

толщиной не более 6 мм и помещены в чашки Петри с диаметром 35 мм и высотой 14 мм для дальнейшего облучения.

Образцы мяса облучали в дозах 250 Гр, 500 Гр, 1000 Гр, 5000 Гр и 10 000 Гр ускоренными электронами с помощью ускорителя непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с максимальной энергией электронов 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт. Так как пробег электронов с энергией 1 МэВ в мясе говядины составляет не более 5 мм, для получения равномерно распределенной поглощенной дозы по всему объему продукта проводилось двустороннее облучением образцов. Для оценки дозы, поглощенной образцами, проводилось компьютерное моделирование с использованием инструментария GEANT4. Моделирование выполнялось с учетом энергетического спектра ускорителя и заряда, поглощенного дюралюминиевой пластиной, на которой находились обрабатываемые образцы. Была оценена однородность дозы в объеме обрабатываемых образцов, которая составила примерно 60 %.

После облучения часть образцов мяса помещали в буферный раствор объемом 5 мл в течение 15 минут, затем мясо доставали, и полученную суспензию центрифугировали с помощью центрифуги Universal 320 (Andreas Hettich GmbH & Co. KG, Германия) с частотой оборотов 3500 об/мин в течение 5 минут. Далее измеряли оптическую плотность суспензии на спектрофотометре Unico 2800 (United Products & Instruments, USA) в диапазоне длин волн от 130 нм до 1100 нм с шагом 2 нм. Остальные образцы говядины помещали на хранение при температуре 4 °С для последующего биохимического анализа в течение последующих 4 суток.

Для определения концентраций производных гемоглобина экспериментально полученные данные оптических плотностей растворов, измеренных на соответствующих длинах волны $S_l(\lambda_l)_{\text{эксп}}$, где l – индекс длины волны, λ_l – набор измеренных длин волн, аппроксимировались функцией $S_l(\lambda_l)_{\text{теор}}$ вида:

$$S_l(\lambda_l)_{\text{теор}} = \varepsilon_{\text{Hb},l} C_{\text{Hb}} L + \varepsilon_{\text{HbO}_2,l} C_{\text{HbO}_2} L + \varepsilon_{\text{MetHb},l} C_{\text{MetHb}} L + \frac{E}{\lambda^4} + K, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{Hb},l}$, $\varepsilon_{\text{HbO}_2,l}$, $\varepsilon_{\text{MetHb},l}$ и C_{Hb} , C_{HbO_2} , C_{MetHb} – молярные коэффициенты поглощения и концентрации дезоксигемоглобина, оксигемоглобина и метгемоглобина соответственно, L – толщина слоя раствора, E , K – коэффициенты рассеяния.

На рисунке 1 представлены зависимости оптической плотности растворов S , полученных из образцов мяса говядины, предварительно облученных в дозах 0 Гр, 250 Гр, 500 Гр, 1000 Гр, 5000 Гр и 10000 Гр, измеренные спустя два часа после облучения, от длины

волны λ . Амплитуда пика метгемоглобина (*metHb*), наблюдаемого на длине волны $\lambda = 628$ нм, возрастала с увеличением дозы облучения, при этом пик метгемоглобина в растворе, соответствующем необлученному образцу, не наблюдался. Таким образом,

облучение ускоренными электронами образцов мяса говядины привело к окислению в нем оксигемоглобина до метгемоглобина, степень окисления возрастала с увеличением дозы облучения опытных образцов.

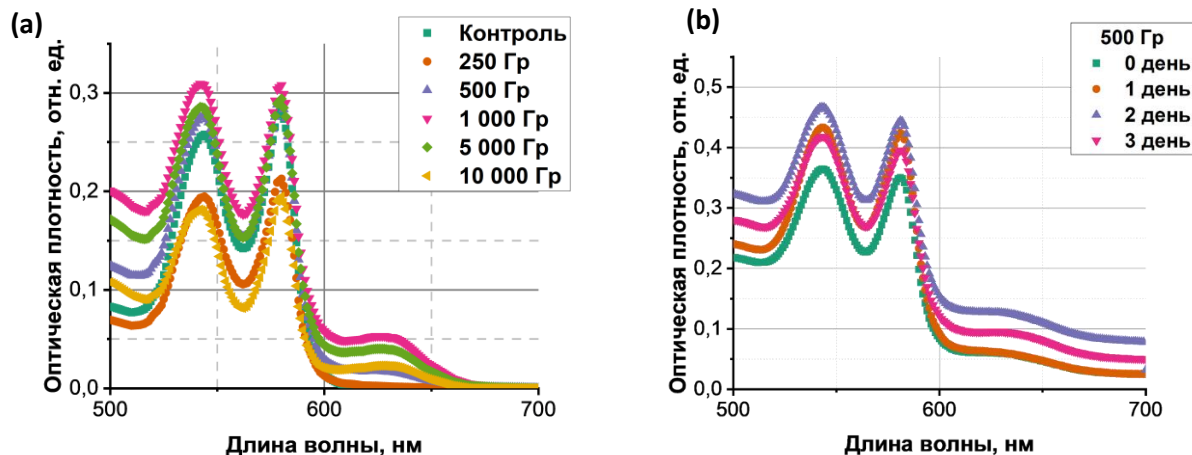


Рисунок 1. Зависимости оптической плотности S растворов образцов говядины: (а) облученных в различных дозах, измеренные спустя 2 часа после облучения, от длины волны λ ; (б) облученных в дозе 500 Гр, измеренные в течение 3 суток хранения

На рисунке 2(а) представлена зависимость относительной концентрации метгемоглобина C_{metHb} , в растворах говядины от дозы, поглощенной образцами мяса, измеренной спустя два часа после облучения. Из рисунка видно, что с увеличением дозы облучения от 250 Гр до 10000 Гр концентрация метгемоглобина в растворах нелинейно возрастала от 15 % до 50 %. На рисунке 2(б) представлены зависимости концентраций метгемоглобина в образцах говядины, облученных в различных дозах, от времени хранения образцов при температуре 4 °С. Концентрация метгемоглобина в необлученных образцах

устойчиво возрастала от 0 % до 35 % в течение 4 суток наблюдения, в то время как в образцах мяса, облученных в дозах от 250 Гр до 10000 Гр, наблюдалась немонотонная зависимость концентрации метгемоглобина от времени хранения. Также спустя 3 суток хранения концентрация оксигемоглобина в контрольных образцах уменьшилась с 100 % до 65 %, а в образцах, облученных в дозе 10000 Гр уменьшилась от 50 % до 45 %. Таким образом, оксигемоглобин присутствовал во всех опытных образцах продукции в течение 4 суток хранения продукта.

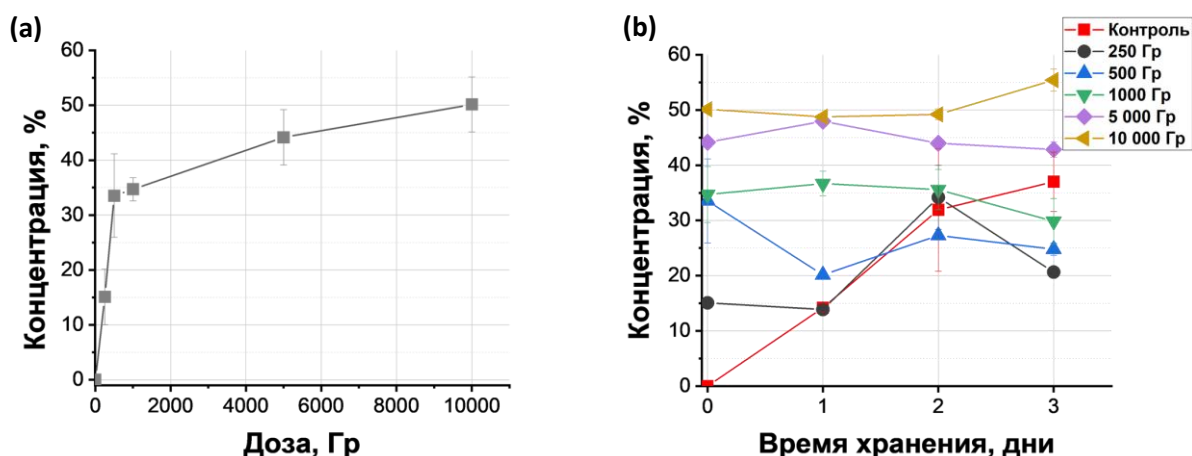


Рисунок 2. (а) зависимость концентрации метгемоглобина C_{metHb} в растворах образцов говядины от дозы, поглощенной образцами; (б) зависимость концентраций метгемоглобина C_{metHb} , в образцах говядины, облученных в различных дозах, от времени хранения t , сутки

Для анализа динамики изменения концентрации *metHb* была предложена модель, основанная на том, что в образцах говядины при хранении после воздействия ускоренных электронов существуют четыре механизма перехода оксигемоглобина в метгемоглобин и обратно:

- ударная(прямая) ионизация ускоренными электронами;
- биохимические процессы, связанные с жизнедеятельностью бактерий;
- действие активных форм кислорода, образующихся как при хранении за счет присутствия кислорода, так и в результате радиолитического распада при облучении;
- восстановление метгемоглобина до оксигемоглобина.

Каждому из первых трех процессов присваивается соответствующий статистический ансамбль молекул метгемоглобина: N_1, N_2, N_3 , возникновение которых определяется тремя вышеперечисленными факторами. Особое место занимает ансамбль N_4 , который представляет собой пул молекул оксигемоглобина, из которого переходят молекулы метгемоглобина в первые три ансамбля, и в который они могут обратно перейти за счет восстановления метгемоглобина до оксигемоглобина. Ансамбли связаны следующим соотношением: $N(t) = N_1(t) + N_2(t) + N_3(t) + N_4(t) = const$, исходя из того, что общее количество молекул гемоглобина остается неизменным в течение времени наблюдения.

Для каждого ансамбля были получены следующие зависимости изменения количества входящих в их состав молекул от времени хранения после облучения:

$$N_1(t) = N_{Fe^{2+}}(1 - e^{-\alpha D}) * e^{-bt}, \quad (2)$$

$$N_2(t) = \frac{kx_0(D)\varepsilon(D)e^{\varepsilon(D)t}}{\delta(D)x_0(D)e^{\varepsilon(D)t} - \delta(D)x_0(D) + \varepsilon(D)} * e^{-bt}, \quad (3)$$

$$N_3(t) = N_{30}(D)e^{g(D)t} e^{-bt}, \quad (4)$$

где $b, 1/\text{сут}$ – скорость восстановления метгемоглобина до оксигемоглобина, α – коэффициент,

учитывающий параметры облучения и начальную концентрацию оксигемоглобина в образцах говядины, k – коэффициент пропорциональности, связывающий концентрацию бактерий и концентрацию *metHb* в образцах говядины; коэффициенты модели Ферхюльста, описывающие рост популяции бактерий: ε – коэффициент роста популяций бактерий в образцах говядины, равный разнице между коэффициентом их размножения γ и σ , коэффициентом естественной гибели, δ – коэффициент конкуренции, x_0 – начальная концентрация бактерий в продукте в момент времени $t=0$; $g, 1/\text{сут}$ – скорость окисления оксигемоглобина до метгемоглобина в присутствии кислорода, N_{30} – концентрация метгемоглобина в образцах говядины в начальный момент времени.

Разработанная модель адекватно описывает экспериментальные данные и может быть использована для понимания фундаментальных процессов, протекающих в продукте после проведения радиационной обработки, а также для разработки рекомендаций по установлению оптимальных параметров обработки мясной продукции.

В ходе исследования было показано, что в продуктах, содержащих красные клетки крови, концентрация метгемоглобина является индикатором окислительных процессов, инициируемых ионизирующим излучением, а также биохимическими процессами, протекающим в продуктах при хранении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

Список литературы

1 Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food, ISO/TC 34 Food products, ICS: 67.020 Processes in the food industry, Geneva, Switzerland. 2004. PP. 7-39.

2. Brewer S. Irradiation effects on meat color – a review // Meat Science. 2004. Vol. 68. № 1. PP. 1-17.

KINETICS OF CHANGES IN HEMOGLOBIN DERIVATIVES AFTER IRRADIATION OF BEEF WITH ACCELERATED ELECTRONS

Mezhetova I.T.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.U.^{1,2}, Kozlova E.K.^{1,3}, Chernyaev A.P.^{1,2}

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Trubetskaya st. 8, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991
e-mail: ^amezhetova.it19@physics.msu.ru

In this study, it is proposed to consider the concentration of hemoglobin derivatives as a criterion for choosing the dose of radiation treatment of beef meat, at which the oxidation of hemoglobin caused by exposure to radiation becomes irreversible. This assumption was made on the basis of experimental data indicating that with an increase in the radiation dose of beef samples, its color changed from bright red to dark brown, which is associated with the oxidation of oxyhemoglobin to methemoglobin. A mathematical model was proposed describing the kinetics of changes in hemoglobin derivatives in beef after treatment with accelerated electrons, based on the fact that there are three mechanisms of hemoglobin oxidation in beef after radiation treatment: direct ionization due to the action of accelerated electrons, bacterial activity and reactive oxygen species arising both during product storage and as a result of indirect action radiation.

Keywords: *hemoglobin derivatives, methemoglobin, spectrophotometry, accelerated electrons, kinetic model*

УДК 631.4:502.76

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЗДУХЕ, ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ И ГОДОВОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОЧИХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ

Орлов П.М., Аканова Н.И.^а, Ермаков А.А.^б

Федеральное государственное научное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31а

e-mail: ^аN_Akanova@mail.ru, ^бp.ermakov@mail.ru

Представлена методика расчета мощности поглощенной, эффективной дозы и годовой эффективной дозы сельскохозяйственных рабочих по данным локального мониторинга почв сельскохозяйственных угодий. Оценены средние значения и стандартные интервалы доз для черноземов, дерново-подзолистых, серых лесных, каштановых почв и почв Дальнего Востока. Прослежена динамика изменения указанных параметров с 1991 по 2016 г. В 2011 г. наблюдалось увеличение мощностей доз (экспозиционная доза – с 10,8 до 11,6 мкР/час). Увеличение мощностей доз обусловлено аварией на АЭС «Фукусима». Предложена методика расчета допустимых сроков пребывания рабочих при реабилитации сельскохозяйственных угодий с аномально высокими уровнями загрязнения почв ¹³⁷Cs.

Ключевые слова: *почвы, локальный мониторинг, мощность экспозиционной, поглощенной и эффективной дозы, годовая эффективная доза внешнего облучения, загрязнение почв ¹³⁷Cs*

Конечной целью радиационного мониторинга почв сельскохозяйственных угодий является оценка годовых эффективных доз облучения населения. В настоящей работе приводится методика и результаты оценки мощности поглощенной, эффективной дозы внешнего облучения рабочих на сельскохозяйственных угодьях.

Мощность поглощенной дозы в воздухе рассчитывалась из данных о мощности экспозиционной дозы, полученной по данным локального мониторинга по формуле:

$$D^* = f \cdot X^*, \quad (1)$$

где D^* – мощность поглощенной дозы, мкГр/час, X^* – мощность экспозиционной дозы, мкР/час, $f = 0,00869$ Гр/Р.

Мощность эффективной дозы рассчитывалась по формуле:

$$H^* = Sg \cdot D^*, \quad (2)$$

где H^* – мощность эффективной дозы в теле человека, мкЗв/час; $Sg = 0,7$, учитывает особенности строения тела человека.

Годовая эффективная доза внешнего облучения рассчитывалась по формуле:

$$H = 6,1q \cdot D^*, \quad (3)$$

где H – годовая эффективная доза, мЗв/год, q – индекс облучаемости – время, которое находится человек в поле излучения.

В сельской местности уровень экспозиционной дозы в зданиях и на полях сельскохозяйственных угодий при нормальном радиационном фоне мало отличаются друг от друга, поэтому индекс облучаемости принят равным 1.

Результаты представлены в таблице 1 и в таблице 2. В анализируемую совокупность данных не вошли

результаты Брянской, Калужской, Тульской и Орловской области, подвергшиеся интенсивному загрязнению от Чернобыльской аварии.

В таблице 1 даны средние значения и интервалы изменения доз для основных типов почв РФ и России

в целом. Как видно из таблицы средние значения доз близки между собой. Минимальное среднее для экспозиционной дозы равно 10,5 мкР/час – дерново-подзолистые почвы, максимальное 11,6 мкР/час – черноземы.

Таблица 1

Мощности экспозиционной, поглощенной, эффективной дозы и годовой эффективной дозы на различных типах почвы для сельскохозяйственных рабочих в 2016 г. по результатам локального мониторинга на реперных участках

Тип почвы (количество РУ)	Мощность дозы*			Годовая эффективная доза*, мЗв/год
	экспозиционная, мкР/час	поглощенная в воздухе, мкГр/час	эффективная, мкЗв/час	
черноземы (496)	11,6±0,1/ 9,2-14,0	0,101±0,001/ 0,080-0,123	0,07±0,00/ 0,056-0,0086	0,62±0,00/ 0,49-0,75
дерново-подзолистые (274)	10,5±0,02/ 7,5-13,5	0,091±0,002/ 0,065-0,117	0,064±0,001/ 0,045-0,082	0,56±0,00/ 0,40-0,71
серые лесные (105)	10,8±0,3/ 8,0-13,6	0,094±0,003/ 0,070-0,118	0,066±0,002/ 0,049-0,083	0,57±0,00/ 0,43-0,72
каштановые (132)	10,7±0,02/ 7,9-13,5	0,093±0,002/ 0,069-0,117	0,065±0,001/ 0,048-0,082	0,57±0,01/ 0,42-0,71
почвы дальнего востока (73)	10,9±0,2/ 9,0-12,7	0,095±0,002/ 0,078-0,111	0,067±0,001/ 0,088-0,078	0,58±0,01/ 0,48-0,68
Россия в целом (1167)	11,1±0,1/ 8,4-13,8	0,096±0,001/ 0,073-0,120	0,067±0,001/ 0,051-0,084	0,59±0,01/ 0,45-0,73

*В числителе: среднее значение ± погрешность среднего; в знаменателе: стандартные интервалы

Таблица 2

Мощности экспозиционной, поглощенной, эффективной дозы и годовой эффективной дозы на сельскохозяйственных угодьях России для сельскохозяйственных рабочих с 1991 по 2014 г. по результатам локального мониторинга на реперных участках

Период наблюдения (количество участков)	Мощность дозы			Годовая эффективная доза, мЗв/год
	экспозиционная, мкР/час	поглощенная в воздухе, мкГр/час	эффективная, мкЗв/час	
1991-1994 (1066)	11,4±0,3/ 9,1-13,7	0,099±0,003/ 0,079-0,119	0,069±0,002/ 0,055-0,081	0,60±0,02/ 0,48-0,73
1995-1998 (1685)	11,2±0,3/ 9,0-13,4	0,097±0,003/ 0,078-0,116	0,068±0,002/ 0,055-0,081	0,59±0,02/ 0,48-0,71
2003 (928)	11,1±0,1/ 7,3-14,9	0,096±0,001/ 0,063-0,129	0,067±0,001/ 0,044-0,090	0,59±0,01/ 0,38-0,71
2007 (1903)	10,8±0,1/ 8,3-13,3	0,094±0,001/ 0,072-0,116	0,066±0,001/ 0,050-0,081	0,57±0,01/ 0,44-0,71
2011 (1338)	11,6±0,1/ 7,8-15,4	0,100±0,001/ 0,068-0,134	0,070±0,001/ 0,48-0,094	0,61±0,01/ 0,41-0,82
2014 (869)	11,4±0,1/ 8,5-14,3	0,099±0,001/ 0,074-0,124	0,069±0,001/ 0,052-0,087	0,60±0,01/ 0,45-0,76

Средние значения годовых доз находится в интервале 0,56-0,62 мЗв/год. Погрешности оценки средних значений составляют 1-3 % от среднего значения. Это позволяет применять полученные результаты для оценки естественного радиационного фона на полях сельскохозяйственных угодий в различных расчетах и прогнозах.

В таблице 2 приведены данные о динамике изменения экспозиционной, поглощенной, эффективной

и годовой эффективной дозы гамма-излучения за период с 1991 по 2014 гг. С 1991 по 2011 гг. мощность экспозиционной дозы, соответственно и другие параметры, снижалась. В 2011 году имело место увеличение мощности экспозиционной дозы до величины 11,6 мкР/час, что связано с известным событием на АЭС «Фукусима». В 2014 и 2016 г (табл. 1) – последовательное снижение. Временные изменения мощности экспозиционной дозы также незначительны. Это

позволяет принимать значения параметров 2016 г. в статистических прогнозах и оценках в качестве естественного радиационного фона на полях сельскохозяйственных угодий.

На мощность экспозиционной дозы влияют несколько независимых друг от друга параметров: содержание естественных радионуклидов в почве, солнечная активность, вторичное космическое излучение, содержание гамма-излучающих техногенных радионуклидов в почве, радиоактивные эманации из почвы. При высоких уровнях загрязнения почвы ^{137}Cs вклад гамма-излучения ^{137}Cs в формирование экспозиционной дозы становится значительным. Ряд полей сельскохозяйственных угодий Брянской области были выведены из землепользования по причине высокого содержания ^{137}Cs в почве (более 80 Ки/км²). За время, прошедшее после аварии, содержание ^{137}Cs в почве снизилось более чем в 2 раза. Возможно возвращение полей в землепользование. Соответственно, необходимы реабилитационные мероприятия. Вопрос оценки дополнительного радиационного облучения сельскохозяйственных рабочих при проведении реабилитационных работ является актуальным.

Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения является быстрым и простым в измерении параметром. Исследование может быть проведено на местности. Нормами радиационной безопасности установлен предел доз дополнительного облучения для населения в 1 мЗв/год. Сельскохозяйственные рабочие получают дополнительное внешнее облучение, находясь на загрязненных ^{137}Cs полях. Такое дополнительное облучение следует оценить, если потребуется ограничить время пребывания на полях.

С этой целью следует оценить среднее значение мощности экспозиционной дозы (ΔH^* , мкР/час). Необходимо провести не менее 10 измерений на поле, подлежащим реабилитации.

По формулам 4 и 5 необходимо оценить вклад в эффективную годовую внешнюю облучения (H_1 , мЗв/год):

$$H_1 = \frac{B_1 \cdot K_1}{J} \left(\omega + \frac{1-\omega}{K_x} \right), \quad (4)$$

где B_1 – дозовый коэффициент внешнего облучения, т.е. мощность эквивалентной дозы поля внешнего облучения от поверхностного загрязнения почвы ^{137}Cs в 1 Ки/км² на высоте 1 м ($B=0,341$ мЗв·км²/год·Ки; J – коэффициент изотропности, учитывающий самоэкранирование тела человека в поле внешнего гамма-излучения (для ^{137}Cs $J=1,5$); K_1 – фактор самопоглощения гамма-излучения в пахотном слое при равномерном распределении в нем ^{137}Cs (для ^{137}Cs $K_1=0,4$); ω – доля времени пребывания человека на открытой местности (в среднем за год $\omega=0,5$); K_x – кратность ослабления внешнего гамма-излучения деревянной жилой застройки (для ^{137}Cs $K_x=2,5$)

Подстановка этих значения в формулу 5 дает величину:

$$H_1 = 0,0637 \text{ мЗв} \cdot \text{км}^2/\text{год} \cdot \text{Ки}$$

Эта величина будет одинаковой для всех типов почв.

$$H_r = H_1 A, \quad (5)$$

где H_r – средняя годовая доза в населенном пункте и сельскохозяйственных угодьях, где живут и работают сельскохозяйственные рабочие; A (Ки/км²) – средняя плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в населенном пункте и сельскохозяйственных угодьях, где живут и работают рабочие. При расчете A не должны учитываться поля, подлежащие реабилитации.

Допустимое время пребывания (t , час/год) на реабилитационных полях за 1 год рассчитывается по формуле 6:

$$t = 1000(1 - H_r) / \Delta H^*, \quad (6)$$

При среднем загрязнении почвы ^{137}Cs в населенном пункте и угодьях (A) 15,7 Ки/км² средняя годовая доза равна 1 мЗв/год. Не рекомендуется использовать рабочих на реабилитационных территориях, для которых средний уровень загрязнения почвы ^{137}Cs в местах проживания и работы (A) превышает значение 15 Ки/км².

Проведенная оценка позволит снизить риски ущерба здоровью сельскохозяйственных рабочих при проведении ими реабилитационных мероприятий.

CALCULATION METHODOLOGY AND RESULTS OF EVALUATION OF THE ABSORBED DOSE RATE OF GAMMA RADIATION IN THE AIR, THE EFFECTIVE DOSE AND THE ANNUAL EFFECTIVE DOSE FOR AGRICULTURAL WORKERS BASED ON THE RESULTS OF LOCAL MONITORING OF AGRICULTURAL LAND SOILS

Orlov P.M., Akanova N.I.^a, Ermakov A.A.^b

Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov,
Pryanishnikova st. 31a, Moscow, Russian Federation, 127434
e-mail: ^aN_Akanova@mail.ru, ^bp.ermakov@mail.ru

The method of calculating the rate of absorbed, effective dose and annual effective dose of agricultural workers according to the data of local monitoring of soils of agricultural lands is presented. Average values and standard dose intervals for chernozems, turf-podzolic, gray forest, chestnut soils and soils of the Far East were evaluated. The dynamics of changes in these parameters from 1991 to 2016 was traced, in 2011 there was an increase in dose capacity (exposure dose - from 10.8 to 11.6 $\mu\text{R} / \text{h}$). The increase in dose capacity is due to the accident at the Fukushima nuclear power plant. A methodology for calculating the permissible terms of stay of workers in the rehabilitation of agricultural lands with abnormally high levels of soil pollution ¹³⁷Cs.

Keywords: soils, local monitoring, exposure rate, absorbed and effective dose, annual effective dose of external irradiation, soil pollution ¹³⁷Cs

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS METABOLITES CONCENTRATIONS IN EREMA AND GRIS BARLEY SEEDLINGS IN RESPONSE TO LOW-DOSE GAMMA IRRADIATION

Pishenin I.A.^a, Smirnova A.S., Gorbatova I.V., Khanova A.S., Podobed M.Yu., Kazakova E.A., Shesterikova E.M., Babina D.D., Podlutskiy M.S., Blinova Ya.A., Volkova P.Yu.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^aPishenin.Ivan@gmail.com

Minimum doses of gamma radiation have different effects on crop seeds. In some cases, this leads to growth stimulation and increased plant weight. Studying changes in metabolic pathways in response to various environmental influences may be the key to creating stress-tolerant plants. In previous work, gamma irradiation of seeds of nine varieties of winter and spring barley, bred by the Don Agricultural Research Center, was carried out. Morphometric analysis of the length and weight of the roots and shoots of seedlings made it possible to establish the dependence of the radiation effect on the studied parameters of varieties and their subsequent gradation depending on the magnitude of the radiobiological effect. Varieties of winter and spring barley were identified, differing in sensitivity to a dose of 20 Gy, of which Erema with a stimulating effect and Gris with an inhibitory effect were selected for this work. A method was developed for determining the concentration of target metabolites using an HPLC system. Comparison with the control group showed changes in the concentration of metabolites associated with plant stress response, signaling pathways, regulatory and transport functions in response to low doses of radiation.

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

The use of low-voltage γ -irradiation before sowing can lead to an increase in biomass, an increase in immunity, an increase in stress resistance, and an improvement in the rate of germination and growth of plants [1-3]. The study of changes in metabolic pathways after low-dose γ -irradiation of seeds of agricultural crops makes it possible to determine the probable determinants of the hormesis effect, which can be used to obtain productive and stress-resistant crops.

In this experiment, the content of the following proteinogenic amino acids was studied: lysine, alanine, arginine, methionine, glutamine. The analysis was performed on two varieties of common barley (*Hordeum vulgare L.*): Erema and Gris, which, as a result of previous studies [6], showed the stimulating and inhibitory

effects of low-dose γ -irradiation, respectively. Irradiation of seeds was carried out using a unique scientific installation "GUR-120", NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE (source – ⁶⁰Co). Seeds placed in plastic zip bags were irradiated at a dose of 20 Gy (at a dose rate of 60 Gy/hour). Non-irradiated seeds of each variety were used as controls. The seeds were planted in pots with earth and grown in the greenhouse of the NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE. After seven days, germinated shoots and roots were collected for analysis (1 gram of root and shoot biomass from each pot, respectively) and placed in liquid nitrogen.

From each sample, 0.2 g of tissue was taken and finely ground in a mortar with a pestle and liquid nitrogen. The crushed sample was placed in a 2 ml

Eppendorf tube, to which 1.5 ml of water was added. The tubes were vortexed for 15 minutes and then centrifuged at 14500 rpm for 10 minutes. Next, 400 µl of the standard solution or extract were placed in a 2 ml tube together with 200 µl of a 1M tritylamine solution and 200 µl of a 0.1M phenylisothiocyanate solution, after which they were thoroughly mixed. The derivatization reaction lasted 1 hour at 4 °C. After that, 800 µl of hexane was added and the solution was thoroughly mixed. After the solution was allowed to settle for 10 minutes, the bottom layer was removed and passed through a 0.45 µm filter. This filtrate was used for injection into the chromatograph.

Derivatized and non-derivatized extracts were run through ISOLUTE C18 SPE columns at 0.35 bar using a VacMaster at a flow rate of 0.2 ml/min. For HPLC analysis, 10 µl of the resulting solution was used.

Qualitative and quantitative analysis was carried out using a Nexera LC30 high performance liquid

chromatograph with an SPDM20A diode array detector. A C18 Nanosphere Eco 80 ODS-1 reverse phase column was used for analysis. Standard samples of the studied metabolites, phenylisothiocyanate, triethylamine were purchased from Sigma-Aldrich. All reagents are extra pure (HPLC grade). Water obtained by reverse osmosis distillation. Next, a derivatization reaction was carried out in the presence of triethylamine and phenylisothiocyanate, which lasted 1 hour at a temperature of 4 °C. Derivatized and non-derivatized extracts were run through ISOLUTE C18 SPE columns. For HPLC analysis, 10 µl of the resulting solution was used [4].

Both studied barley varieties were characterized by different concentrations of target metabolites in response to radiation exposure. The ratios of changes in the concentrations of the studied metabolites in the shoots of irradiated plants relative to non-irradiated ones are presented in Table 1, similar data for the roots are presented in Table 2.

Table 1

The ratio of the content of metabolites in the shoots of irradiated barley plants of two varieties to control samples

	Lysine	β-Alanine	Arginine	Methionine	Glutamine
Erema	0.35	0.44	2.24	0.51	3.37
Gris	1.25	9.16	1.01	0.24	1.74

Table 2

The ratio of the content of metabolites in the roots of irradiated barley plants of different varieties to control samples

	Lysine	β-Alanine	Arginine	Methionine	Glutamine
Erema	1.19	2.73	0.55	4.53	0.79
Gris	1.85	0.68	0.26	1.91	1.71

Note: in tables 1 and 2, significant ($p < 0.05$, Mann-Whitney U-test) changes in the concentrations of metabolites of irradiated plants relative to the control are highlighted in bold.

As a result of the study, some regularities were revealed in the change in the concentration of stress metabolites in the roots and shoots of barley seedlings. The content of glutamine and arginine in seedlings of the Erema barley variety was significantly increased compared to the control samples, by 3 times for glutamine and almost 2 times for arginine, which is consistent with the data we obtained earlier [5]. At the same time, the content of lysine and argenine in the roots of the γ -inhibited variety Gris was statistically significantly increased by 1.85 and decreased by 0.26 times, respectively. The content of methionine in the roots of the Erema variety was increased by 4.53 times. Further studies are required to determine the role of arginine, alanine, methionine, and lysine in the modulation of growth processes in barley varieties contrasting in radiosensitivity.

References

1. 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 / P.Yu. Volkova, G.T. Duarte, L. Soubigou-Taconnat [et al.] // J Agro Crop Sci. 2020. Vol. 206. PP. 277-295. doi:10.1111/jac.12381.
2. Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and Challenges in Seed Technology / S. de S. Araújo, S. Paparella, D. Dondi [et al.] // Front. Plant Sci. 2016. P. 7. doi:10.3389/fpls.2016.00646.
3. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants / S.V. Gudkov, M.A. Grinberg, V. Sukhov, V. Vodeneev // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 202. PP. 8-24. doi:10.1016/j.jenvrad.2019.02.001.
4. Bitarishvili S.V., Volkova P.Yu., Geraskin S.A. Influence of γ -irradiation of seeds on the phytohormonal

status of barley seedlings // Plant Physiology. 2018. Vol. 65. № 3. PP. 223-231.

5. Free Amino Acids and Methylglyoxal as Players in the Radiation Hormesis Effect after Low-Dose γ -Irradiation of Barley Seeds / I. Pishenin, I. Gorbatova, E. Kazakova [et al.] // Agriculture. 2021. Vol. 11. P. 918. <https://doi.org/10.3390/agriculture11100918>.

6. Radiosensitivity of varieties of winter and spring barley according to the severity of the morphological effect of low-dose gamma irradiation of original seeds / E.A. Kazakova, E.S. Makarenko, M.S. Podlutsky [et al.] // Grain economy of Russia. 2020. Vol. 2. PP. 23-28. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28>

УДК 575.224.2:575.826

ПОИСК И АННОТАЦИЯ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНЫХ ПОЛИМОРФИЗМОВ У РАСТЕНИЙ *ARABIDOPSIS THALIANA*, ПРОИЗРАСТАВШИХ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

Подлущий М.С.^{1,а}, Воронежская В.С.¹, Волкова П.Ю.^{2,б}, Шестерикова Е.М.¹, Король М.Ю.¹, Бабина Д.Д.¹, Блинова Я.А.¹, Подлущая А.В.¹, Казакова Е.А.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

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

В данной работе представлены предварительные данные о результатах поиска и идентификации однонуклеотидных полиморфизмов в геномах растений *Arabidopsis thaliana*, произрастающих на территории, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Ключевые слова: однонуклеотидные полиморфизмы, выделение и секвенирование ДНК, хроническое облучение, радиационно-индуцированный полиморфизм

С момента аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) в популяциях растений *Arabidopsis thaliana*, произрастающих на загрязненных территориях, сменилось не менее 30 поколений. Хотя уровни радиоактивного загрязнения на этих территориях постоянно снижаются, изучение микроэволюционных последствий хронического облучения остается актуальной и важной задачей.

Помимо этого, исследование микроэволюционных процессов в популяциях растений в условиях хронического антропогенного стресса дает возможность обнаружить новые молекулярные мишени для программ по повышению продуктивности и стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур. Данные об ответных реакциях растений *Arabidopsis thaliana* полезны и для научного обоснования новых принципов экологического нормирования, разрабатываемых рядом международных организаций (например, международной комиссией по радиологической защите и международным агентством по атомной энергии).

Материалы и методы

Семена растений *Arabidopsis thaliana* были собраны в июне 2021 года с двух экспериментальных участков с различными уровнями радиоактивного загрязнения: Бабчин (*Bab-0*, $P = 0.29$ мкГр/ч) и Масаны (*Masa*, $P = 8.0$ мкГр/ч), расположенных на территории Полесского государственного радиологического заповедника (Республика Беларусь).

Для ускорения прорастания и увеличения всхожести семена *A. thaliana* стратифицировали в холодильной камере в течение 1-го дня при постоянной температуре 4 °С. По окончании времени экспозиции семена высаживали «газоном» в чашки Петри (40 семян \times 3 чашки Петри) на питательную среду половинной концентрации Мурасиге-Скуга (ООО «Биолот», Россия) с добавлением 0,3 % сахарозы и помещали на дополнительную стратификацию в холодильную камеру в течение 1-го дня. После этого чашки Петри переносили в климатическую камеру MLR-351H (Сапуо, Япония), где выращивали в течение 13-ти дней в режиме длинного светового дня.

Выделение геномной ДНК из 13-ти дневных проростков *A. thaliana* выполняли с использованием специализированного набора «СОРБ-ГМО-Б» (ЗАО «Синтол», Россия) на основе СТАВ

(цетилтриметиламмоний бромид) по протоколу производителя [1]. Первичный анализ качества нуклеиновых кислот проводили на спектрофотометре NanoDrop-2000 (Thermo Fisher Scientific, США).

Полученные образцы геномной ДНК передавали в компанию ЗАО «Евроген» (Москва, Россия) для дальнейшей подготовки библиотек методом shotgun с использованием набора DNA Prep (Illumina, США). Качество полученных библиотек проверялось при помощи прибора Fragment Analyzer (Advanced Analytical Solutions, США).

Секвенирование нового поколения было выполнено в 6-ти повторностях на платформе Illumina NovaSeq 6000 (длина прочтений – 150 пар оснований, с двух сторон фрагмента), в результате которого было получено 3 714 666 806 прочтений (1 686 721 338 прочтений для проростков *A. thaliana*, полученных из семян, отобранных на участке Бабчин и 2 027 945 468 прочтений для проростков *A. thaliana*, полученных из семян, отобранных на участке Масаны).

Качество полученных прочтений всех образцов оценивали при помощи FastQC v.0.11.9 и MultiQC v.1.10 [2]. По результатам анализа в данных программах подбирали параметры для дальнейшего повышения качества полученных прочтений с помощью Trimmomatic v.0.40 [3]. Очистка исходных прочтений выполнялась в режиме парных прочтений с использованием основных консольных параметров: ILLUMINACLIP, HEADCROP, MINLEN, LEADING, TRAILING и SLIDINGWINDOW.

Для выравнивания и сопоставления полученных прочтений с эталонным геномом *A. thaliana* (TAIR10, база данных EnsemblPlants, release 54) использовали алгоритмы bwa-mem2 v 2.2.1 [4] и samtools v 1.16.1 [5]. Результаты сопоставления были отсортированы и сохранены в формате BAM для дальнейшего использования в обработке результатов.

Поиск возможных вариантов однонуклеотидных полиморфизмов (SNPs) в геномах растений *A. thaliana*, произрастающих на территориях, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС, был выполнен с использованием алгоритма GATK4 v 4.3.0 [6] с использованием следующих консольных команд: HaplotypeCaller, GenotypeGVCFs и SelectVariants. В качестве референсного генома также использовали TAIR10, полученный из базы данных EnsemblPlants (release 54).

Сортировку значимых SNPs и выбор из полученных вариантов наиболее достоверных результатов осуществили с использованием двух основных параметров: качество нуклеотида в определенной позиции (QUAL > 1000) и качество сопоставления прочтений на референсный геном (MQ > 50).

Аннотацию полученных вариантов SNPs выполняли с помощью программного обеспечения SnpEff v 2.11 [7], дополнительно используя информацию, представленную в каталоге генетической изменчивости растений «1001Genomes» [8]. Наибольший интерес в данной работе представляли только те SNPs, которые не были аннотированы проектом

«1001Genomes», поскольку они могут представить новые, ранее неизвестные варианты генетических мутаций, которые могут быть связаны с адаптацией к стрессовым воздействиям (в частности, к радиационному воздействию).

Итоговые результаты поиска и аннотации возможных вариантов SNPs были получены в формате VCF (Variant Call Format) и содержали в себе информацию о номере хромосомы и точной позиции, где произошла однонуклеотидная замена. Вся дополнительная обработка полученных данных выполнена с применением языка программирования Python 3.8.

Основные результаты

В ходе выполнения поиска и аннотации вариантов однонуклеотидных полиморфизмов у потомков растений *A. thaliana*, произрастающих на участке Бабчин, было обнаружено 310 240 SNPs, из которых 24 006 SNPs не были аннотированы в каталоге генетической изменчивости растений *A. thaliana* «1001Genomes». Наибольшая частота возникновения однонуклеотидных полиморфизмов была зафиксирована на пятой (24,6 % от общего числа SNPs), четвертой (21,7 % от общего числа SNPs) и первой (20,8 % от общего числа SNPs) хромосомах.

У потомков растений *A. thaliana*, произрастающих на радиоактивно загрязненном участке Масаны, было обнаружено уже 439 783 SNPs, из которых 33 217 SNPs не были аннотированы в каталоге «1001Genomes», что может косвенно свидетельствовать о более высокой частоте мутационных процессов на участке Масаны, загрязненном радионуклидами как генотоксическим фактором.

Наибольшая частота возникновения однонуклеотидных полиморфизмов, как и для участка *Bab-0*, была также зафиксирована на первой (24,3 % от общего числа SNPs), пятой (21,2 % от общего числа SNPs) и четвертой (17,7 % от общего числа SNPs) хромосомах.

Для поиска вновь возникших SNPs, характерных для специфического стрессового фактора, каковым является хроническое ионизирующее излучение, был проведен детальный анализ тех однонуклеотидных полиморфизмов, которые не были аннотированы в каталоге «1001Genomes».

Для двух наборов однонуклеотидных полиморфизмов, не аннотированных в каталоге генетической изменчивости растений «1001Genomes», 12 368 SNPs были общими. Эти полиморфизмы были также исключены из дальнейшего анализа, поскольку, наиболее вероятно, они представляют собой пример географического полиморфизма. Таким образом, только 11 638 уникальных SNPs, полученных для потомков растений, отобранных с *Bab-0*, и 20 849 уникальных SNPs, идентифицированных для потомков растений, отобранных с *Masa*.

Также был выполнен анализ обогащения транскриптов с уникальными однонуклеотидными полиморфизмами с использованием геномной онтологии

(GO) и классификации белков с помощью системы PANTHER, которая основана на эволюционных связях между белками. У потомков растений *A. thaliana*, произраставших на радиоактивно загрязненном участке Масаны, было обнаружено 5 кандидатных генов (*KU80*, *LIG6*, *XRCC4*, *XRI1*, *ATLIG4*), связанных с ответом на рентгеновское излучение (GO:0010165), представляющих наибольший интерес в изучении радиационно-индуцированного полиморфизма.

Результаты получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-74-10004).

Список литературы

1. Набор реагентов для выделения ДНК «Сорб-ГМО-Б» из растительного сырья, продуктов питания и кормов на 50 выделений // СИНТОЛ: научно-производственная компания URL: <https://www.syntol.ru/bitrix/docs/GM-503%20SORB-GMO-B%20instrukciya.pdf> (дата обращения: 01.05.2023).

2. MultiQC: Summarize analysis results for multiple tools and samples in a single report / P. Ewels, M. Magnusson, S. Lundin, M. Kaller // Bioinformatics. 2014. Vol. 32(19). PP. 3047-3048. doi: 10.1093/bioinformatics/btw354.

3. Bolger A.M., Lohse M., Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data // Bioinformatics. 2014. Vol. 30(15). PP. 114-2120. doi:10.1093/bioinformatics/btu170.

4. Li H., Durbin R. Fast and accurate short read alignment with Burrows-Wheeler transform // Bioinformatics. 2009. Vol. 25(14). PP. 1754-1760. doi:10.1093/bioinformatics/btp324.

5. Twelve years of SAMtools and BCFtools / P. Danecek, J. Bonfield, J. Liddle [et al.] // Gigascience. 2021. Vol. 10(2). doi:10.1093/gigascience/giab008.

6. The Genome Analysis Toolkit: a MapReduce framework for analyzing next-generation DNA sequencing data / A. McKenna, M. Hanna, E. Banks [et al.] // Genome Res. 2010. Vol. 20(9). PP. 1297-1303. doi:10.1101/gr.107524.110.

7. A program for annotating and predicting the effects of single nucleotide polymorphisms, SnpEff / P. Cingolani, A. Platts, L. Wang [et al.] // Fly (Austin). 2012. Vol. 6(2). PP. 80-92. doi: 10.4161/fly.19695.

8. 1001 Genomes Consortium. 1,135 Genomes Reveal the Global Pattern of Polymorphism in Arabidopsis thaliana // Cell. 2016. Vol. 166(2). PP. 481-491. doi: j.cell.2016.05.063.

IDENTIFICATION OF SINGLE NUCLEOTIDE POLYMORPHISMS IN THE GENOME OF *A. THALIANA* FROM THE AREA CONTAMINATED AS A RESULT OF THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT

Podlutskii M.S.^{1,a}, Voronezhskaya V.S.¹, Volkova P.Yu.^{2,b}, Shesterikova E.M.¹, Korol M.Yu.¹, Babina D.D.¹, Blinova Y.A.¹, Podlutskaya A.V.¹, Kazakova E.A.¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

²Independent Researcher, Geel, Belgium, 2440

e-mail: ^a mikhail.podlutskii@gmail.com, ^b volkova.obninsk@gmail.com

This paper presents preliminary data on the results of the search and identification of single-nucleotide polymorphisms in the genomes of *Arabidopsis thaliana* plants growing in the territory contaminated after the Chernobyl accident.

Keywords: single nucleotide polymorphisms, DNA extraction and sequencing, chronic irradiation, radiation-induced polymorphism

A total of 310 240 single nucleotide polymorphisms (SNPs) were identified for *A. thaliana* seedlings obtained from *Bab-0*, while 439 783 SNPs were identified for seedlings obtained from *Masa*. For each accession, a shared set of 12 368 SNPs was identified among non-annotated SNPs in "1001Genomes", as well as 11 638 SNPs (*Bab-0*) and 20 849 SNPs (*Masa*) with the greatest potential to elucidate plant adaptation to radiation exposure.

The highest frequency of occurrence of single nucleotide polymorphisms for *A. thaliana* seedlings obtained from *Masa* was observed on the chromosome 5 (24.6 % of the total number of SNPs), followed by the chromosome 4 (21.7 % of the total number of SNPs) and the chromosome 1 (20.8 % of the total number of SNPs).

Similarly, for *A. thaliana* seedlings obtained from *Bab-0*, the highest frequency of occurrence of SNPs was also observed on the chromosome 1 (24.3 % of the total

number of SNPs), followed by the chromosome 5 (21.2 % of the total number of SNPs) and the chromosome 4 (17.7 % of the total number of SNPs).

The analysis of transcript enrichment with unique single nucleotide polymorphisms (SNPs) was performed using gene ontology (GO) and protein classification through the PANTHER system, which is based on evolutionary protein relationships. Five candidate

genes (*KU80*, *LIG6*, *XRCC4*, *XRI1*, *ATLIG4*) associated with the response to X-ray (GO:0010165) were identified for *A. thaliana* seedlings obtained from *Masa*, representing the greatest interest in studying radiation-induced polymorphism.

This research was funded by Russian Science Foundation, grant number 20-74-10004.

УДК 539.1.047: 582.682.4: 633.322: 633.37

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ РАЗДЕЛЬНОГО И СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И СВИНЦА

Празян А.А.^а, Шестерикова Е.М., Гераськин С.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: prazyana@yahoo.com*

В работе изучена активность антиоксидантных ферментов – каталазы и аскорбатпероксидазы после отдельного и сочетанного действия гамма-излучения и соли свинца. В результате выяснено, что гамма-облучение в дозе 20 Гр значительно повышает активность аскорбатпероксидазы в побегах как отдельно, так и совместно с $Pb(NO_3)_2$ в концентрации 2 мг/мл. Активность каталазы в корнях значительно повышалась только после действия соли свинца.

Ключевые слова: ячмень, каталаза, аскорбатпероксидаза, ферменты, гамма-облучение, свинец, сочетанное действие

В современном мире, где продовольственная безопасность находится в центре внимания, повышение урожайности сельскохозяйственных культур становится критически важной задачей. Достижение оптимальной продуктивности растений требует глубокого понимания физиологических и генетических механизмов их развития. Изучение влияния ионизирующего излучения на растения актуально, поскольку оно способно изменять структуру и функцию биологических систем [1].

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами является важной проблемой. Ареалы выбросов промышленных предприятий достигают огромных масштабов. В малых количествах некоторые ТМ необходимы для живых организмов, но их повышенные концентрации ведут к нарушению роста и развития растений [2]. Свинец является одним из наиболее распространенных загрязнителей агросферы, относится к первому классу опасности и способен влиять на морфологию и физиологию растений [3]. Он подавляет прорастание, удлинение корней, развитие проростков, продукцию хлорофилла и др. [4].

В реальных условиях на растения влияют комбинации факторов, отличающихся по токсичности и механизмам действия. В связи с этим особую актуальность приобретает изучение сочетанного действия

факторов разной природы. В нашем исследовании изучено сочетанное действие ионизирующего излучения и свинца на проростки ячменя сорта «Нур».

Повышенная генерация активных форм кислорода является одной из главных реакций на стрессовые воздействия. В случае радиоактивного облучения и отравления тяжелыми металлами такой эффект также прослеживается. Для детоксикации и, в свою очередь, защиты клеток от отрицательного действия АФК, а также продуктов перекисного окисления липидов растения используют систему ферментативных и неферментативных антиоксидантов [5].

В данной работе была произведена оценка активности антиоксидантных ферментов каталазы (CAT) и аскорбатпероксидазы (APX) в образцах ячменя сорта «Нур» в условиях отдельного и сочетанного действия гамма-излучения и свинца.

Семена облучали дозой 20 Гр (мощность дозы 60 Гр/ч) на установке «ГУР-120» (^{60}Co) (НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, Обнинск). Семена помещали в бумажные пакеты с площадью поверхности 25 см², что гарантирует равномерное распределение дозы. Поглощенную семенами дозу излучения оценивали дозиметром ДКС-101 (Россия).

В эксперименте использовали соль $Pb(NO_3)_2$. Угнетающая развитие проростков, но не ведущая к их

гибели концентрация (2 мг/мл) была оценена в наших предыдущих исследованиях.

Расчеты проводили в программах пакета Microsoft Office 2010 (Excel) и Statistica v. 8.0. Приведенные различия подтверждены статистически с уровнем значимости $p \leq 0,05$

Активность фермента каталазы определяли по динамике разложения пероксида водорода ферментом. Анализ выполнен по методике, описанной в [5] с модификациями.

Метод оценки активности аскорбатпероксидазы основан на определении скорости разложения перекиси водорода аскорбатпероксидазой исследуемого образца с образованием воды и дегидроаскорбата.

Полученные экстракты анализировали на бесцветном спектрофотометре NanoDrop-2000 (Thermo Fisher Scientific, США).

При оценке активности каталазы в побегах статистически значимых изменений не выявлено (рис. 1). При оценке активности в корнях наблюдается значимое повышение после воздействия свинцом (рис. 2).

Иная картина отмечена при изучении данных об активности аскорбатпероксидазы в побегах (рис. 3). Наблюдается значимое повышение ее активности во всех типах эксперимента, кроме того, отмечены значимые отличия сочетанного действия факторов и отдельно гамма-облучения. При оценке аскорбатпероксидазы в корнях, напротив, статистически значимые отличия отсутствуют (рис. 4).

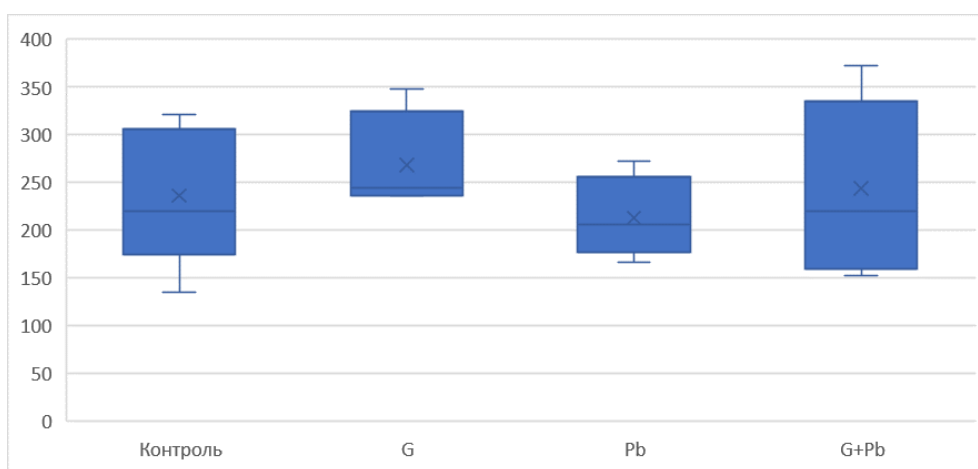


Рисунок 1. Активность каталазы в побегах. По оси абсцисс – активность фермента (МЕ); по оси ординат – условие произрастания
* – отличия от контроля с уровнем значимости $p < 0,05$

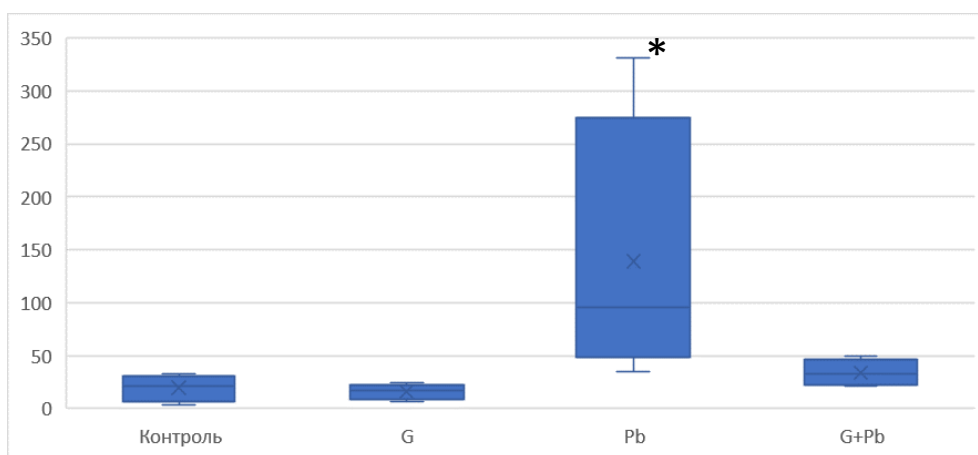


Рисунок 2. Активность каталазы в корнях. По оси абсцисс – активность фермента (МЕ); по оси ординат – условие произрастания
* – отличия от контроля с уровнем значимости $p < 0,05$

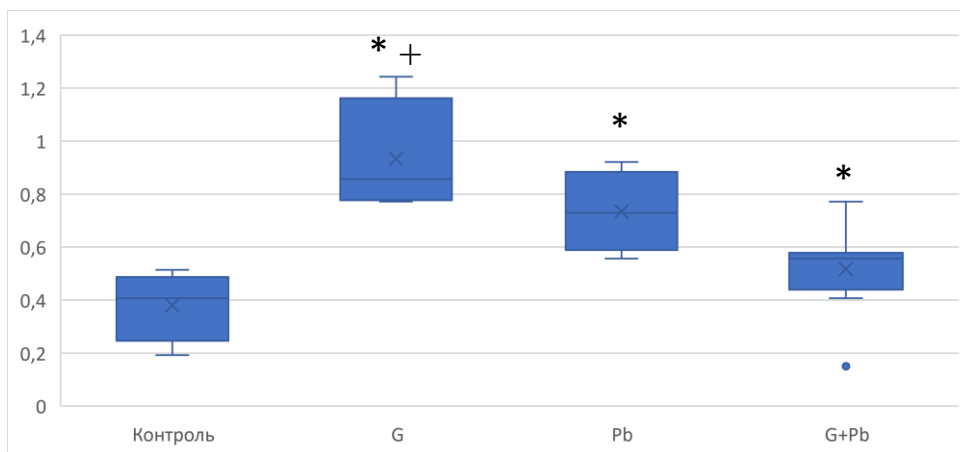


Рисунок 3. Концентрация аскорбатпероксидазы в побегах. По оси абсцисс – активность фермента (МЕ); по оси ординат – условие произрастания
* – отличия от контроля с уровнем значимости $p < 0,05$
+ – отличия от сочетанного действия факторов $p < 0,05$

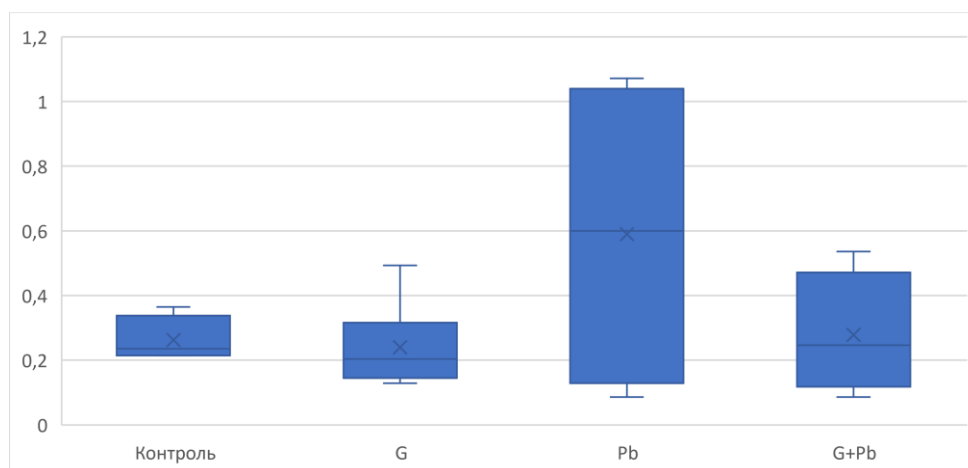


Рисунок 4. Концентрация аскорбатпероксидазы в корнях. По оси абсцисс – активность фермента (МЕ); по оси ординат – условие произрастания
* – отличия от контроля с уровнем значимости $p < 0,05$

При рассмотрении результатов экспериментов по выявлению активности ферментов можно предположить, что активность аскорбатпероксидазы повышена в противовес незначимых изменений каталазы, так как аскорбатпероксидаза и каталаза часто действуют последовательно, как в данном случае. В конечном итоге, полученные данные позволяют отметить, что предварительное облучение семян значимо влияет на активность упомянутых антиоксидантных ферментов, кроме того, значимые отличия группы сочетанного действия и отдельного облучения в дозе 20 Гр могут указывать на антагонистические или синергетические механизмы, что требует дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Chronic Ionizing Radiation of Plants: An Evolutionary Factor from Direct Damage to Non-Target Effects / G.T. Duarte, P.Y.u Volkova, F. Fiengo Perez, N.

Horemans // Plants. 2023. Vol. 12(5). P. 1178. doi: 10.3390/plants12051178.

2. Иванов Н.Р. Тяжелые металлы и радионуклиды в агроэкосистемах. М.: МГУ, 1994. 245 с.

3. Методика оценки экологических последствий техногенного загрязнения агроэкосистем / Р.М. Алексахин [и др.]. М.: Россельхозакадемия, 2004. 88 с.

4. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants / B. Pourrut [et al.] // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 2011. Vol. 213. PP. 113-136. doi: 10.1007/978-1-4419-9860-6_4.

5. Классификация системы антиоксидантной защиты как основа рациональной организации экспериментального исследования окислительного стресса у растений / Е.В. Прадедова [и др.]. // Физиология растений. 2011. Т. 58. № 2. С. 177-185.

6. Биссвангер Х. Практическая энзимология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 328 с.

EVALUATION OF ACTIVITY OF ANTIOXIDANT ENZYMES IN BARLEY SEEDS AFTER SEPARATE AND COMBINED EXPOSURE TO GAMMA RADIATION AND LEAD

Prazyan A.A.^a, Shesterikova E.M., Geraskin S.A.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: aprazyana@yahoo.com*

The work studied the activity of antioxidant enzymes – catalase and ascorbate peroxidase after separate and combined action of gamma radiation and lead. As a result, it was found that gamma irradiation at a dose of 20 Gy significantly increases the activity of ascorbate peroxidase in shoots, both separately and together with Pb(NO₃)₂ at a concentration of 2 mg/ml. The activity of catalase in the roots significantly increased only after the action of lead salt.

Keywords: *barley, catalase, ascorbate peroxidase, enzymes, gamma irradiation, lead, combined action*

УДК 633.16+539.1.047+58.04+58.02

АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ В ПРОРОСТКАХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ РАЗДЕЛЬНОГО И СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ И СВИНЦА

Смирнова А.С.^a, Празян А.А., Пишенин И.А., Гераськин С.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: sas.smirnova@mail.ru*

Для анализа ответа антиоксидантной системы ячменя обыкновенного на отдельное и сочетанное действие γ -облучения и свинца было оценено содержание низкомолекулярных антиоксидантов (аскорбиновой кислоты, окисленной и восстановленной форм глутатиона) и малонового диальдегида в корнях и побегах. Отмечено повышение содержания аскорбиновой кислоты, восстановленного глутатиона и малонового диальдегида в корнях проростков, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян, в отличие от контроля и облученных растений. В побегах обнаружены значимые отличия в концентрациях восстановленного глутатиона и малонового диальдегида, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян, по сравнению с контролем и облученными растениями.

Ключевые слова: *ячмень, γ -облучение, свинец, низкомолекулярные антиоксиданты*

В настоящее время на рост и развитие растений оказывают влияние множество антропогенных факторов. Одним из них является загрязнение тяжелыми металлами. Свинец является распространенным токсичным металлом, повышенные концентрации которого наблюдаются на значительной части территории Российской Федерации [8]. Особый интерес представляет комбинирование разных факторов, которые могут воздействовать на растения, поскольку ранее было показано [1], что при сочетании низких доз и концентраций синергические и антагонистические эффекты наблюдаются с повышенной частотой. В данной работе рассмотрено влияние отдельного и сочетанного действия γ -облучения и свинца на

содержание низкомолекулярных антиоксидантов и малонового диальдегида в корнях и побегах ячменя.

Методика

В качестве объекта исследования были использованы семена ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Нур первой репродукции 2019 года. Семена облучали дозой 20 Гр (мощность дозы 60 Гр/ч) на установке ГУР-120 (⁶⁰Co) (НИЦ «Курчатовский институт – ВНИИРАЭ, г. Обнинск). Данная доза является стимулирующей для сорта Нур [2].

В первом экспериментальном варианте в 7 мл дистиллированной воды проращивали облученные

семена. Во втором варианте необлученные семена проращивали в растворе $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией 2 мг/мл. Такая концентрация свинца приводит к угнетению развития проростков, но не к их гибели [4]. В третьем варианте проращивали облученные семена в воде с добавлением соли свинца в той же концентрации. Семена контрольных образцов проращивали в дистиллированной воде.

Образцы корней и побегов для биохимического анализа отбирали на стадии 7-дневных проростков, помещали в криобирки и фиксировали в жидком азоте.

Концентрации аскорбиновой кислоты (АК), восстановленного и окисленного глутатиона были оценены методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на приборе Shimadzu LC-30 Nexera (Япония). Для этого навеску 0,20 г гомогенизировали в жидком азоте, используя фарфоровые ступку и пестик. Осадок ресуспендировали в 1 мл холодного экстрагирующего раствора (5 % фосфорная кислота, 1 мМ ЭДТА, 0,1 % муравьиная кислота). Гомогенаты центрифугировали в течение 20 минут на микроцентрифуге «Eppendorf» с охлаждением (4 °С) при скорости 14.500 rpm. Осадок снова ресуспендировали в 1 мл того же холодного экстрагирующего раствора и повторно центрифугировали при описанных выше условиях. Полученные после двух экстракций супернатанты объединяли. Комбинированный супернатант фильтровали через SPE колоноку Biotage – ISOLUTE C18. Экстракт (10 мкл) вводили в колонку с обращенной фазой Shim-pack XR-ODSII (2 мкм, диаметр 3.0 мм, длина 100 мм, Shimadzu, Япония). Проведено две технические репликации.

Содержание малонового диальдегида (МДА) определяли спектрофотометрически на приборе NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific). Для этого навеску растительного материала массой 50 мг гомогенизировали в жидком азоте в фарфоровой ступке. Гомогенат помещали в пробирку, содержащую 0,5 мл 0,1 % ТСА + 10 мкл 1 мМ ЭДТА. Образцы центрифугировали в холодной (4 °С) центрифуге при 12000 rpm в течение 15 мин. 0,125 мкл супернатанта помещали в новую пробирку, содержащую 1 мл 20 % ТСА, содержащего 0,67 % ТВА. Нагревали смесь при 95 °С в течение 15 мин в твердотельном термостате и быстро охлаждали в холодильнике (cool box) в течение 10 мин для остановки реакции. Оптическую плотность измеряли при 532 нм и рассчитывали содержание МДА в образце.

Анализ результатов выполнен в MS Office Excel. Значимость различий оценивали с помощью U-критерия Манна-Уитни в Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение

Аскорбиновая кислота играет роль во многих процессах роста и развития растения, однако основная функция данного соединения – антиоксидантная. АК взаимодействует непосредственно с синглетным кислородом и пероксидом водорода, и участвует в восстановлении других низкомолекулярных антиоксидантов [6].

В ходе хроматографического анализа было выявлено, что в корнях проростков, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян, концентрации АК значительно отличались от образцов растений, пророщенных на дистиллированной воде (рис. 1А). Однако в побегах значимых отличий в концентрациях АК не наблюдалось (рис. 1Б).

Глутатион присутствует во всех структурах клетки, реагирует с металлами, электрофильными соединениями, а также способен взаимодействовать с пероксидом водорода, что указывает на его антиоксидантную функцию [7]. Отношение окисленной и восстановленной формы глутатиона является важным показателем окислительно-восстановительного состояния клетки. В концентрациях окисленного глутатиона в корнях и побегах значимых отличий не было обнаружено, за исключением значимого понижения содержания данного антиоксиданта в корнях проростков, пророщенных в содержащем свинец растворе, относительно облученных растений, пророщенных на дистиллированной воде (рис. 2А, рис. 2Б).

Однако в корнях проростков, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян, концентрации восстановленного глутатиона значительно отличались от образцов растений, пророщенных на дистиллированной воде из облученных семян (рис. 3А). В побегах значимые отличия были выявлены для проростков, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян относительно образцов растений, пророщенных на дистиллированной воде (рис. 3Б).

Малоновый диальдегид является продуктом перекисного окисления липидов, повышение его содержания указывает на наличие окислительного стресса в клетках растения [8]. И в корнях, и в побегах проростков, выращенных в растворе соли свинца из необлученных и облученных семян, концентрации МДА значительно отличались от образцов растений, пророщенных на дистиллированной воде (рис. 4А, рис. 4Б). Примечательно, что значимые отличия были обнаружены в концентрациях МДА растений, пророщенных из облученных и необлученных семян на дистиллированной воде.

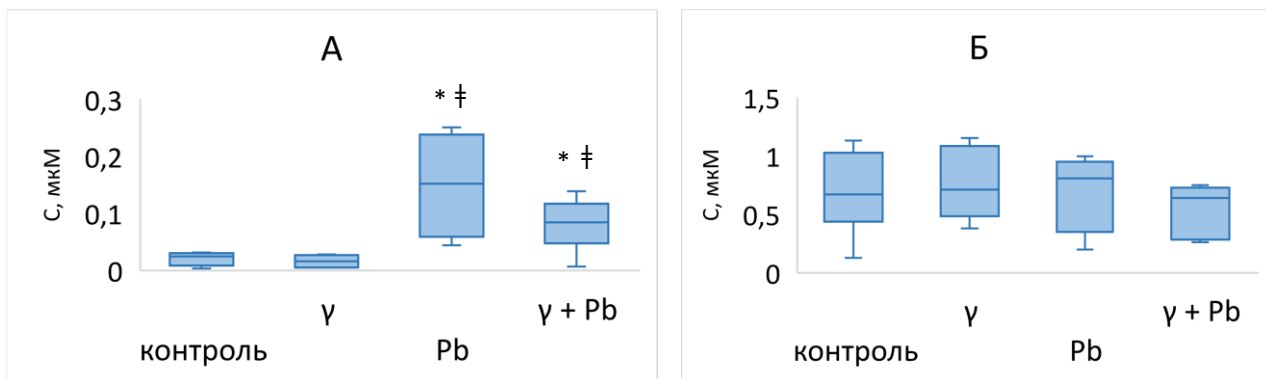


Рисунок 1. Концентрации аскорбиновой кислоты в зависимости от действия на семена γ -излучения и свинца: А – в корнях, Б – в побегах
 (* – различия статистически значимы по сравнению с контролем, $p < 0,05$, U-тест;
 ‡ – различия статистически значимы по сравнению с γ -облучением, $p < 0,05$, U-тест)

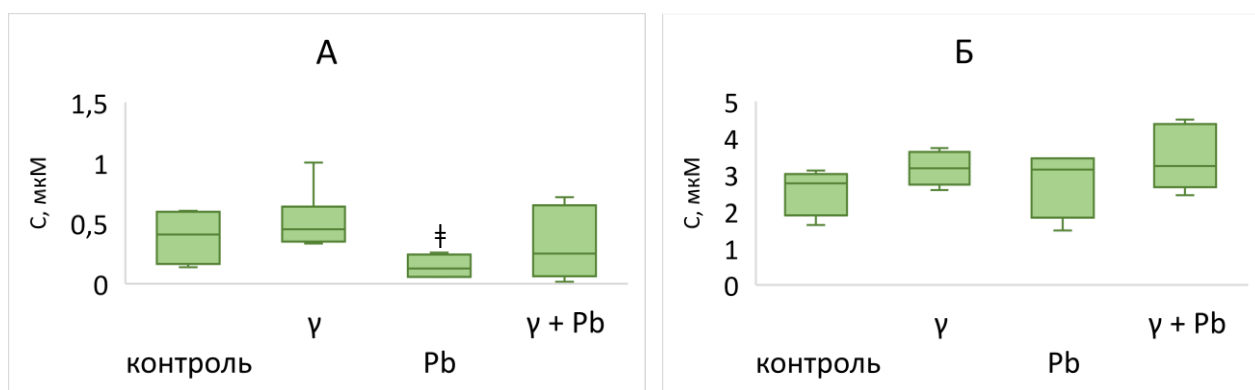


Рисунок 2. Концентрации окисленного глутатиона в зависимости от действия на семена γ -излучения и свинца: А – в корнях, Б – в побегах
 (‡ – различия статистически значимы по сравнению с γ -облучением, $p < 0,05$, U-тест)

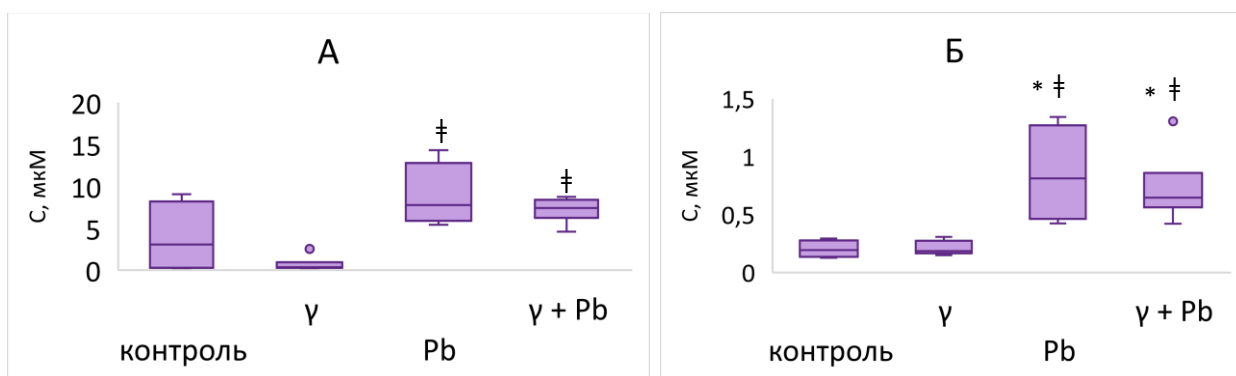


Рисунок 3. Концентрации восстановленного глутатиона в зависимости от действия на семена γ -излучения и свинца: А – в корнях, Б – в побегах
 (* – различия статистически значимы по сравнению с контролем, $p < 0,05$, U-тест;
 ‡ – различия статистически значимы по сравнению с γ -облучением, $p < 0,05$, U-тест)

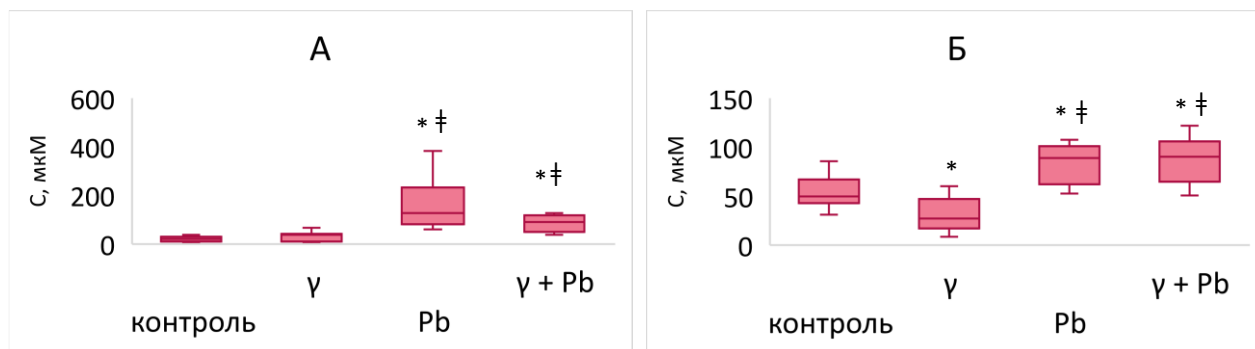


Рисунок 4. Концентрации малонового диальдегида в зависимости от действия на семена γ -излучения и свинца: А – в корнях, Б – в побегах

(* – различия статистически значимы по сравнению с контролем, $p < 0,05$, U-тест;
‡ – различия статистически значимы по сравнению с γ -облучением, $p < 0,05$, U-тест)

Увеличение содержания восстановленного глутатиона и МДА в корнях и побегах ячменя указывает на изменение антиоксидантного статуса растений при действии свинца вследствие окислительного стресса. Также примечательно, что в корнях растений, подвергшихся действию Pb, значительно увеличивалось содержание аскорбата, что может быть связано с преимущественным накоплением свинца в корнях. Облученные семена не показывали значимых отличий в концентрациях АК, окисленного и восстановленного глутатиона и МДА в корнях и побегах по сравнению с контрольными, за исключением изменения содержания МДА в побегах, что указывает на снижение уровня перекисного окисления липидов у облученных растений. Для оценки синергических и антагонистических эффектов взаимодействия факторов (γ -облучение семян и проращивание в соли свинца) использовали коэффициент взаимодействия K_w [3]. Для содержания в корнях АК и МДА коэффициент взаимодействия K_w был статистически значимо ($p < 0,05$) меньше 1, что говорит об антагонистическом взаимодействии факторов, для восстановленного глутатиона K_w был статистически значимо ($p < 0,05$) больше 1, что указывает на синергизм γ -облучения и свинца. Для содержания в побегах восстановленного глутатиона коэффициент взаимодействия K_w был статистически значимо ($p < 0,05$) меньше 1, что говорит об антагонистическом взаимодействии факторов, для МДА K_w был статистически значимо ($p < 0,05$) больше 1, что указывает на синергический эффект взаимодействия факторов. Данные результаты частично согласуются с проведенным ранее исследованием динамики фенологических фаз [5], демонстрирующим смягчение токсического действия свинца предварительным облучением семян в стимулирующей дозе. Требуется дальнейшее исследование антиоксидантной системы для объективной оценки сочетанного действия γ -облучения и свинца на растения ячменя.

Список литературы

1. Cytogenetic effects of combined radioactive (^{137}Cs) and chemical (Cd, Pb and 2,4-D herbicide) contamination on spring barley intercalary meristem cells / S.A. Geras'kin, J.K. Kim, V.G. Dikarev [et al.] // Mutation Res. 2005. Vol. 586. PP. 147-159.
2. Geras'kin S., Churyukin R., Volkova P. Radiation exposure of barley seeds can modify the early stages of plants' development // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 177. PP. 71-83.
3. Гераськин С.А., Дикарев В.Г., Удалова А.А. Влияние комбинированного действия ионизирующего излучения и солей тяжелых металлов на частоту хромосомных aberrаций в листовой меристеме ярового ячменя // Генетика. 1996. Т. 32. № 2. С. 279-288.
4. Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца / А.В. Дикарев, В.Г. Дикарев, Н.С. Дикарева, С.А. Гераськин // Сельскохозяйственная биология. 2014. № 5. С. 525-537.
5. Динамика прорастания семян ярового ячменя при воздействии γ -излучения и свинца / А.А. Празян, С.В. Битаршвили, С.А. Гераськин, Е.С. Макаренко // Сельскохозяйственная биология. 2023. Т. 58. № 3. С. 525-537.
6. Роль аскорбиновой кислоты в адаптации *vitis* L. К низким температурам / Г.К. Киселева, И.А. Ильина, В.В. Соколова [и др.] // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2023. № 79(1). С. 93-107.
7. Радюкина Н.Л., Михеева Л.Е., Карбышева Е.А. Низкомолекулярные антиоксиданты в клетках цианобактерий и растений // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139. № 3. С. 254-266.
8. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / Н.И. Санжарова, П.Н. Цыгвинцев, В.С. Анисимов [и др.]. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.

ANALYSIS CONCENTRATION OF LOW-MOLECULAR ANTIOXIDANTS IN BARLEY AFTER SEPARATE AND COMBINED ACTION OF GAMMA IRRADIATION AND LEAD

Smirnova A.S.^a, Prazyan A.A., Pishenin I.A., Geras'kin S.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: sas.smirnova@mail.ru

To analyze the response of the antioxidant system of ordinary barley to the separate and combined effects of gamma irradiation and lead, the concentration of low molecular weight antioxidants (ascorbic acid, oxidized and reduced forms of glutathione) and malonic dialdehyde in roots and shoots was evaluated. There was an increase in the concentration of ascorbic acid, reduced glutathione and malonic dialdehyde in the roots of seedlings grown in a solution of lead salt from non-irradiated and irradiated seeds, in contrast to the control and irradiated plants. Statistically significant differences were found in the shoots in the concentrations of reduced glutathione and malondialdehyde grown in a solution of lead salt from non-irradiated and irradiated seeds, compared with the control and irradiated plants.

Keywords: barley, γ -irradiation, lead, low-molecular antioxidants

УДК (633.367 + 57.084.1):539.1.047: 57.033

АНАЛИЗ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОРОСТКОВ *L. ANGUSTIFOLIUS* ПОСЛЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН

Ханова А.С.^a, Король М.Ю., Празян А.А., Бабина Д.Д., Бондаренко Е.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^amicenyk-anastasi@mail.ru

Для изучения влияния γ -излучения на морфофизиологические параметры проростков *L. angustifolius* L. семена подвергли облучению в дозах от 25 до 1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/ч. В результате анализа морфометрических параметров *L. angustifolius* выявлено, что дозы в диапазоне от 100 до 1200 Гр оказали статистически значимое негативное влияние на длину гипокотыля. Также между дозой и исследованными морфометрическими параметрами (длина гипокотыля и корня, биомасса проростков) зафиксирована статистически значимая слабая отрицательная корреляция. Доза 1200 Гр оказала ингибирующее воздействие на развитие проростков люпина узколистного. γ -излучение статистически значимо ингибировало показатель Fv/Fm в диапазоне доз от 25 до 1200 Гр, а дозы 100, 400 и 800 Гр оказали негативное влияние на параметр Y(II). Для дальнейших радиобиологических исследований дозы 800 Гр и выше будут расцениваться как ингибирующие. В протоколах радиационного мутагенеза *L. angustifolius* предлагается применение доз от 100 до 600 Гр.

Ключевые слова: *L. angustifolius*, люпин узколистный, гамма-облучение, фотосинтетические параметры, морфометрические параметры

Люпин (*Lupinus* L.) – перспективная высокобелковая сельскохозяйственная культура, для создания новых сортов которой используют метод радиационного мутагенеза [1]. В Российской Федерации (РФ) возделывают несколько видов люпина: *L. angustifolius*, *L. luteus*, *L. albus*. Но наиболее распространенный среди них – люпин узколистный, поскольку он менее требователен к условиям выращивания, чем другие культуры из данной группы (категории, данного вида) [2]. Однако, несмотря на преимущества люпина

перед другими зернобобовыми культурами (соя, горох и др.) из-за высокого содержания белка и масла, низкая устойчивость к грибковым патогенам, в частности, к возбудителю антракноза *Colletotrichum lupini*, мешает его массовому возделыванию не только в РФ, но и странах СНГ [3]. В связи с этим, встает необходимость в увеличении генетического разнообразия и создании новых устойчивых как к биотическим, так и абиотическим факторам высокоурожайных отечественных сортов люпина. И для эффективного

использования применения γ -излучения в качестве мутагенного агента в селекции *L. angustifolius* необходимо провести ряд радиобиологических исследований. Таким образом, целью данного исследования является изучение влияния γ -облучения семян на морфофизиологические параметры проростков люпина узколистного.

Сухие семена *L. angustifolius* отечественного сорта «Белорозовый 144» (любезно предоставленные ВНИИ люпина – филиал ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса», г. Брянск) подвергли облучению в дозах 25, 50, 100, 200, 400, 800 и 1200 Гр с мощностью дозы 90 Гр/ч на уникальной научной установке ГУР-120 (^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ) в 3-х повторностях по 30 семян в каждой. Семена выращивали в контролируемых условиях климатической камеры для

культивирования растений. Измерение параметров фотосинтеза *L. angustifolius* осуществляли флуориметром JUNIOR-PAM. Статистическую обработку и визуализацию результатов проводили непараметрическими методами в среде программирования R (версия 4.2.3) и Python (версия 3.11).

Анализ морфометрических параметров люпина узколистного выявил, что дозы в диапазоне от 100 до 1200 Гр статистически значимо ингибировали длину гипокотыля.

Дозы 100 и 1200 Гр оказали статистически значимое негативное влияние на развитие корней (рис. 2), а дозы 800 и 1200 Гр – на биомассу проростков (рис. 3).

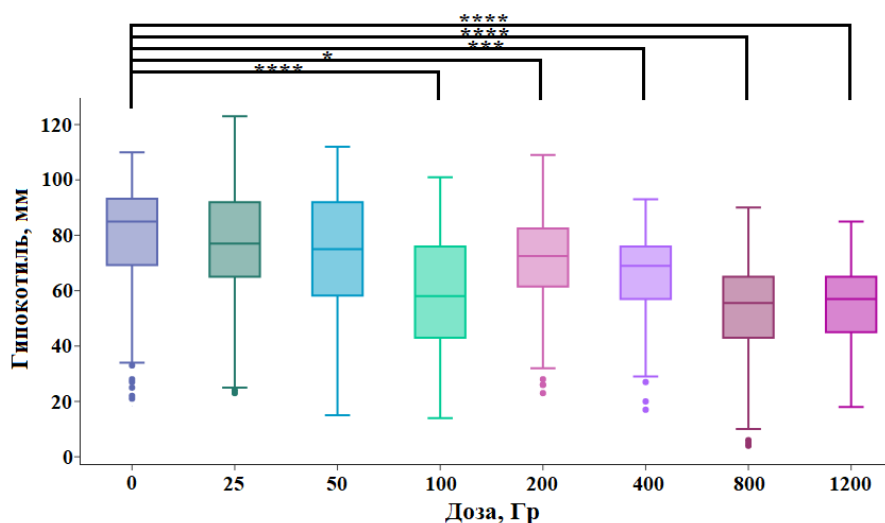


Рисунок 1. Оценка влияния гамма-облучения на длину гипокотыля *L. angustifolius*

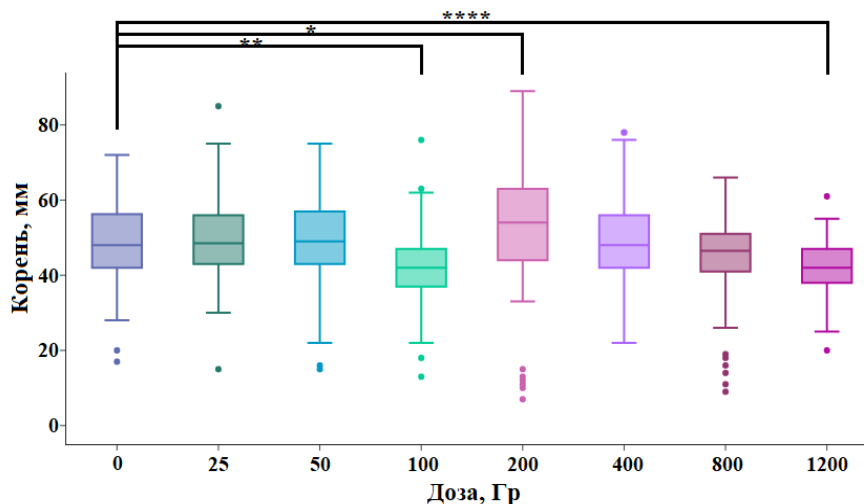


Рисунок 2. Оценка влияния гамма-облучения на длину корня *L. angustifolius*

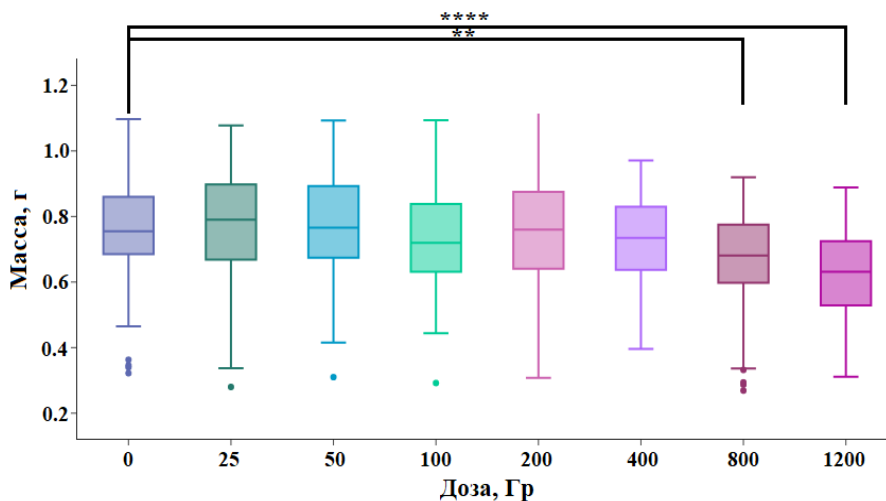


Рисунок 3. Оценка влияния гамма-облучения на биомассу проростка *L. angustifolius*

Между дозой и исследованными морфометрическими параметрами зафиксирована статистически значимая слабая отрицательная корреляция (рис. 1). Также между изученными морфометрическими параметрами выявлена статистически значимая положительная корреляция, наиболее сильная – между длиной гипокотыля и биомассой проростков люпина узколистного ($\rho = 0,71$; $p = 2,2e-16$) (рис. 4).

Доза 1200 Гр оказала ингибирующее воздействие на формирование и развитие первых истинных листьев у люпина узколистного сорта «Белорозовый

144», поэтому параметры фотосинтеза оценивали в диапазоне доз от 25 до 800 Гр.

В результате анализа фотосинтетических параметров проростков *L. angustifolius* выявлено, что дозы в диапазоне от 25 до 800 Гр статистически значимо ингибировали показатель максимального фотохимического квантового выхода (F_v/F_m) (рис. 5).

Воздействие γ -излучения в дозах 100, 400 и 800 Гр значимо снизило величину параметра эффективного фотохимического квантового выхода ФСИ ($\Upsilon(II)$) в проростках *L. angustifolius* по сравнению с контролем (рис. 6).

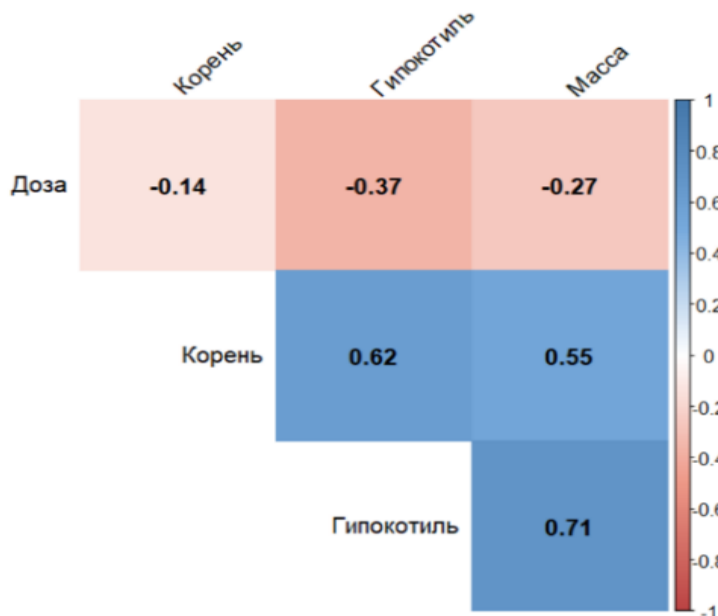


Рисунок 4. Корреляционная матрица изучаемых морфометрических параметров.

Цифрами представлены значения коэффициента корреляции Спирмена.

Синим цветом обозначена положительная корреляция, розовым – отрицательная

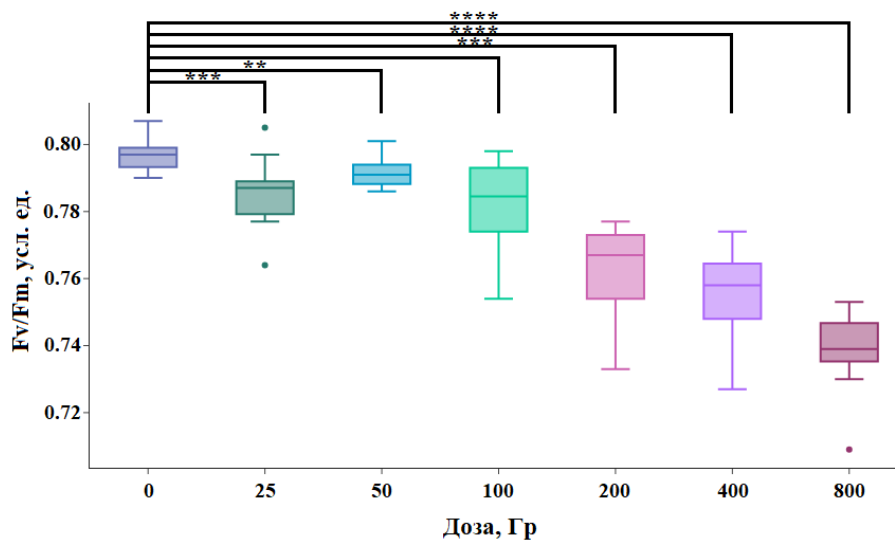


Рисунок 5. Изменение максимального фотохимического квантового выхода ФСII в проростках *L. angustifolius* после воздействия γ -излучения на семена

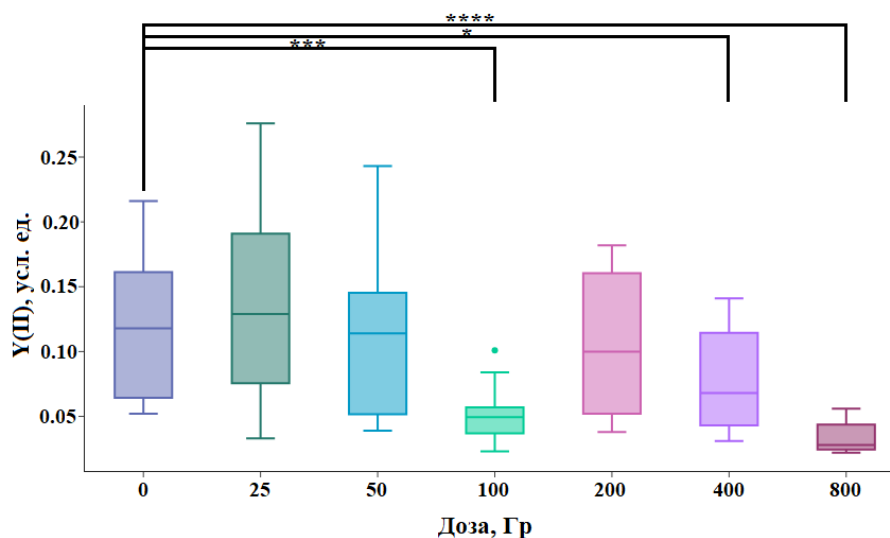


Рисунок 6. Изменение эффективного фотохимического квантового выхода ФСII в проростках *L. angustifolius* после воздействия γ -излучения на семена

Дозы 100, 400 и 800 Гр оказали статистически значимое негативное влияние на параметр относительной скорости линейного транспорта электронов (ETR). Оценка влияния γ -излучения на фотосинтетические параметры фотохимического (qP) и нефотохимического тушения (qN) показала статистически значимое уменьшение показателей qP при дозах 100, 400 и 800 Гр и qN при дозах 50, 100, 400 и 800 Гр по сравнению с растениями в контрольной группе. Также анализ флуоресценция хлорофилла выявил, что дозы 50, 100, 400 и 800 Гр статистически значимо ингибировали параметр квантового выход регулируемой энергии диссипации (Y(NPQ)), в то время как показатель квантового выхода нефотохимического тушения флуоресценции (Y(NO)) увеличился под воздействием γ -излучения по сравнению с контролем.

Таким образом, в дальнейших исследованиях дозы 800 Гр и выше будут расцениваться как ингибирующие. В протоколах радиационного мутагенеза *L. angustifolius* предлагается применение доз от 100 до 600 Гр.

Список литературы

1. Новик Н.В., Гераськин С.А., Якуб И.А. Влияние γ -облучения семян на внутрисортную изменчивость количественных признаков люпина желтого // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т.62. № 6. С. 620-628.
2. Продуктивность сортов люпина узколистного в условиях среднего Урала / В.В. Чулкова, Г.В. Вяткина, В.А. Чулков, Т.В. Павленкова // Аграрный вестник Урала. Спецвыпуск «Биология и биотехнологии». 2022. С. 69-80.

3. The resistance of narrow-leaved lupin to Diaporthetoxica is based on the rapid activation of defense response genes / M. Ksiazkiewicz, S. Rychel-

Bielska, P. Plewinski [et al.] // J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22. I. 2. P. 574.

ANALYSIS OF MORPHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF SEEDLINGS OF *L. ANGUSTIFOLIUS* AFTER GAMMA IRRADIATION OF SEEDS

Khanova A.S.^a, Korol M.Yu., Prazyan A.A., Babina D.D., Bondarenko E.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^amicenyk-anastasi@mail.ru

To study the effect of γ -irradiation on morphometric and photosynthetic parameters of *Lupinus angustifolius* L. seedlings, the seeds were irradiated in the dose range from 25 to 1200 Gy at a dose rate of 90 Gy/h. The dose range from 100 to 1200 Gy had an impact on the hypocotyl length of *L. angustifolius*. Additionally, a statistically significant weak negative correlation was observed between dose and the measured morphometric parameters (hypocotyl, root lengths, and seedling weight). A dose of 1200 Gy had an inhibitory effect on the development of narrow-leaved lupine seedlings. γ -radiation significantly increased the Fv/Fm parameter in the dose range from 25 to 1200 Gy. Exposure to γ -radiation at doses of 100, 400 and 800 Gy inhibited the Y(II) parameter. For further radiobiological research, it is recommended to use a dose range from 100-600 Gy. These results might be useful in the protocols of radiation mutagenesis of Russian varieties of narrow-leaved.

Keywords: *L. angustifolius*, narrow-leaved lupin, gamma irradiation, photosynthetic parameters, morphometric parameters

УДК (633.367 + 57.084.1):539.1.047: 57.033

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОРОСТКОВ *LUPINUS LUTEUS* ПОСЛЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН

Ханова А.С.^{1,a}, Крылова П.С.², Бондаренко Е.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация

e-mail: ^amicenyk-anastasi@mail.ru

Для изучения влияния γ -излучения на морфометрические и фотосинтетические параметры проростков *Lupinus luteus* L. семена подвергли облучению в дозах от 25 до 400 Гр при мощности дозы 100 Гр/ч (первый независимый эксперимент) и в дозах от 25 до 1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/ч (второй независимый эксперимент). В результате анализа морфометрических параметров (длина hypocotyla, длина корня и биомасса проростков) *L. luteus* при мощности дозы 100 Гр/ч зафиксирован статистически значимый стимулирующий эффект в группе 50 Гр. Воздействии γ -излучения в дозе 200 и 400 Гр ингибировало длину hypocotyla. Диапазон доз от 100 до 1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/ч оказал негативное влияние на длину hypocotyla люпина желтого. В результате анализа двух независимых экспериментов выявлен самый чувствительный к γ -облучению параметр из изученных – длина hypocotyla. В первом эксперименте γ -излучение статистически значимо увеличило показатель Fv/Fm при дозах 25 и 200 Гр, а доза 400 Гр оказала негативное влияние на параметр Y(II). Во втором эксперименте доза 50 Гр оказала статистически значимый симулирующий эффект на показатель Y(II) по сравнению с контролем.

Ключевые слова: *L. luteus*, люпин желтый, гамма-облучение, морфометрические параметры, фотосинтетические параметры

Обеспечение продовольственной безопасности страны – одна из важнейших задач любого государства. Одним из способов решения данной задачи является повышение качества продуктов питания, увеличение в рационе населения высокоусвояемого растительного белка. Для этого подходят различные зернобобовые культуры: соя, горох, люпин и другие. Несмотря на то, что соя является одной из самых высокобелковых культур, используемых в пищевой промышленности и кормопроизводстве, ее выращивание на территории РФ затрудняется малой районированностью сортов и высокой стоимостью возделывания. Для центральной части России, где, зачастую, располагаются малопродуктивные, кислые, с легким механическим составом почвы, лучшим решением для получения хороших урожаев высокобелкового сырья является выращивание люпина желтого (*Lupinus luteus* L.) [1].

Несмотря на то, что *L. luteus* по содержанию белка и его качеству не уступает сое, низкая устойчивость данной культуры к фитопатогенным грибам вызывает трудности в ее массовом возделывании на территории РФ [2]. В связи с этим, возникает необходимость в увеличении генетического разнообразия отечественных сортов люпина желтого с целью отбора устойчивых форм к фитопатогенам, в особенности к антракнозу, вызываемому грибами *Colletotrichum lupini*. Для получения новых устойчивых к биотическим и абиотическим факторам (к засухе, засолению почв и др.) форм растений используется радиационный мутагенез [3].

Для успешного применения γ -излучения в качестве мутагенного агента в селекции *L. luteus* необходимо проведение ряда радиобиологических исследований. Целью данного исследования является изучение влияния γ -облучения семян на морфометрические параметры проростков и активность фотосинтетического аппарата растений *L. luteus*.

Сухие семена *L. luteus* отечественного сорта «Надежный» (любезно предоставленные ВНИИ

люпина – филиал ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса», г. Брянск) подвергли облучению в дозах 25, 50, 100, 200, 400 Гр (первый независимый эксперимент с мощностью дозы 100 Гр/ч в 3-х повторностях по 20 семян в каждой) и в дозах 25, 50, 100, 200, 400, 800 и 1200 Гр (второй независимый эксперимент с мощностью дозы 90 Гр/ч в 3-х повторностях по 30 семян в каждой) на уникальной научной установке ГУР-120 (^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ). Контролем служили необлученные семена. Проращивание семян люпина желтого проводили в контролируемых условиях климатической камеры для выращивания растений – в фитотроне ЛиА-2. Измерение параметров фотосинтеза *L. luteus* осуществляли флуориметром JUNIOR-PAM. Статистическую обработку результатов проводили непараметрическими методами в среде программирования R (версия 4.2.2) и Python (версия 3.11).

В результате анализа морфометрических параметров (длина hypocotyle, длина корня и биомасса проростков) люпина желтого при мощности дозы 100 Гр/ч зафиксирован статистически значимый стимулирующий эффект в группе 50 Гр по сравнению с контролем. Воздействие γ -излучения в дозе 200 и 400 Гр у *L. luteus* ингибировало длину hypocotyle.

Диапазон доз от 100 до 1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/ч оказал статистически значимое негативное влияние на длину hypocotyle сорта «Надежный». Воздействие γ -излучения в дозе 100 Гр ингибировало длину hypocotyle и стимулировало другие морфометрические параметры: длину корня и биомассу проростков.

Между морфометрическими параметрами *L. luteus* после проведения двух независимых экспериментов зафиксирована статистически значимая положительная корреляция (рис. 1).

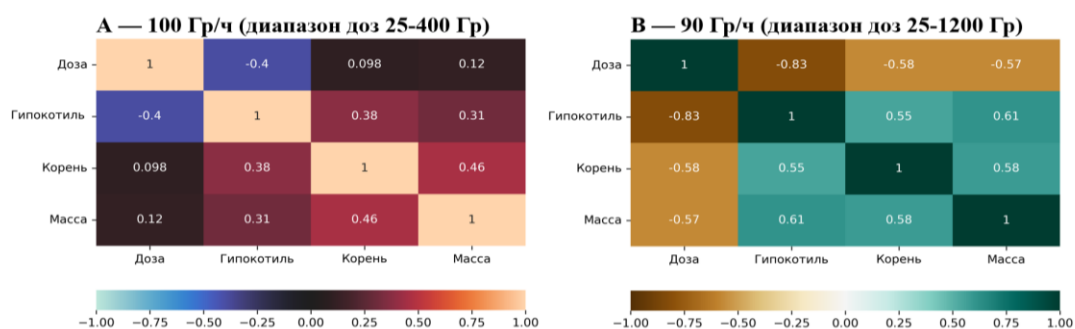


Рисунок 1. Корреляционная матрица исследуемых морфометрических параметров *L. luteus*. Цифрами представлены значения коэффициента корреляции Спирмена при А) $p < 0,05$ и В) $p < 0,0001$

Анализ результатов двух независимых экспериментов выявил значимую положительную корреляцию между длинами hypocotyle и корня, длиной hypocotyle и биомассой проростков, длиной корня и

биомассой у люпина желтого. В первом эксперименте при мощности дозы 100 Гр/ч и диапазоне доз от 25 до 400 Гр отмечена статистически значимая отрицательная корреляция между длиной hypocotyle и

дозой (рис. 1А), которая подтвердилась во втором эксперименте (коэффициент Спирмена – 0,83, $p < 0,0001$). При мощности дозы 90 Гр/ч и диапазоне доз от 25 до 1200 Гр зафиксирована отрицательная корреляция между всеми исследуемыми морфометрическими параметрами и дозой γ -излучения (рис. 1В). Таким образом, исходя из результатов двух независимых экспериментов, длина hypocotila оказалась самым чувствительным параметром к гамма-облучению семян *L. luteus*.

В первом эксперименте γ -излучение статистически значимо увеличило показатель максимального фотохимического квантового выхода (Fv/Fm) при дозах 25 и 200 Гр по сравнению с контрольной группой (рис. 2А).

Доза 400 Гр оказала негативное влияние на показатель эффективности фотохимического квантового выхода фотосистемы II (Y(II)) люпина желтого по сравнению контролем (рис. 3А).

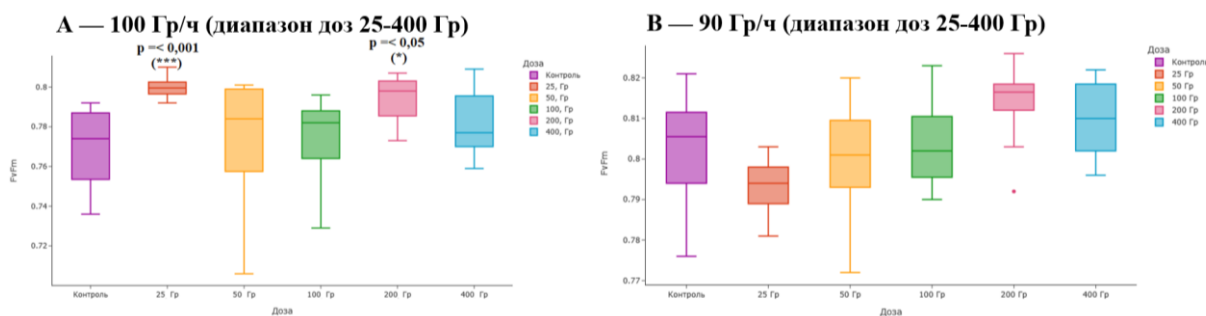


Рисунок 2. Максимальный фотохимический квантовый выход: А) эксперимент 1; В) эксперимент 2

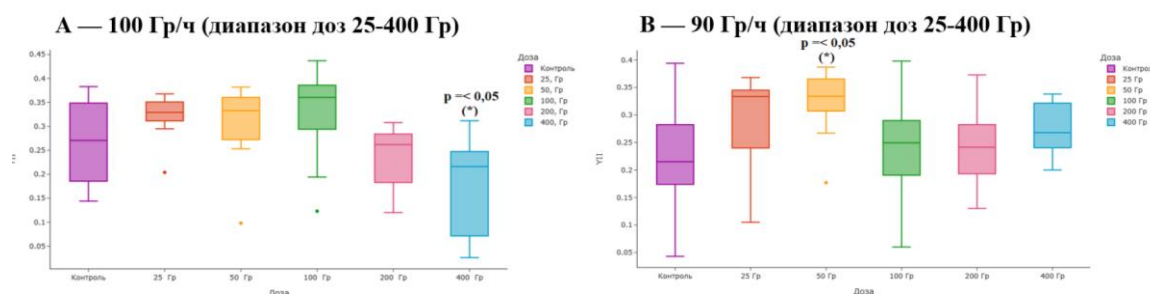


Рисунок 3. Эффективность фотохимического квантового выхода фотосистемы II: А) эксперимент 1; В) эксперимент 2

Во втором эксперименте не было зафиксировано статистически значимых изменений в значениях параметра Fv/Fm (рис. 2В), однако при дозе 50 Гр статистически значимо увеличился показатель Y(II) по сравнению с контрольной группой (рис. 3В), что, возможно, улучшило способность фотосистемы II эффективно расходовать энергию на фотохимические процессы в облученных растениях *L. luteus*.

Таким образом, в дальнейших исследованиях доза 50 Гр будет использоваться в качестве стимулирующей рост и развитие люпина желтого, а дозы 400 Гр и выше расцениваются как ингибирующие. В протоколах радиационного мутагенеза *L. luteus* предлагается применение доз 100 и 200 Гр.

Список литературы

1. Достижения и перспективы селекции люпина / М.И. Лукашевич, П.А. Агеева, Н.В. Новик, М.В. Захарова // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 2. С. 29-32.
2. The resistance of narrow-leaved lupin to *Diaporthetoxica* is based on the rapid activation of defense response genes / M. Ksiazkiewicz, S. Rychel-Bielska, P. Plewinski, M. Nuc // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22. P. 574.
3. Анохина В.С., Дебелый Г.А., Конорев П.М. Люпин: селекция, генетика, эволюция. Минск: БГУ, 2012. 271 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MORPHOMETRIC AND PHOTOSYNTHETIC PARAMETERS OF SEEDLINGS OF LUPINUS LUTEUS AFTER GAMMA IRRADIATION OF SEEDS

Khanova A.S.^{1,a}, Krylova P.S.², Bondarenko E.V.¹

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Russian State Agrarian University – MTA, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434
e-mail: ^a micenyk-anastasi@mail.ru

To study the effect of γ -irradiation on morphometric and photosynthetic parameters of *Lupinus luteus* L. seedlings, the seeds were irradiated in the dose range from 25 to 400 Gy at a dose rate of 100 Gy/h (first independent experiment) and in the dose range 25-1200 Gy at a dose rate of 90 Gy/h (second independent experiment). A dose of 50 Gy at the dose rate of 100 Gy/h had a statistically significant stimulating effect on the morphometric parameters (hypocotyl, root lengths, and seedling weight) of *L. luteus*. Exposure to γ -radiation at doses of 200 and 400 Gy inhibited the length of the hypocotyl. The dose range from 100 to 1200 Gy at a dose rate of 90 Gy/h had an impact on the hypocotyl length of *L. luteus*. Analysis of the effect of γ -radiation on morphometric parameters revealed the most sensitive parameter to gamma radiation, namely, the hypocotyl length. During the first experiment, γ -radiation significantly increased the Fv/Fm parameter at doses of 25 and 200 Gy. A dose of 400 Gy had a negative effect on Y(II) parameter. During the second experiment, the dose of 50 Gy had a statistically significant stimulating effect on Y(II).

Keywords: *L. luteus*, yellow lupin, gamma irradiation, morphometric parameters, photosynthetic parameters

Секция

РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО МУТАГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ

Алексеев Ю.В., Кругляк А.И., Дорошкевич А.С.

Объединенный институт ядерных исследований,
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, Российская Федерация
e-mail: beataa@gmail.com

Радиационно-мутационная селекция сыграла важную роль в выращивании новых сортов сельскохозяйственных культур. Мутагенез на быстрых нейтронах (БН) давно используется для перспективных генетических исследований растений и было доказано, что он является эффективным мутагеном, особенно для получения больших делеций фрагментов ДНК. При этом применение нейтронов в индуцированном мутагенезе ограничено, и полный спектр мутаций, вызванных БН, изучен недостаточно. Приведены примеры результатов применения БН для разных видов растений.

Ключевые слова: быстрые нейтроны, радиационно-индуцированный мутагенез, с/х культуры

Мутагенные эффекты ионизирующего излучения широко используются для создания новых вариантов в экспериментальных популяциях. Согласно данным МАГАТЭ и Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) в с/х в основном используются физические мутагены [1]. К ним относятся все виды ионизирующих излучений (гамма- и рентгеновские лучи, протоны, нейтроны и др.), ультрафиолетовое излучение, а также температурное воздействие. Несмотря на то, что относительная генетическая эффективность быстрых нейтронов (БН) выше в 10 раз чем гамма-излучения, доля исследований по гамма-индуцированному мутагенезу составляет около 85 % от всех исследований физических мутагенов, в то время как нейтронный мутагенез составляет всего 10-11 % [2, 3]. Еще в прошлом столетии было доказано, что нейтроны являются эффективным мутагеном, который вызывает делеционные мутации [4].

Исследования последнего десятилетия показали эффективность использования БН для таких растений, как рис [5-8], пшеница [9], соя [10, 11], горошек [12, 13], арабидопсис [14], арахис [15], люцерна [16], лядвенец [17], помидоры [18].

Облучение быстрыми нейтронами влияет на структуру ДНК, повреждая азотистые основания, способствуя стандартным разрывам, помимо этого репарация повреждений ДНК сильно замедлена по сравнению с гамма- или рентгеновскими лучами [19]. Также по сравнению с гамма-лучами у быстрых нейтронов более высокая частота разрыва двойной цепи. Кроме того, сообщалось о замене, вставках и дупликациях одиночных нуклеотидов, как о влиянии облучения быстрыми нейтронами [7]. В одном из недавних исследований сообщалось о более 91 000 мутаций, полученных после облучения риса БН, которые затронули 58 % генов риса (*Oryza sativa* ssp *japonica*), в среднем по 61 мутации в каждой линии. Эти изменения включали замены одиночных

нуклеотидов, делеции, вставки, инверсии, транслокации и тандемные дупликации [8]. Исследования, проведенные на 264 растениях сои (*Glycine max*) показали более высокие уровни сегментарных дупликаций в своем геноме по сравнению с предыдущими исследованиями [10]. В другом исследовании были проанализированы мутанты арабидопсиса (*Arabidopsis thaliana*), индуцированные БН, у которых наблюдалось образование ковалентных связей между соседними пиримидиновыми основаниями [14].

Другие исследования показали признаки изменения качества зерна. На примере риса (*Oryza sativa*) в некоторых мутантных линиях обнаружено изменение содержания амилозы, при этом облучение не изменило структуру амилопектина [5]. Облучение быстрыми нейтронами вызвало изменения в гене FRO1, ответственном за повышение толерантности и более высокое накопление железа в зерне [6]. Показано, что семена риса со сверхэкспрессией NH1 (ген, обработанный облучением быстрыми нейтронами), дают иммунную реакцию на бактериальную инфекцию *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (Xoo) [20].

Список литературы

1. NUCLEUS information resources. URL: <https://nucleus.iaea.org/> (дата обращения 01.07.2023).
2. Mutagenesis in Rice: The Basis for Breeding a New Super Plant / V.E. Viana [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. DOI:10.3389/fpls.2019.01326.
3. Моссэ И.Б., Морозик П.М. Генетические эффекты ионизирующей радиации. Минск: Беларуская навука, 2018. 299 с.
4. Shu Q.Y., Forster B.P., Nakagawa H. *Plant Mutation Breeding and Biotechnology*. Vienna, Austria: Joint

FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, 2011. P. 595.

5. Mei L. Effect of fast neutron irradiation on amylose content and amylopectin structure of Thailand rice cultivar Jao Hom Nin // *Agric. Sci. Technol.* 2010. Vol. 11. PP. 19-21.

6. Forward screening for seedling tolerance to Fe toxicity reveals a polymorphic mutation in ferric chelate reductase in rice / S. Ruengphayak [et al.] // *Rice.* 2015. Vol. 8. №. 3. doi: 10.1186/s12284-014-0036-z.

7. Genome-wide sequencing of 41 rice (*Oryza sativa* L.) mutated lines reveals diverse mutations induced by fast-neutron irradiation / G. Li [et al.] // *Mol. Plant.* 2016. Vol. 9. PP. 1078-1081. doi: 10.1016/j.molp.2016.03.009.

8. The sequences of 1.504 mutants in the model rice variety kitaake facilitate rapid functional genomic studies / G. Li [et al.] // *Plant Cell.* 2017. Vol. 29. PP. 1218-1231. doi: 10.1105/tpc.17.00154.

9. Magda S. Hanafy, Hanan A. Mohamed. Effect of irradiation of wheat grains with fast neutrons on the grain yield and other characteristics of the plants // *Applied Radiation and Isotopes.* 2014. Vol. 86. PP. 71-78. doi:10.1016/j.apradiso.2013.12.033.

10. Genome Resilience and Prevalence of Segmental Duplications Following Fast Neutron Irradiation of Soybean / Y. Bolon [et al.] // *Genetics.* 2014. Vol. 198. PP. 967-981.

11. Fast neutron mutagenesis in soybean enriches for small indels and creates frameshift mutations / R Wyant Skylar [et al.] // *G3 Genes, Genomes, Genetics.* 2021. Vol. 12. Issue 2. doi: 10.1093/g3journal/jkab431.

12. Mehandjiev A., Kosturkova G., Mihov M. Enrichment of *Pisum sativum* gene resources through combined use of physical and chemical mutagens // *Israel J. Plant Sci.* 2001. Vol. 49. PP. 280-284.

13. Exploiting a fast neutron mutant genetic resource in *Pisum sativum* (pea) for functional genomics / Cl. Domoney [et al.] // *Functional Plant Biology.* 2013. Vol. 40. PP. 1261-1270. doi:10.1071/FP13147.

14. Genome-wide analysis of mutations in mutant lineages selected following fast-neutron irradiation mutagenesis of *Arabidopsis thaliana* / E.J. Belfield, X. Gan, A. Mithani [et al.] // *Genome Res.* 2012. Vol. 22. PP. 1306-1315.

15. Generation of peanut mutants by fast neutron irradiation combined with in vitro culture / J.S. Wang, J.M. Sui, Y.D. Xie [et al.] // *J. Radiat. Res.* 2015. Vol. 56. PP. 437-445.

16. Chen Y., Chen R. Physical Mutagenesis in *Medicago truncatula* Using Fast Neutron Bombardment (FNB) for Symbiosis and Developmental Biology Studies. In *Functional Genomics in Medicago Truncatula.* Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018. PP. 61-69.

17. Nodulation deficiency caused by fast neutron mutagenesis of the model legume *Lotus japonicus* / D. Hoffmann [et al.] // *J. Plant Physiol.* 2007. Vol. 164. PP. 460-469.

18. In silico screening of a saturated mutation library of tomato / N. Menda [et al.] // *Plant J.* 2004. Vol. 38. PP. 861-872.

19. Principles of Plant Genetics and Breeding, 2nd Edition. George Acquaah, Bowie State University, Maryland, USA, 2012. P. 768.

20. Rice *Snl6*, a cinnamoyl-CoA reductase-like gene family member, is required for NH1-mediated immunity to *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* / R.S. Bart [et al.] // *PLoS Genet.* 2010. Vol. 6. № 9. e1001123. doi: 10.1371/journal.pgen.1001123.

USE OF FAST NEUTRONS FOR RADIATION MUTAGENESIS OF PLANTS

Aleksiyenak Y.V., Kruglyak A.I., Doroshkevich A.S.

Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie st. 6, Dubna, Moscow region, Russian Federation, 141980

e-mail: beataa@gmail.com

Radiation-mutation breeding has played an important role in the cultivation of new crop varieties. Fast neutron (FN) mutagenesis has long been used for advanced plant genetic research and has been shown to be an effective mutagen, especially for producing large deletions of DNA fragments. At the same time, the use of neutrons in induced mutagenesis is limited, and the full spectrum of mutations caused by FN has not been sufficiently studied. Examples of the use of FN for different plant species are given.

Keywords: fast neutrons, radiation-induced mutagenesis, crops

НОВЫЕ МЕТОДЫ РОСТРЕГУЛИРОВАНИЯ (ЭТИЛЕН, ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ) В ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ КАРТОФЕЛЯ

Андрианов С.В.^{1,а}, Павлов А.Н.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», 140051, Московская область, г. Люберцы, д.п. Красково, ул. Лорха, д. 23В, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

e-mail: ^а and-585@yandex.ru

Классические методы повышения урожайности картофеля основаны на проращивании семенных клубней и обработке их различными химическими препаратами. Однако это не всегда удобно по организационно-техническим причинам (требуется место и время для проведения контролируемого проращивания) и сопряжено с увеличением химической нагрузки на агроценозы. В этой связи, как показали совместные исследования, проведенные в ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха» и НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, альтернативными экологически безопасными методами рострегулирования картофеля могут являться использование фитогормона этилена и гамма-облучение семенных клубней в малых дозах.

Ключевые слова: картофель, этилен, гамма-облучение, биометрические показатели, урожайность

Из современных экологически безопасных методов рострегулирования семенного картофеля перспективным является применение фитогормона этилена, способствующего, по имеющимся литературным данным [1, 2], увеличению числа ростков в пересчете на клубень за счет подавления апикального доминирования и формирования дополнительных боковых ростков, что в свою очередь увеличивает число стеблей на куст. При этом малоизученной остается сортовая реакция картофеля на применение данного метода [3, 4]. Также интерес представляет изучение гамма-облучения семенных клубней картофеля, обеспечивающее проявление эффекта радиационного гормезиса, выражающегося в увеличении урожайности в последствии [5, 6]. При этом до сих пор открытым остается вопрос оптимальных сроков и доз гамма-облучения, а также сопоставление эффективности вышеприведенных методов рострегулирования между собой при выращивании картофеля в одинаковых условиях [7].

Цель исследований – определить эффективность новых методов рострегулирования семенных клубней (этилен, гамма-облучение) при хранении на рост, развитие и урожайность картофеля в последствии.

Методика исследований

Исследования проводили в 2020-2023 гг. на базе ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха». Облучение картофеля осуществляли в НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (Калужская область, г. Обнинск) на УНУ «Гамма-установка радиационного облучения ГУР-120» (регистрационный номер 2795259), площадь гамма-облучения 2x2 м, интенсивность – 6 Гр в час. Газацию картофеля этиленом

проводили по технологии фирмы «Restrained» (Великобритания) начиная с ноября по конец апреля. Температура хранения семенного картофеля в опытах была 4 °С.

Опыт № 1 (двухфакторный) – изучение влияния обработки семенных клубней картофеля этиленом. Фактор А – сорт картофеля «Гранд» и «Вымпел» (оба среднеспелые); фактор Б – обработка семенных клубней этиленом – контроль (без обработки) и газация в дозе 15 мл/м³ по технологии фирмы «Restrained» (Великобритания) начиная с ноября по конец апреля.

Опыт №2 (трехфакторный) – изучение влияния гамма-облучения семенного картофеля. 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.

Выращивали картофель на дерново-подзолистой супесчаной почве со следующей агрохимическими показателями: рН_{KCl} = 5,2; Нг = 2,3 мг-экв./100г почвы; S = 2,0 мг-экв./100г почвы; V = 47,5 %; сумма N-NO₃ и N-NH₄ – 35,3 мг/кг почвы; P₂O₅ – 310 мг/кг почвы; K₂O – 106 мг/кг почвы; гумус – 1,8 %.

Предшественник – вико-овсяная смесь. Минеральные удобрения (азофоска и калимагнезия) в дозе N₆₀P₆₀K₉₀ вносили под нарезку гребней в середине апреля локально двумя лентами культиватором КРН-4,2 с туковысевающими аппаратами. Посадка в первой декаде мая, уборка в первой декаде сентября.

Определения и учеты проводили по общепринятым ГОСТам (29270-95, 26832-86) и методическим указаниям [8].

Результаты исследований

При оценке биометрических показателей растений картофеля в среднем за 3 года установлен прирост высоты растений в варианте применения этилена на 2,4 и 1,9 см (по сортам «Гранд» и «Вымпел» соответственно) и на 0,4 и 0,2 см в варианте гамма-облучения семенных клубней в дозе 1 Гр в апреле. Также по изученным сортам выявлено увеличение

числа стеблей на куст на 1,3-1,7 при использовании этилена и на 0,2-0,3 при апрельском сроке облучения в дозе 1 Гр. Как следствие, площадь листовой поверхности от применения данных методов рострегуляции возросла соответственно на 16,0-17,9 % и 4,0-6,2 % (табл. 1).

Таблица 1

Биометрические показатели и урожайность картофеля в зависимости от сорта и варианта обработки семенных клубней при хранении (2021-2023 гг.)

Сорт	Срок обработки	Вариант обработки (этилен, мл/м ³ ; гамма-облучение, Гр)	Высота растений, см	Число стеблей, шт./куст	Площадь листовой поверхности, м ² /га	Урожайность, т/га	Товарная (30+ мм) урожайность, т/га
Гранд	-	без обработки	39,6	4,3	22835	21,5	18,3
	ноябрь-апрель	этилен, 15 мл/м ³	42,0	6,0	26914	23,7	21,1
		1 Гр	39,0	4,2	23054	21,0	17,7
			5 Гр	38,0	4,5	22937	20,2
	10 Гр	37,2	4,4	22750	19,5	14,1	
		1 Гр	40,0	4,6	23754	22,9	20,4
			5 Гр	37,0	4,1	22805	21,3
	10 Гр	36,4	3,5	20644	19,6	15,0	
	Вымпел	-	без обработки	37,3	3,4	22168	20,6
ноябрь-апрель		этилен, 15 мл/м ³	39,2	4,7	25718	22,7	20,0
		1 Гр	37,0	3,3	22050	20,5	17,0
			5 Гр	36,8	3,2	22853	19,9
10 Гр		36,1	3,2	22214	18,5	13,8	
		1 Гр	37,5	3,6	23552	21,5	19,0
			5 Гр	34,1	3,3	21264	20,0
10 Гр		33,9	3,2	20895	18,2	14,1	

В целом, газация семенных клубней при хранении этиленом обеспечила прирост общей урожайности по сортам «Гранд» и «Вымпел» соответственно на 2,2 и 2,1 т/га (или на 10,2 %). Прирост товарной урожайности (фракция клубней более 30 мм) оказался еще более значительным – на 2,8 и 2,5 т/га (или на 15,3 и 14,3 %) по изученным сортам соответственно.

Метод рострегуляции, основанный на гамма-облучении семенных клубней в дозе 1 Гр в апреле, также обеспечивал существенный прирост урожайности: общей – на 1,4 и 0,9 т/га (или на 6,5 и 4,4 %); товарной – на 2,1 и 1,5 т/га (или на 11,5 и 8,6 %) по сортам «Гранд» и «Вымпел» соответственно.

Использование более высоких доз при апрельском сроке облучения семенных клубней (5 и 10 Гр), а также всех изученных доз (1, 5 и 10 Гр) при

сентябрьском сроке облучения отрицательно сказывалось на урожайности картофеля, особенно товарной (снижение на 21,0-23,0%).

Выводы

Установлено, что такие новые методы рострегуляции при хранении семенного картофеля, как газация фитогормоном этиленом, а также гамма-облучение в апреле в дозе 1 Гр, оказывают стимулирующий эффект на рост и развитие растений. Обеспечивают в зависимости от сорта увеличение товарной урожайности соответственно на 2,5-2,8 т/га и на 1,5-2,1 т/га.

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. Перспективы использования радиационных технологий в агропромышленном комплексе Российской Федерации / Р.М. Алексахин [и др.] // Вестник РАЕН. 2014. № 1. С. 78-85.

3. 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.

4. Мальцев С.В., Пшеченков К.А. Обработка клубней ингибитором прорастания снижает потери при хранении // Картофель и овощи. 2009. № 1. С. 9.

5. Иваницкий Ю.А. Радиационный гормезис. Благоприятны ли малые дозы ионизирующей радиации? // Вестник ДВО РАН. 2006. С. 86-91.

6. Jargis S.V. Hormesis and radiation safety norms // Human & experimental toxicology. 2012. № 31. PP. 671-675.

7. Эффективность гамма-облучения при хранении продовольственного и предназначенного для переработки картофеля / С.В. Мальцев, С.В. Андрианов, Е.В. Князева, Н.А. Тимошина // Картофель и овощи. 2022. № 6. С. 34-37.

8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

NEW METHODS OF GROW-REGULATION (ETHYLENE, GAMMA-IRRADIATION) IN POTATO STORAGE TECHNOLOGY

Andrianov S.V.^{1,a}, Pavlov A.N.²

¹ Russian Potato Research Centre, Lorkh st. 23V, Lyubertsy, d.p. Kraskovo, Moscow Region, Russian Federation, 140051

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe шоссе 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^a and-585@yandex.ru

Classical methods of increasing potato yield are based on preliminary germination of seed tubers and their treatment with various chemicals. However, this is not always convenient for organizational and technical reasons (a place and time are required for controlled germination) and associated with an increase in chemical load on agrocenoses. In this regard, as shown by joint research conducted at the Russian Potato Research Centre and Russian Institute of Radiology and Agroecology, alternative environmental friendly methods of potato growth regulation can be the use of ethylene phytohormone and gamma irradiation of seed tubers in small doses.

Keywords: potatoes, ethylene, gamma irradiation, biometric indicators, yield

The conducted studies revealed that such new methods of grow regulation of seed potatoes as gassing with phytohormone ethylene and gamma irradiation in April at a dose of 1 Gy, have a stimulating effect

on the growth and development of plants. Depending on the variety, they provide an increase in commercial yield by 2.5-2.8 t/ha and 1.5-2.1 t/ha, respectively.

УДК 614.876; УДК 539.1.047; УДК 53.072, УДК 51-76; УДК 57.084.1

УЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ СТАБИЛЬНОГО ЙОДА В РАЦИОНЕ КОРОВ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТАБОЛИЗМА РАДИОАКТИВНОГО ЙОДА

Басова М.А.^a, Снегирёв А.С., Козьмин Г.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

e-mail: ^a maribasova97@mail.ru

Прогноз поступления радиоактивных изотопов йода в пищевые цепочки человека и животных является важным аспектом обеспечения радиационной безопасности. При этом, как правило, применяются математические модели метаболизма радионуклидов и дозиметрические модели органов-мишеней различной степени сложности. Для оценки поступления радиойода в организм крупного рогатого скота разработана камерная модель метаболизма йода, учитывающая содержание стабильного йода в рационе животных. Основной задачей разработанной модели является оценка эффективности применения препаратов на основе стабильного йода в качестве противорадиационной меры в животноводстве для снижения накопления радионуклидов в щитовидной железе и молоке коров.

Ключевые слова: радиоактивный йод, радиационная безопасность, камерная модель, дозиметрическая модель, крупный рогатый скот, щитовидная железа, метаболизм йода, стабильный йод в рационе

Загрязнение внешней среды в результате аварий реакторного происхождения радиоактивными изотопами йода оказывает негативное влияние на здоровье крупного рогатого скота (КРС) и приводит к появлению радионуклидов в молоке и молочных продуктах. В связи с потенциальными рисками для здоровья человека, связанными с потреблением загрязненных продуктов животноводства, необходимо уметь оценивать эффективность использования в качестве противорадиационной меры препаратов стабильного йода, которые помогают снизить накопление изотопов в щитовидной железе (ЩЖ) и молоке дойных коров.

Структура камерной модели определялась на основе результатов исследований закономерностей

метаболизма и обоснования транспортных коммуникаций нуклидов между органами и тканями [1, 2]. Оценка биокинетических параметров метаболизма радиоактивных изотопов йода проводилась с использованием математического компартментального анализа [3], опубликованных экспериментальных данных и статистических критериев адекватности математического моделирования. Используемая камерная модель метаболизма и ее кинетические параметры представлены на рис.1 и в табл. 1. Модель учитывает различные факторы, включая метаболические процессы, связанные с поступлением стабильных изотопов йода в организм животных, что позволяет более точно прогнозировать содержание радиойода в молоке дойных коров.

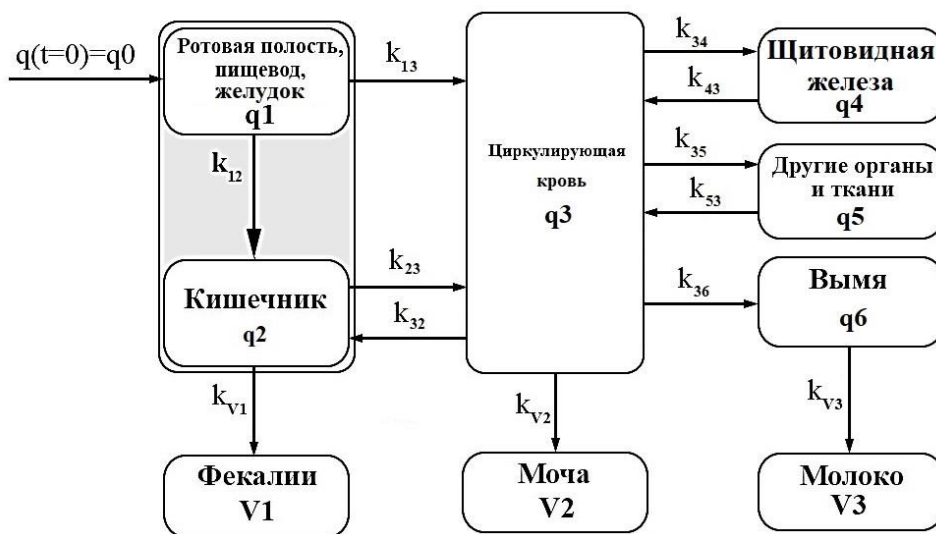


Рисунок 1. Камерная модель метаболизма радионуклидов йода в организме дойных коров

Таблица 1

Биокинетические параметры (БП) камерной модели метаболизма радионуклидов в организме дойных коров

БП, сут ⁻¹	Значение	БП, сут ⁻¹	Значение	БП, сут ⁻¹	Значение
k_{12}	1	k_{34}	0,9	k_{36}	0,5
k_{13}	0,5	k_{43}	0,4	k_{V1}	3
k_{23}	4	k_{35}	1	k_{V2}	1,5
k_{32}	0,1	k_{53}	0,1	k_{V3}	2

Известно, что йодные добавки в рацион животных снижают накопление радиойода в ЩЖ и молоке. На примере районов Беларуси, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС, установлено [4], что в условиях дефицита йода накопление радиойода в ЩЖ КРС от 2 раз и более выше по сравнению с животными, которые получали корма с рекомендуемым содержанием стабильного йода. Поэтому включение йодных добавок в рацион животных в начальный период йодной опасности представляет собой важное противорадиационное мероприятие. Профилактическое применение KI с целью увеличения содержания стабильного йода в рационе КРС, особенно в районе с йодной эндемией, позволило бы снизить накопление ^{131}I в ЩЖ до 20 раз [5].

Была решена обратная задача по оценке параметров перехода радиойода из циркулирующей крови в ЩЖ (k_{34}) и из крови в вымя (k_{36}). Путем перебора значений k_{34} по заданной сетке величин были найдены такие значения, при которых в йододефицитных районах (содержание стабильного йода в рационе – $D \leq 20$ мг/сут) накопление ^{131}I в ЩЖ превышало от 2 раз и более накопление радиойода в районах нормального содержания стабильного йода. Аналогично были найдены значения, при которых применение добавок стабильного йода позволяло добиться снижения содержания радиойода в ЩЖ более чем в 10 раз и снижение активности ^{131}I в молоке не менее чем в 1,3-2,0 раза. Принимали, что для накопления радиойода в молоке k_{36} линейно снижается от $0,5 \text{ сут}^{-1}$ при $D = 800$ мг/сут до $0,2 \text{ сут}^{-1}$ при $D = 2000$ мг/сут. Для ЩЖ на основе анализа полученных результатов было принято:

$$k_{34} = \begin{cases} k_H \cdot \frac{D_H}{D}, & D \leq 20 \text{ мг/сут} \\ k_H, & 20 < D < 500 \text{ мг/сут} \\ k_H \cdot \frac{\chi \cdot D_H}{D}, & D \geq 500 \text{ мг/сут} \end{cases}$$

где D – содержание стабильного йода в рационе животных, мг/сут; $D_H = 20$ мг/сут – норма стабильного йода в рационе животных, мг/сут; k_H – константа скорости перехода радиойода из крови в ЩЖ при D_H от 20 до 500 мг/сут; и ($\chi=10$) – параметр, предположительно зависящий от синтеза и активности натрий-йодного симпортера (NIS).

NIS – это интермембранный белок, который расположен на базолатеральной мембране клеток ЩЖ и эпителиальных клеток. Симпортер выполняет функцию транспортировки йода, используя электрохимический градиент концентрации Na^+ , работающий за счет Na^+/K^+ -АТФ-азы. Активность NIS зависит от уровня тиреотропного гормона (ТТГ). В условиях избыточного поступления йода в организм происходит снижение синтеза тиреоидных гормонов в течение примерно 48 часов. Избыток йода блокирует его организацию и образование гормонов, таким образом на некоторое время снижая накопление йода в ЩЖ. Этот процесс называется эффектом Вольфа-Чайкова. Когда уровень йода в ЩЖ становится ниже значений, поддерживающих эффект Вольфа-Чайкова, процесс организации восстанавливается и нормализуется функция ЩЖ [6].

На рисунках 2 и 3 представлена динамика содержания радиойода в ЩЖ и суточном удое молока, полученная с использованием формулы в зависимости от дефицита (8 мг/сут) и добавки (2000 мг/сут) стабильного йода в рационе животных.

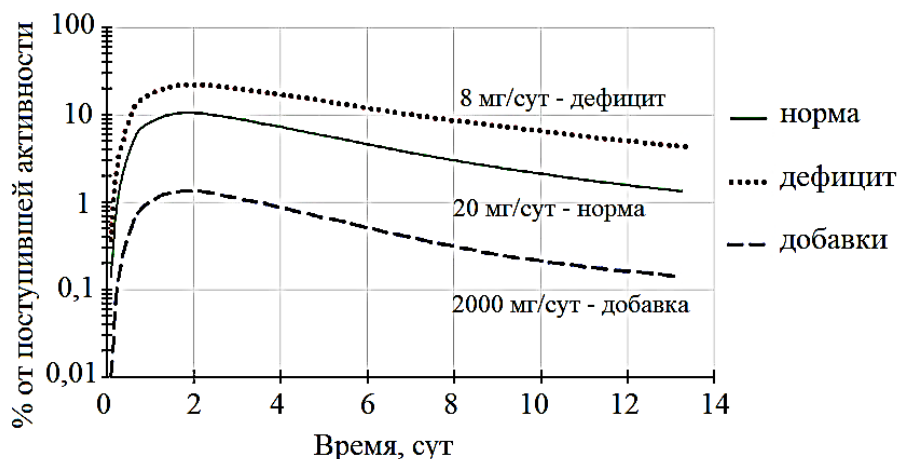


Рисунок 2. Динамика содержания ^{131}I в ЩЖ коров после однократного поступления радионуклида в условиях разного содержания стабильного йода в рационе

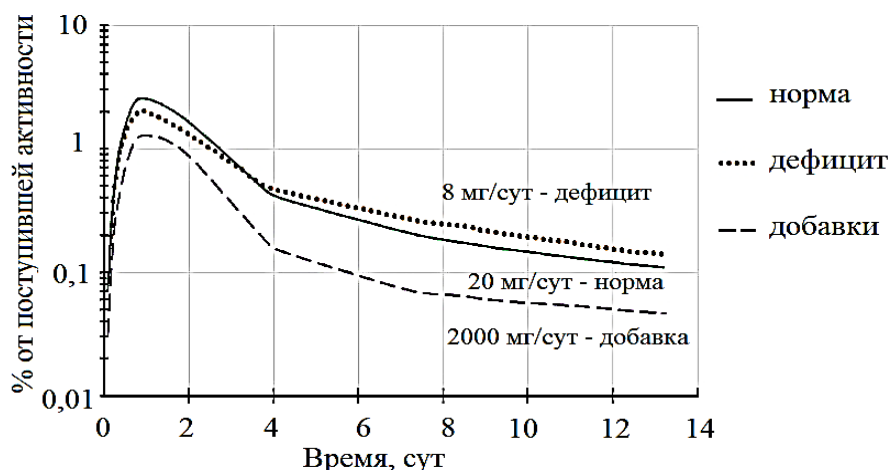


Рисунок 3. Динамика суточного выведения ^{131}I в молоке коров после однократного поступления радионуклида в условиях разного содержания стабильного йода в рационе

Исходя из представленного на рисунках 3 и 4 видно, что разработанная камерная модель и предложенный методический подход позволяют оценить эффективность использования препаратов стабильного йода для снижения накопления радиоактивных изотопов в ЩЖ и молоке дойных коров. Результаты моделирования могут быть использованы для разработки стратегий по снижению радиационного загрязнения продуктов питания и защите здоровья населения. К примеру, на основе полученных результатов можно определить оптимальное содержание стабильного йода в рационе КРС, чтобы минимизировать накопление радиойода в молоке. Таким образом, модель метаболизма радиоактивного йода в организме КРС, учитывающая содержание стабильного йода в рационе, является полезным инструментом для оценки и прогнозирования перехода радионуклидов в пищевую цепочку и разработки мер по снижению рисков для здоровья человека.

Список литературы

1. Сравнительное поведение ^{131}I у коров при различных источниках поступления его в организм / А.Н.

Сироткин, И.Я. Панченко, Л.Н. Тюменев [и др.] // Биологическое действие внешних и внутренних источников радиации. М: Медицина? 1972. С. 72-77.

2. Miller J.K., Swanson E.W., Spalding G.E. Iodine Absorption, Excretion, Recycling, and Tissue Distribution in the Dairy Cow // Journal of Dairy Science. 1974. Vol. 58. № 10. PP. 1578-1593.

3. ICRP Publication 137. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. / F. Paquet, M.R. Bailey, R.W. Leggett [et al.] // Annals of the ICRP. 2017. Vol. 46(3/4). 486 p.

4. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных / Под ред. В.А. Бударкова, А.С. Зенкина. М.: БИБКМ, 2017. 440 с.

5. Влияние продуктов аварийного выброса Чернобыльской АЭС на щитовидную железу животных / В.А. Бударков, А.С. Зенкин, Н.П. Архипов [и др.] // Ветеринария. 1990. № 7. С. 60-63.

6. Шеремета М.С., Трухин А.А., Корчагина М.О. Применение радиоактивных веществ в медицине — история и перспективы развития // Проблемы эндокринологии. 2021. Т. 67(6). С. 59-67.

ACCOUNT THE CONTENTS OF STABLE IODINE IN THE DIET OF COWS IN THE PROBLEMS OF RADIOACTIVE IODINE METABOLISM MODELING

Basova M.A.^a, Snegirev A. S., Kozmin G.V.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^amaribasova97@mail.ru

The forecast of the entry radioactive isotopes of iodine into the food chains of humans and animals is an important aspect of ensuring radiation safety. In this case, as a rule, mathematical models of radionuclide metabolism and dosimetric models of target-organs of varying degrees of complexity are used. To assess the intake of radioiodine in the body of cattle, a

compartment model of iodine metabolism was developed, taking into account the content of stable iodine in the diet of animals. The main objective of the developed model is to evaluate the effectiveness of the stable iodine agency uses as an antiradiation measure in animal husbandry to reduce the accumulation of radionuclides in the thyroid gland and milk of cows.

Keywords: *radioactive iodine, radiation safety, compartment model, dosimetric model, cattle, thyroid gland, iodine metabolism, stable iodine in the diet*

УДК 619:615.849,579.861.2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОТИВОРАДИАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОИНАКТИВИРОВАННОЙ КУЛЬТУРЫ *STAPHYLOCOCCUS AUREUS*

Гайнутдинов Т.Р.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности», 420075, г. Казань, ул. Научный городок-2, Республика Татарстан, Российская Федерация
e-mail: gtr_timur@mail.ru

Подвергнутая облучению в дозах от 20 до 70 кГр культура *Staphylococcus aureus* штамма 209 была испытана в качестве потенциального противорадиационного средства в опытах на белых мышах и белых крысах. В результате проведенных исследований было установлено, что наибольшей противорадиационной активностью обладало потенциальное средство на основе культуры *St. aureus* штамм 209, облученной в дозе 30 кГр, которое обеспечивало 66,7 и 83,3 %-ную выживаемость летально облученных белых мышей и белых крыс (ЛД_{83,3-100}), соответственно, что дает основание для его дальнейшего использования в качестве средства терапии при острой лучевой болезни.

Ключевые слова: *радиационные технологии, гамма-инактивация, Staphylococcus aureus, острая лучевая болезнь, терапия*

Ионизирующие излучения широко применяются в медицине, биологии, сельском хозяйстве, пищевой, химической, легкой промышленности, в строительной индустрии, металлургии, геологии и в других сферах народного хозяйства [3, 4, 6].

Нарушение эксплуатации ядерных установок на предприятиях ядерно-энергетического цикла может привести к аварийным ситуациям с выбросом продуктов ядерного деления в окружающую среду, которые могут оказать пагубное воздействие на экосистемы, людей и животных, вызывая лучевые поражения и их комбинации [5, 8, 9].

Исходя из изложенного, разработка средств терапии лучевой болезни является актуальной задачей радиобиологии и имеет научное и практическое значение.

Поставленные задачи выполняли в соответствии с требованиями микробиологической безопасности с использованием культуры золотистого стафилококка (*St. aureus*) штамма 209, солевого мясопептонного агара (МПА, содержащий 10 % NaCl), мясопептонного бульона (МПБ), среды Китта-Тароцци с добавлением нормальной сыворотки крупного рогатого скота.

Перед использованием пробирки с соевым агаром и средой Китта-Тароцци стерилизовали методом кипячения в водяной бане в течение 30 минут, сыворотку инактивировали в водяной бане при температуре 50 °С в течение 40 минут, после чего МПА скашивали, сыворотку вносили в вышеуказанную среду.

Культуру *St. aureus* штамм 209 наносили на скошенный солевой агар и термостатировали в течение 24 часов при температуре 37 °С. Из выросшей культуры готовили мазки, окрашивали их по Граму.

Выращенную в солевом МПА культуру *St. aureus* рассевали в заранее приготовленные колбы со средой Китта-Тароцци, содержащей нормальную сыворотку крупного рогатого скота.

Алгоритм получения микробного препарата был следующим. Суточную культуру золотистого стафилококка в жидкой питательной среде Китта-Тароцци с добавлением 1,0 см³ нормальной сыворотки крупного рогатого скота выращивали в термостате при температуре 37 °С в соответствии с методическими и технологическими требованиями в течение трех суток. Выращенную культуру разливали в стерильные флаконы и осаждали центрифугированием при 3000 об/мин в течение 40 минут. Затем надосадочную жидкость сливали, микробный осадок доводили до 10 ед. (1×10⁹ м.к./мл) стерильной дистиллированной водой по стандарту мутности Л.А. Тарасевича. Полученную взвесь фасовали во флаконы по 10 мл, которые закрывали резиновыми пробками и обкатывали алюминиевыми колпачками. После этого флаконы облучали на гамма-установке «Исследователь» с источником ⁶⁰Со в дозах 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 65; 70 кГр с мощностью экспозиционной дозы 2,652×10⁻² А/кг. Степень инактивации гамма-облученных взвесей *St. aureus* определяли путем высева

их на среду Китта-Тароцци с содержанием нормальной сыворотки крупного рогатого скота и на скошенный солевой МПА с последующей выдержкой в термостате в течение 7 суток и регистрацией наличия или отсутствия роста микроорганизма через каждые 24 часа. Результаты микробиологических исследований по определению интенсивности роста микроорганизмов показали, что инактивирующая доза гамма-облучения культуры *St. aureus* составляет 70 кГр [1].

В следующей серии опытов радиоинактивированные варианты культур *St. aureus* тестировали на лабораторных животных на противорадиационную эффективность. В качестве контрольного препарата использовали противорадиационное средство по примеру работы [2, 7].

Опыты проводили на белых мышах и белых крысах обоего пола живой массой 18-20 г и 180-200 г, соответственно.

Внешнее гамма-облучение животных осуществляли на гамма-установке «Пума» в дозе для белых мышей – 7,9 Гр, белых крыс – 8,0 Гр с мощностью экспозиционной дозы $2,31 \times 10^{-5}$ А/кг.

Полученные радиозащитные средства на основе облученной культуры *St. aureus* вводили однократно

подкожно через трое суток после радиационного воздействия.

На первом этапе работы опыты проводили на 84 белых мышах, разделенных по принципу аналогов на 14 групп по 6 голов в каждой.

Облученным в дозе 7,9 Гр животным 1 группы подкожно в дозе 2×10^8 микробных клеток на голову (м.к./голову) вводили облученную в дозе 20 кГр культуру золотистого стафилококка штамма (шт.) 209. В аналогичных условиях животным 2 группы вводили облученную культуру *St. aureus* шт. 209 в дозе 25 кГр; 3 – 30 кГр; 4 – 35 кГр; 5 – 40 кГр; 6 – 45 кГр; 7 – 50 кГр; 8 – 55 кГр; 9 – 60 кГр; 10 – 65 кГр; 11 – 70 кГр; 12 – противорадиационное средство сравнение подкожно в дозе 5,0 мг (0,1 см³); 13 – контроль облучения; 14 – биологический контроль.

За опытными и контрольными животными вели ежедневное наблюдение, учитывая клинический статус, выживаемость рассчитывали среднюю продолжительность жизни павших животных.

Результаты экспериментов по изучению противорадиационной эффективности полученных средств на основе культуры *St. aureus* на белых мышах представлены в таблице 1.

Таблица 1

Противорадиационная эффективность облученных культур *St. aureus* штамм 209 на белых мышах, n = 6

Номер группы	Гамма-облученный вариант	Способ применения	СПЖ, сут	Выживаемость, %
1	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 20 кГр	1-кратно п/к	8,0	16,67
2	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 25 кГр	1-кратно п/к	11,3	50,00
3	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 30 кГр	1-кратно п/к	17,0	66,67
4	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 35 кГр	1-кратно п/к	10,5	33,33
5	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 40 кГр	1-кратно п/к	13,5	66,66
6	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 45 кГр	1-кратно п/к	8,2	33,33
7	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 50 кГр	1-кратно п/к	11,3	16,66
8	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 55 кГр	1-кратно п/к	8,0	16,66
9	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 60 кГр	1-кратно п/к	12,5	33,33
10	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 65 кГр	1-кратно п/к	9,4	0
11	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 70 кГр	1-кратно п/к	8,2	16,66
12	Противорадиационное средство	1-кратно п/к	16,0	50,00
13	Контроль облучения	–	9,8	0
14	Биологический контроль	–	–	100

Примечания:

1 СПЖ – средняя продолжительность жизни

2 1-кратно п/к – однократное подкожное введение

3 обл. – гамма-облучение

4 шт. – штамм

Из представленных в таблице 1 данных следует, что из 12 вариантов потенциальных терапевтических средств противорадиационную эффективность оказывали 4 лечебных средства – биопрепараты 2 и 12 групп (выживаемость 50 %), 3 и 5 групп (66,67 %).

На протяжении всего опыта (30 суток) в группе биологического контроля (14 группа) клинических изменений не было зафиксировано. Животные охотно поедали корм, были активны.

У животных, подвергнутых летальному радиационному воздействию без применения лечебных средств (13 группа), острая лучевая болезнь протекала с ярко выраженными клиническими признаками в крайне тяжелой степени с угнетением общего состояния, снижением двигательной активности, существенным снижением потребления корма и воды, затрудненным дыханием, взъерошенностью шерсти, адинамией. Указанные признаки в дальнейшем прогрессировали с абсолютной летальностью животных на фоне судорог, рвоты, диареи со средней продолжительностью жизни 9,8 суток.

Установлено, что применение испытуемых терапевтических средств оказывало модифицирующее воздействие на течение, степень тяжести и исход лучевой болезни. Однако применение лечебных средств, полученных путем облучения *St. aureus* шт. 209 в дозах 20; 35; 45; 50; 55; 60; 65 и 70 кГр (1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 групп), оказывало низкий противорадиационный эффект, но увеличивало среднюю продолжительность жизни до 1,4 раза по сравнению с группой контроля облучения. Использование *St. aureus* шт. 209 гамма-инактивированного в дозах 30 и 40 кГр (3, 5 группы), а также противорадиационное средство (12 группа), значительно облегчало течение острой лучевой болезни, степень ее проявления и повышало выживаемость животных. Показано, что применение указанных средств переводило крайне тяжелое течение острой лучевой болезни в тяжелое, увеличивая выживаемость до 66,6 и 50 %, а продолжительность жизни павших животных от 13,5 до 17,0 сут, что превышает контрольный уровень до 1,7 раза.

Для подтверждения данных, полученных на белых мышах, на втором этапе проводили аналогичные опыты на белых крысах. Было использовано 30 белых крыс, разделенных по принципу аналогов на 5 групп по 6 животных в каждой группе. При этом животных первых 4 групп подвергали γ -облучению в летальной дозе (8,0 Гр), животных 5 группы не облучали и не лечили они служили биологическим контролем.

Лечение облученных белых крыс с использованием испытуемых средств проводили по следующей схеме. Облученным в дозе 8,0 Гр животным 1 группы через 3 сут однократно подкожно вводили в дозе 2×10^9 м.к./голову в объеме 2,0 см³ *St. aureus* штамм 209, облученный в дозе 30 кГр; 2 группе в аналогичных условиях – *St. aureus* штамм 209, облученный в дозе 40 кГр; 3 группе в аналогичных условиях – противорадиационное средство сравнение подкожно в дозе 10 мг/голову в объеме 0,1 см³; 4 группа – служила контролем облучения; 5 группа – биологическим контролем.

Наблюдение за опытными и контрольными животными вели ежедневно в течение 30 дней, изучали общее состояние, среднюю продолжительность жизни, выживаемость животных.

Результаты второго этапа исследований по оценке терапевтической эффективности разработанных средств на белых крысах представлены в таблице 2.

Таблица 2

Противорадиационная эффективность изучаемых лечебных средств на основе облученных культур *St. aureus* штамм 209 на белых крысах, n = 6

Номер группы	Гамма-облученный вариант	Способ применения	СПЖ,сут	Выживаемость, %
1	<i>St. aureus</i> шт.209, обл. в дозе 30 кГр	1-кратно п/к	18,0	83,3
2	<i>St. aureus</i> шт. 209, обл. в дозе 40 кГр	1-кратно п/к	16,5	66,7
3	Противорадиационное средство	1-кратно п/к	11,5	66,7
4	Контроль облучения	–	6,4	16,7
5	Биологический контроль	–	–	100

Примечания:

1 СПЖ – средняя продолжительность жизни

2 1-кратно п/к – однократное подкожное введение

3 обл. – гамма-облучение

4 шт. – штамм

Из представленных в таблице 2 данных следует, что острая лучевая болезнь у крыс 4 группы, к которым лечебный препарат не применяли, протекала тяжело в костномозговой форме, проявлялась беспокойством, агрессивностью в первые сутки осмотра. На вторые сутки возбуждение сменялось угнетением. Животные лежали по углам клетки, не реагировали на внешние раздражители, слабо поедали корм, отмечалось разжижение кала, переходящее в диарею

на 3 и 4 сутки. Кожный покров был взъерошен. Вокруг глаз и носовых отверстий появлялись геморрагические корочки подсыхания. Гибель животных регистрировалась на 2, 4, 6, 9, 11 сутки исследований со СПЖ 6,4 суток, выживаемость животных в данной группе составила 16,7 %.

Применение потенциального лечебного средства из культуры *St. aureus* штамм 209, облученного в дозе 40 кГр, и контрольного препарата (1, 3 группы)

оказывало облегчающее действие на течение острой лучевой болезни, значительно повышая выживаемость животных (до 66,7 %), при СПЖ до 11,5-16,5 суток, превышая в 2,6 раза уровень группы контроля облучения.

Максимальным терапевтическим свойством при лечении острой лучевой болезни обладало средство на основе культуры *St. aureus* штамм 209, облученной гамма-лучами в дозе 30 кГр, увеличивая выживаемость летально облученных белых крыс (ЛД_{83,3}) до 83,3 %, а также повышая продолжительность жизни в 2,8 раза по сравнению с группой контроля облучения.

В результате исследований, проведенных на белых мышах и белых крысах, установлено, что потенциальное лечебное средство на основе культуры *St. aureus* штамм 209, облученной гамма-лучами в дозе 30 кГр, обладает противорадиационной активностью, обеспечивая 66,7 и 83,3 %-ную выживаемость летально облученных животных в ЛД_{83,3-100}, что дает основание для его дальнейшего использования в качестве средства терапии при острой 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. Использование препаратов природного и микробного происхождения в качестве радиозащитных средств / Р.Н. Низамов [и др.] // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2020. Т. 243. Вып. 3. С. 182-185.

3. Методические рекомендации по использованию ионизирующего излучения для инактивации возбудителей инфекционных болезней сельскохозяйственных животных / В.П. Шашкаров [и др.]. Казань: Изд-во ООО Издательский дом «МеДДок», 2001. 17 с.

4. Определение безопасности облученной продукции по содержанию хинонов / Я.М. Курбангалеев [и др.] // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2021. Том 246 (II). С. 122-127.

5. Определение радиозащитной эффективности инактивированных гамма-облучением штаммов микроорганизмов / Т.Р. Гайнутдинов [и др.] // Ветеринарный врач. 2022. № 2. С. 13-20.

6. Оценка биологической безопасности облученных кормов и пищевых продуктов / Я.М. Курбангалеев [и др.] // Ветеринарный врач. 2022. № 2. С. 21-28.

7. Получение и оценка безвредности препарата на основе *Escherichia coli* / Т.Р. Гайнутдинов [и др.] // Ветеринарный врач. 2023. № 4. С. 38-43.

8. Усовершенствование технологии получения радиозащитных препаратов на основе *B. bifidum*, *E. coli* в сочетании с биополимером и оценка их эффективности на сельскохозяйственных животных / Г.В. Коныхов [и др.] // Ветеринарный врач. 2017. № 6. С. 31-35.

9. Development of an Optimal Model of Combined Radiation and Biological Lesions / T.R. Gaynutdinov [et al.] // Veterinary Medicine International. 2022. Vol. 2022. Article ID 9433032. 7 P. <https://doi.org/10.1155/2022/9433032>.

STUDY OF THE ANTI-RADIATION EFFECTIVENESS OF RADIOINACTIVATED STAPHYLOCOCCUS AUREUS CULTURE

Gaynutdinov T.R.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety»,
Nauchny Gorodok-2 st., Kazan, Russian Federation, 42007
e-mail: gtr_timur@mail.ru

The culture of *Staphylococcus aureus* (strain 209) exposed to radiation at doses from 20 to 70 kGy was tested as a potential anti-radiation agent in experiments on white mice and white rats. As a result of the conducted studies it was found that the most anti-radiation activity was possessed by a therapeutic drug based on the culture of *St. aureus* (strain , irradiated at a dose of 30 kGy, which provided 66.7 and 83.3 % survival of lethally irradiated white mice and white rats (LD_{83,3-100}), respectively, which gives reasons for its further use as a means of therapy for acute radiation sickness.

Keywords: radiation technologies, gamma inactivation, *Staphylococcus aureus*, acute radiation sickness, therapy

Studies of the anti-radiation effectiveness of the radioinactivated culture of *Staphylococcus aureus* on white mice was shown that the developed agents have

anti-radiation activity. To confirm the data obtained on white mice, at the second stage similar experiments were carried out on white rats. 30 white rats, divided

according to the principle of analogues into 5 groups of 6 animals in each group were used. At the same time, the animals of the 1-4 groups were exposed to gamma radiation at a lethal dose (8.0 Gy), the animals of the 5th group were not irradiated and were not treated - they served as a biological control. The treatment of irradiated white rats using the tested drugs was carried out according to the following scheme. Animals from the 1st group irradiated at a dose of 8.0 Gy after 3 days were once injected subcutaneously at a dose of 2×10^9 m.c./head in a volume of 2.0 cm³ *St. aureus* strain 209, irradiated at a dose of 30 kGy; the 2nd group in similar conditions - *St. aureus* strain 209, irradiated at a dose of 40 kGy; the 3rd group in similar conditions - subcutaneously anti-radiation agent at a dose of 10 mg/head in a volume of 0.1 cm³; the 4th group served as a radiation control; the 5th - a biological control. Experimental and control animals were monitored daily for 30 days, the general condition, average lifetime, and survival of animals were studied.

The results of the second stage of studies to assess the therapeutic effectiveness of the developed drugs on white rats showed that acute radiation sickness in rats from the 4th group, to whom the therapeutic drug was not used, was severe in bone marrow form,

manifested anxiety, aggressiveness in the first day of the experiment. On the second day, excitement was replaced by depression. The animals lay in the corners of the cage, did not react to external stimuli, ate food weakly, there was a dilution of feces, turning into diarrhea to 3-4 days. The fur was tousled. Hemorrhagic crusts appeared around the eyes and nasal openings. The death of animals was recorded on the 2nd, 4th, 6th, 9th, 11th day of studies with an average lifetime of 6.4 days, the survival rate of animals in this group was 16.7 %. Application of the developed therapeutic agent from the culture of *St. aureus* (strain 209), irradiated at a dose of 40 kGy, and of anti-radiation agent (1-3 groups), had a relieving effect on the course of acute radiation sickness, significantly increasing the survival rate of animals (up to 66.7 %), with average lifetime up to 11.5-16.5 days, exceeding of the control group by 2.6 times. The maximum therapeutic property in the treatment of acute radiation sickness was possessed by the developed agent based on the culture of *St. aureus* (strain 209), irradiated with gamma rays at a dose of 30 kGy, increasing the survival rate of lethally irradiated white rats ($LD_{83.3}$) to 83.3 %, as well as increasing lifetime by 2.8 times compared to the irradiation control group.

УДК 631.17; 539.122.04

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН САЛАТА (*LACTUCA SATIV L.*) НА СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА, ФОСФОРА И КАЛИЯ

Гусева Ю.Е.^а, Смирнова П.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация
e-mail: ^а uguseva@rgau-msha.ru

Изучено влияние гамма-облучения семян листового салата сорта «Московский парниковый» на содержание в растениях сухого вещества, азота, фосфора и калия. Определено, что при поглощенной дозе 1 Гр увеличивается содержание фосфора в сельскохозяйственной культуре. Облучение посевного материала ионизирующим излучением в дозах 2 и 4 Гр повышает выход сухого вещества, содержание азота и калия.

Ключевые слова: *γ-облучение, листовый салат, радиационный гормезис, азот, фосфор, калий*

Технологии, позволяющие увеличить производство растениеводческой продукции, улучшить ее качество, сократить потери при уборке, переработке, хранении, необходимо активно применять для сохранения продовольственной безопасности нашей страны. В настоящее время наиболее перспективными являются радиационные технологии. Облучая посевной материал разными дозами ионизирующего излучения, можно ускорить рост растений, развитие сельскохозяйственных культур, повысить полевую всхожесть посевного материала, снизить

разнокачественность растений по биологическому потенциалу [1-3].

В качестве объекта исследования был выбран салат листовой сорта «Московский парниковый». Салат является одной из наиболее ценных овощных культур. В нем содержится большое количество органических кислот, витаминов, ферментов. Зеленая культура – лидер по содержанию солей кальция, достаточное высокое количество обнаруживается в ней солей железа и магния. Стоит отметить, что листовый салат хорошо обеспечен микроэлементами, такими как марганцем, кобальтом, медью, йодом и цинком. В

нем присутствуют полезные для человека вещества. Так, в млечном соке культуры обнаруживается лактуцин, успокаивающий нервную систему, способствующий улучшению сна и снижению кровяного давления. Сельскохозяйственная культура свободно возделывается во всем мире и является одной из традиционных овощных культур многих народов.

Целью исследования было поставлено изучить влияние гамма-облучения семян салата листового сорта «Московский парниковый» на содержание в растениях макроэлементов, таких как азот, фосфор и калий.

Вегетационный опыт был заложен в 2022 году на кафедре агрономической, биологической химии и радиологии на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве, которую предварительно отобрали с опытного поля РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Агрохимические показатели используемой почвы были следующими: pH_{KCl} – 5,1; гидролитическая кислотность – 3,3 мг-экв/100 г почвы; сумма поглощенных оснований – 28,0 мг-экв/100 г почвы; степень насыщенности почвы основаниями – 89,5 %. Содержание подвижных форм фосфора и калия (по Кирсанову) было на уровне IV класса. Перед закладкой опыта посевной материал был облучен во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии на гамма-установке радиационного облучения ГУР-120. В качестве источника облучения использовали ^{60}Co (тип ИИИ ГИК 7-4).

Также был применен универсальный дозиметр ДКС-101 с ионизационной камерой БМК-50 № 1198 для установления дозы излучения. Облучали посевной материал в дозах 1, 2, 3, 4 и 6 Гр. Для оптимизации минерального питания сельскохозяйственной культуры при набивке сосудов в почву вносились минеральные удобрения в дозах 150 мг/кг почвы N, 150 мг/кг почвы P_2O_5 и 200 мг/кг почвы K_2O . С учетом слабобокислой реакции почвенного раствора и достаточно высокой величины гидролитической кислотности совместно с внесением удобрений добавляли доломитовую муку. Полную норму известкового удобрения рассчитывали по величине гидролитической кислотности. Посев культуры проводился в день набивки сосудов. После всходов в каждом сосуде оставляли по 15 растений. В течение всего периода вегетации листового салата проводился уход за культурой. В день уборки растения были срезаны ножницами, взвешены и высушены до постоянной массы. После измельчения растительного материала определяли содержание в сельскохозяйственной культуре макроэлементов. Азот – по Кьельдалю, фосфор – по Е. Труогу и А. Мейеру, калий – пламенно-фотометрически.

Проведенные исследования показали, что облучение посевного материала разными дозами ионизирующего излучения влияет на содержание сухого вещества в растениях листового салата сорта «Московский парниковый» (рис. 1).

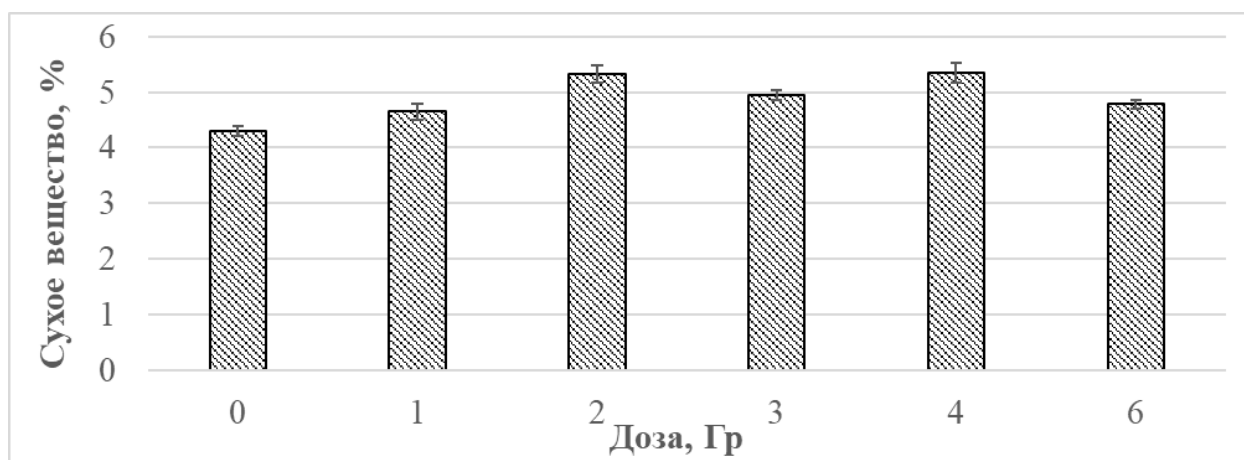


Рисунок 1. Влияние γ -облучения семян листового салата сорта «Московский парниковый» на содержание сухого вещества в растениях»

Наименьшее содержание сухого вещества в растениях зеленой культуры, как и предполагалось, было зафиксировано на контрольном варианте, где посевной материал не был облучен, и составляло 4,33 %. Но, стоит отметить, что воздействие радиации на посевной материал листового салата сорта «Московский парниковый» в дозах 2 и 4 Гр статистически значительно повышал содержание сухого вещества в сельскохозяйственной культуре. Так, при облучении семян салата ионизирующим излучением в дозе 2 Гр

содержание сухого вещества составляло 5,33 %, что на 23,95 % выше контрольного варианта; а в дозе 4 Гр – 5,35 %, что превышает фон на 24,42 %. В остальных вариантах достоверного превышения контрольных значений отмечено не было.

Гамма-облучение семян салата листового сорта «Московский парниковый» повлияло также и на содержание в растениях азота, фосфора и калия (рис. 2).

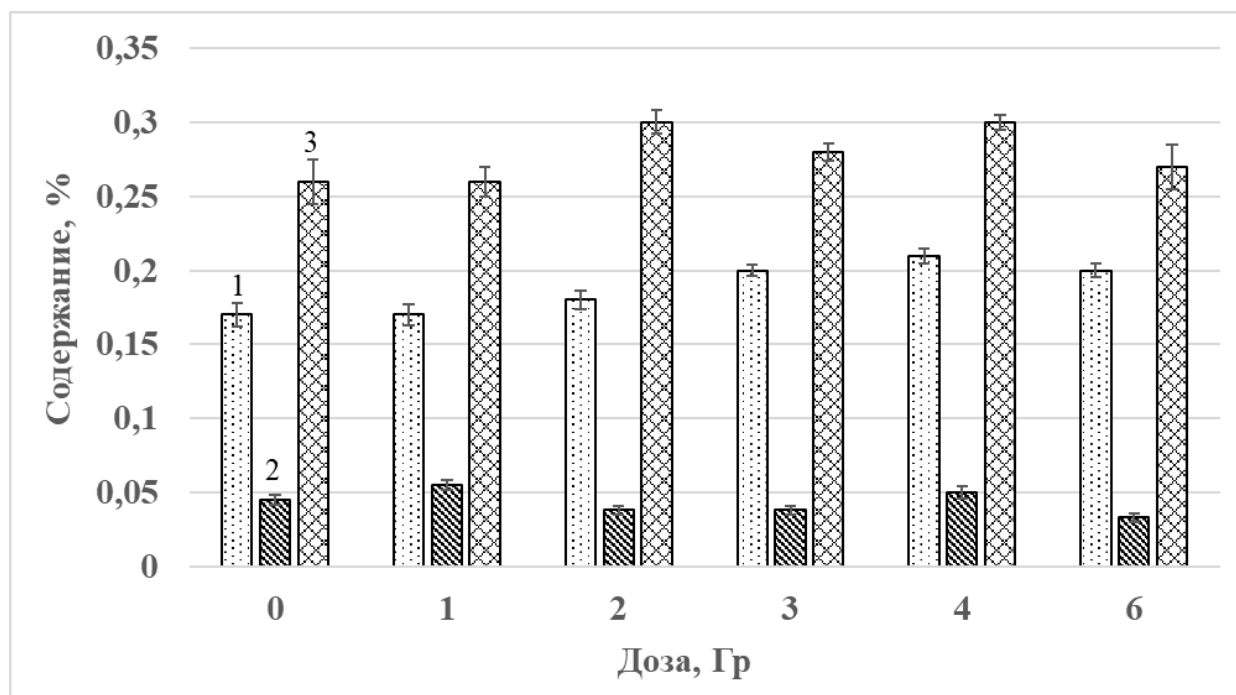


Рисунок 2. Влияние γ -облучения семян листового салата сорта «Московский парниковый» на содержание азота (1), фосфора (2) и калия (3) в растениях

Содержание азота в зеленой культуре находилось в пределах 0,17-0,21 %. Наименьшее значение обсуждаемого показателя было зафиксировано на контрольном варианте, а также при воздействии на семена радиации в дозах 1-2 Гр. Достоверное увеличение содержания макроэлемента было обнаружено при облучении посевного материала ионизирующим излучением в дозах 3, 4 и 6 Гр, превышая контрольные значения на 17,65-23,53 %.

Наименьшее же содержание фосфора в листовом салате сорта «Московский парниковый» отмечено при воздействии радиации в дозе 6 Гр и составляло 0,033 %, что на 26,67 % ниже фона. Стимулирующее действие ионизирующего излучения фиксировалось при облучении семян салата в дозе 1 Гр. Содержание элемента минерального питания в данном варианте составляло 0,055 %, превышая контроль на 22,22 %. Статистически значимого изменения содержания фосфора в растениях при воздействии на семена листового салата ионизирующего излучения в дозах 2-4 Гр отмечено не было.

Предпосевное облучение семян повлияло на содержание калия в зеленой культуре. Так, при воздействии радиации на посевной материал в дозе 2 и 4 Гр, содержание макроэлемента составило 0,3 %, что выше контроля на 15,38 %. Ингибирующего действия радиации на данный показатель не обнаружено.

Таким образом, предпосевное облучение семян листового салата сорта «Московский парниковый» увеличивает выход сухого вещества, содержание азота, фосфора и калия. Эффект радиационного

горьмезиса на содержание сухого вещества в растениях зеленой культуры отмечен при поглощенных дозах 2 и 4 Гр. Стоит отметить, что в данном диапазоне доз зафиксировано и благоприятное действие радиации на содержание калия в сельскохозяйственной культуре. Положительное влияние ионизирующего излучения наблюдается также на содержание азота в салате, а именно при воздействии радиации на посевной материал в дозах 3, 4 и 6 Гр. Поглощенная доза в 1 Гр достоверно увеличила содержание фосфора в листовой культуре, однако дальнейшее повышение уровня облучения отрицательно влияло на величину данного показателя. И уже при поглощенной дозе 6 Гр наблюдалось достоверное снижение содержания фосфора в растениях салата.

Список литературы

1. Effects of low dose gamma radiation on the germination and yield components of Chinese cabbage / J.S. Kim [et al.] // Kor. J. Environ. Agr. 2017. PP. 274-278.
2. Гусева Ю.Е., Смолина Г.А., Торшин С.П. Влияние облучения семян райграсса однолетнего ^{60}Co на урожай и вынос растениями макроэлементов // Плодородие. 2022. № 5 (128). С. 69-72. DOI 10.25680/S19948603.2022.128.17.
3. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжирова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

INFLUENCE OF γ -IRRADIATION OF LETTUCE SEEDS (*LACTUCA SATIVA* L.) ON THE CONTENT OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM

Guseva Yu.E.^a, Smirnova P.A.

Russian State Agrarian University – MTAА, Timiryazevskay st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434
e-mail: ^auguseva@rgau-msha.ru

The effect of gamma irradiation of seeds of leaf lettuce of the Moskovsky greenhouse variety on the content of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in plants was studied. It has been determined that at an absorbed dose of 1 Gy, the content of phosphorus in an agricultural crop increases. Irradiation of seed material with ionizing radiation in doses of 2 and 4 Gy increases the yield of dry matter, the content of nitrogen and potassium.

Keywords: γ -irradiation, lettuce, radiation hormesis, nitrogen, phosphorus, potassium

Gamma irradiation of lettuce seeds of the Moscow greenhouse variety also affected the content of nitrogen, phosphorus and potassium in plants. The nitrogen content in the green culture was in the range of 0.17-0.21 %. The lowest value of the discussed indicator was recorded in the control variant, as well as when the seeds were exposed to radiation in doses of 1-2 Gy. A significant increase in the content of the macroelement was found when the inoculum was irradiated with doses of ionizing radiation of 3, 4 and 6 Gy, exceeding the control values – by 17.65-23.53 %. The lowest content of phosphorus in lettuce of the Moskovsky greenhouse variety was observed when exposed to radiation at a dose of 6 Gy and amounted to 0.033 %, which is 26.67 % lower than the background. The stimulating effect of ionizing radiation was recorded when lettuce seeds were irradiated at a dose of 1 Gy. The content of the mineral nutrition element in this variant was 0.055 %, exceeding the control by 22.22 %. There was no statistically significant change in the discussed indicator when the lettuce seeds were exposed to ionizing radiation at doses of 2-4 Gy. Presowing seed irradiation affected the potassium content in the green crop.

Thus, when the seed was exposed to radiation at a dose of 2 and 4 Gy, the content of the macroelement was 0.3 %, which is 15.38 % higher than the control. No inhibitory effect of radiation on this indicator was found.

Thus, pre-sowing irradiation of lettuce seeds of the Moscow greenhouse variety increases the dry matter yield, the content of nitrogen, phosphorus and potassium. The effect of radiation hormesis on the content of dry matter in green plants was observed at absorbed doses of 2 and 4 Gy. It should be noted that in this range of doses, a favorable effect of radiation on the potassium content in agricultural crops was also recorded. A positive effect of ionizing radiation is also observed on the nitrogen content in lettuce, namely, when the seed material is exposed to radiation in doses of 3, 4 and 6 Gy. The absorbed dose of 1 Gy significantly increased the content of phosphorus in the leaf culture, however, a further increase in the level of irradiation had a negative effect on the value of this indicator. And already at an absorbed dose of 6 Gy, a significant decrease in the content of phosphorus in lettuce plants was observed.

УДК 635.522

ВЛИЯНИЕ ПРЕПОСЕВНОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ЛИСТОВОГО САЛАТА (*LACTUCA SATIVA* L.)

Ивановская Е.С., Гусева Ю.Е.^a

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49, Российская Федерация
e-mail: ^auguseva@rgau-msha.ru

В условиях лабораторного опыта установлено влияние предпосевного гамма-облучения на рост и развитие листового салата сорта «Московский парниковый». Определено, что эффект радиационного гормезиса проявляется при воздействии на посевной материал радиацией в дозах 1-4 Гр.

Ключевые слова: *листовой салат, радиационный гормезис, ионизирующее излучение*

Предпосевное гамма-облучение семян – одно из перспективных и в то же время экологически безопасных мероприятий, направленных на выполнение важнейшей задачи продовольственной безопасности России по увеличению сбора урожая и повышению качества растениеводческой продукции. Благодаря эффекту радиационного гормезиса повышается урожай сельскохозяйственных культур, увеличивается репродуктивная способность растений, устойчивость к неблагоприятным факторам среды [1-4]. Однако, стоит отметить, что воздействие ионизирующего излучения выше определенного для каждого растения порога может ингибировать рост и развитие сельскохозяйственных культур. Для возникновения стимулирующего и ингибирующего эффектов действия радиации необходимо опытным путем для каждой культуры установить соответствующие диапазоны доз.

Цель нашего исследования – установить влияние предпосевого гамма-облучения (^{60}Co) семян листового салата сорта «Московский парниковый» на рост и развитие растений на ранних этапах онтогенеза.

Посевной материал облучали во ВНИИ радиологии и радиоэкологии в дозах 1, 2, 3, 4 и 6 Гр. Проращивание проводили на следующий день после воздействия радиацией в стерильных чашках Петри на фильтровальной бумаге, которую увлажняли дистиллированной водой. Количество семян в каждой чашке было по 50 штук. Повторность опыта – трехкратная. Для проращивания использовали термостат, поддерживающий температуру 22 °С. Лабораторная всхожесть посевного материала, длина ростков и

корней растений определялась на третий день после начала эксперимента. Длина ростков, корней, а также масса проростков учитывалась также через семь дней после закладки опыта.

Проращивание посевного материала салата листового сорта «Московский парниковый» было проведено на следующий день после облучения. Через три дня после закладки опыта были измерены такие биометрические показатели, как длина корней и ростков растений. Ингибирующее действие радиации на длину корней зеленой культуры было зафиксировано при воздействии радиации на посевной материал в дозах 1, 3, 4 и 6 Гр; на длину ростков – в дозах 1-6 Гр (табл. 1). Стоит отметить, что эффект радиационного гормезиса через три дня после начала эксперимента зафиксирован не был.

Через семь дней после закладки опыта статистически значимого увеличения или снижения длины корней салата по сравнению с контрольным вариантом отмечено не было (рис. 1, 2). Однако стимулирующий эффект ионизирующего излучения отмечен на длину ростков растений зеленой культуры при воздействии радиации на посевной материал в дозах 1, 4 и 6 Гр, где превышение контроля было соответственно на 7,71, 6,55 и 6,62 %. Положительное влияние небольших доз ионизирующего излучения было отмечено и на такой показатель, как масса 10 растений сельскохозяйственной культуры. Стимулирующее действие радиации зафиксировано при облучении посевного материала в дозах 1-4 Гр, превышение контроля – на 12,61-33,61 % (рис. 2, 3).

Таблица 1

Влияние предпосевого гамма-облучения (^{60}Co) на длину корня и ростка растений листового салата сорта «Московский парниковый» через 3 дня после начала проращивания, мм

№ п/п	Вариант, доза облучения, Гр	Корень	Росток
1	0	24,64±0,8	6,90±0,4
2	1	21,72±1,2	5,28±0,3
3	2	24,40±1,1	5,84±0,2
4	3	22,00±1,2	4,94±0,3
5	4	21,00±1,2	5,48±0,3
6	6	21,18±1,1	5,88±0,3

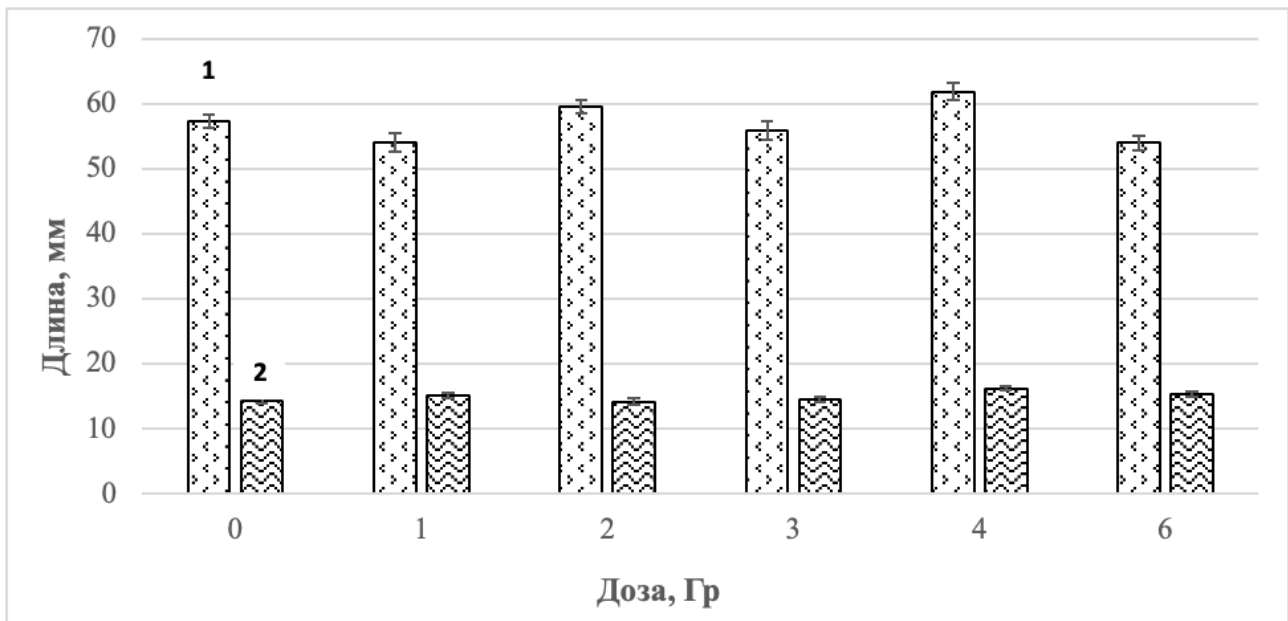


Рисунок 1. Влияние предпосевого гамма-облучения (^{60}Co) семян листового салата сорта «Московский парниковый» на длину ростков (1) и корне растений (2) через 7 дней после начала прорастивания

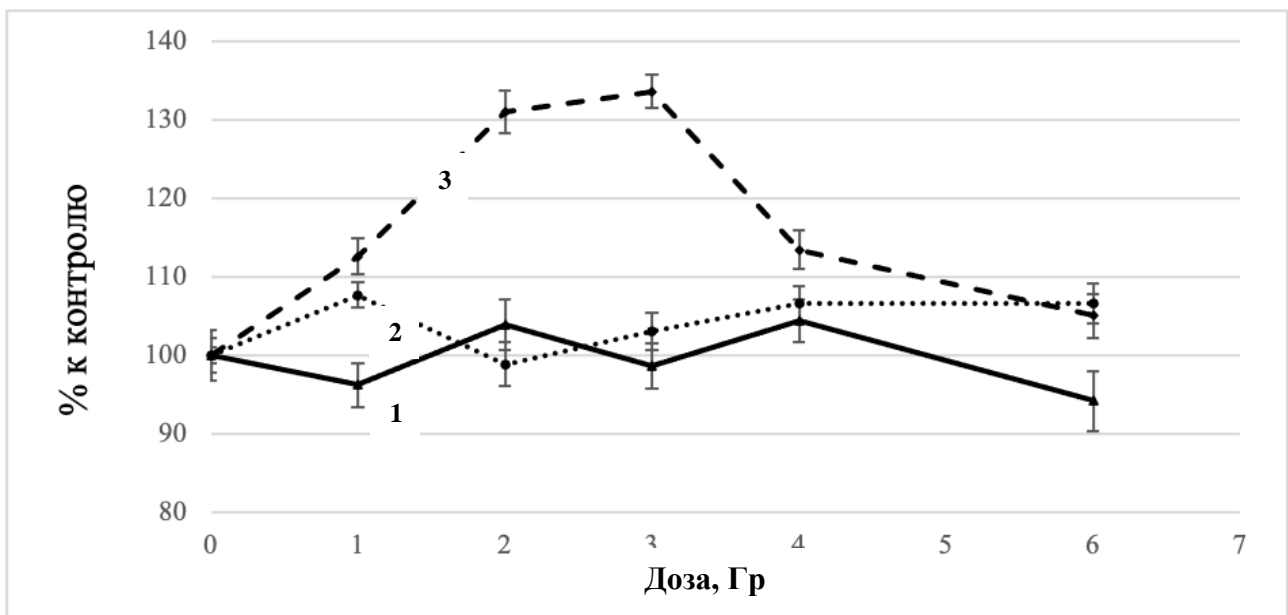


Рисунок 2. Влияние предпосевого гамма-облучения (^{60}Co) семян листового салата сорта «Московский парниковый» на длину корешка (1); длину ростка (2) и массу проростка (3) через 7 дней после начала прорастивания

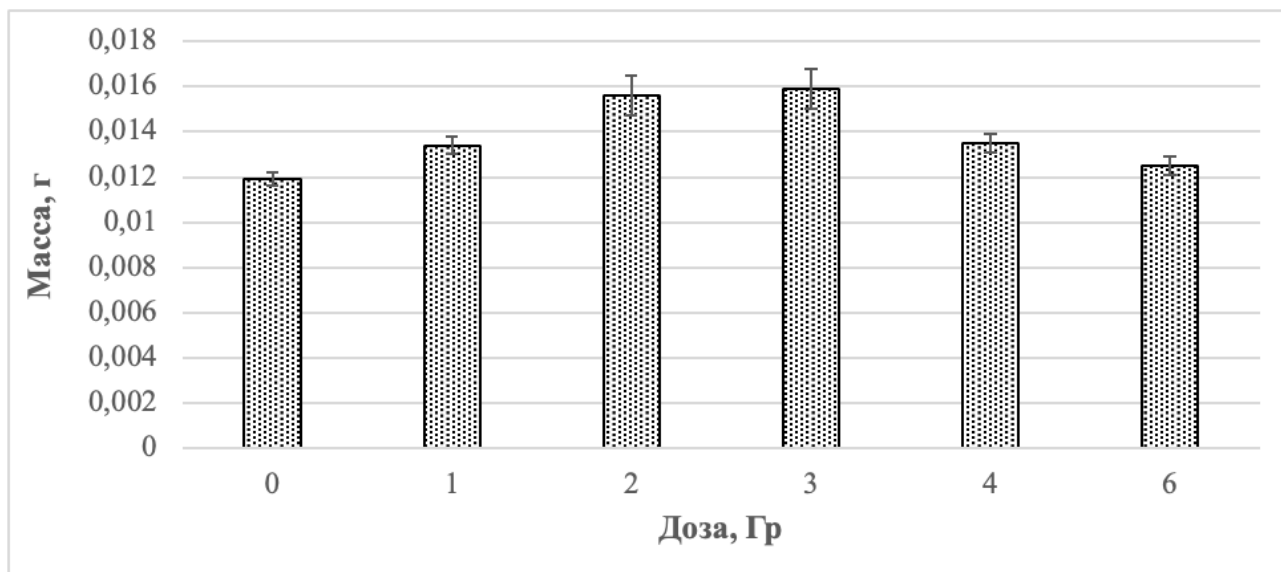


Рисунок 3. Влияние предпосевного гамма-облучения (^{60}Co) семян листового салата сорта «Московский парниковый» на массу 10 проростков через 7 дней после начала проращивания

Таким образом, лабораторный опыт в чашках Петри, заложенный на кафедре агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, показал, что предпосевное гамма-облучение семян влияет на изменение биометрических показателей салата сорта «Московский парниковый» (рис. 1-3). Стимулирующее действие радиации было отмечено через 7 дней после начала проращивания. Определено, что эффект радиационного гормезиса проявляется при воздействии на посевной материал радиацией в дозах 1-4 Гр.

Список литературы

1. Effects of low dose gamma radiation on the germination and yield components of Chinese cabbage / J.S. Kim [et al.] // Kor. J. Environ. Agr. 2017. PP. 274-278.

2. Guseva Ju., Smolina G.A., Torshin S.P. Effect of γ -radiation of lettuce seeds (*Lactuca sativa* L.) for the yield and removal of macronutrients by plants // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Agriculture» (ITA 2022), Orel, 23-24 марта 2022 года. Vol. 47. Orel: EDP Sciences, 2022. P. 05008. DOI 10.1051/bioconf/20224705008.

3. Гусева Ю.Е., Смолина Г.А., Торшин С.П. Влияние облучения семян райграсса однолетнего ^{60}Co на урожай и вынос растениями макроэлементов // Плодородие. 2022. № 5 (128). С. 69-72. DOI 10.25680/S19948603.2022.128.17.

4. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

INFLUENCE OF PRE-SOWING GAMMA-IRRADIATION ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF LETTUCE (*LACTUCA SATIVA* L.)

Ivanovskaya E.S., Guseva Yu.E.^a

Russian State Agrarian University – MTAА, Timiryazevskay st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434
e-mail: ^auguseva@rgau-msha.ru

Under the conditions of a laboratory experiment, the effect of presowing gamma irradiation on the growth and development of leaf lettuce of the Moscow Greenhouse variety was established. It is certain that the effect of radiation hormesis manifests itself when the seed material is exposed to radiation in doses of 1-4 Gy.

Keywords: lettuce, radiation hormesis, ionizing radiation

Pre-sowing irradiation formation of seeds is one of the promising and at the same time environmentally

friendly measures aimed at ensuring the exceptional food security of Russia in terms of harvesting and

improving the quality of crop products. Due to the effect of radiation hormesis, the crop yield increases, the reproductive capacity of plants increases, resistance to adverse environmental factors.

The purpose of our study is to establish the effect of presowing gamma irradiation (^{60}Co) of lettuce seeds of the Moscow Greenhouse variety on the growth and development of plants at the early stages of ontogenesis.

Laboratory experiment in Petri dishes, laid down at the Department of Agronomic, Biological Chemistry

and Radiology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, showed that presowing gamma irradiation of seeds affects the change in the biometric parameters of lettuce variety «Moscow Greenhouse» (Fig. 1-3). The stimulating effect of radiation was observed 7 days after the start of germination. It was determined that the effect of radiation hormesis manifests itself when the seed material is exposed to radiation in doses of 1-4 Gy.

УДК 53.06, 57.03, 57.04, 633.11, 664.7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВСХОЖЕСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Ильюхин Р.В.

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный экономический университет», 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной воли, д. 62/45, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22 к. 1, Российская Федерация
e-mail: iruslan@sputniksattv.ru

Обработка среднераннего сорта мягкой яровой пшеницы Екатерина низкими дозами гамма-излучения обеспечивает достижение высоких показателей кинетики прорастания. При сопоставимой скорости прорастания – более 3 сут., образцы зерен пшеницы, обработанных дозами 5 Гр и 10 Гр, отличаются высокой способностью к прорастанию до 85-90 %. Необходимо дальнейшее проведение исследований по влиянию радиостимуляционного воздействия на пшеницу разных сортов.

Ключевые слова: мягкая яровая пшеница Екатерина, доза, Гр, проращивание, способность к прорастанию, гамма-излучение

Проводимая в настоящее время национальная аграрная политика направлена на устойчивое развитие сельского хозяйства, определяемое рациональными моделями сельскохозяйственного производства. Качество семенного материала и предпосевная обработка относится к первичным факторам получения высокого урожая.

В сельском хозяйстве с успехом применяется радиационная обработка для дезинсекции зерновых культур и для контроля фитосанитарного состояния сельскохозяйственных культур [1]. В то же время обработка семян зерновых культур низкодозовым γ -излучением отличается промышленной применимостью непосредственно для последующего выращивания зерновых культур в АПК [2]. Так, применение стимулирующей дозы гамма-излучения 5-8 Гр приводит к увеличению урожайности пшеницы на 9-11 %, ячменя – на 13-20 % при дозе излучения 10-30 Гр, ржи – на 10-15 % после обработки дозами 5-10 Гр [3].

Валовой сбор пшеницы в общем объеме производства зерновых в 2022 году увеличился на 5,3 % и составил 67,9 %, достигнув урожая в 104,5 млн. т, что

требует эффективных технологий сохранения, в том числе семенного зерна, так как, по данным [4] снижение полевой всхожести всего на 1 % приводит к потере урожая яровых на 1,5-2,0 %, озимых – на 1,0-1,5 %.

В результате селекционной работы, исходя из изменений климатических условий в Свердловской области, был создан среднеранний сорт пшеницы Екатерина методом внутривидовой гибридизации от скрещивания между раннеспелой материнской формой (Ирень) и среднеспелым сортом Красноуфимская 100 со средней урожайностью выше стандарта (Горноуральская) и преимуществом по массе 1000 зерен, продуктивности колоса и другим параметрам, в том числе по адаптивной способности и устойчивости к пыльной головне и поражению корневыми гнилями [5], а также высокой экологической пластичностью [6].

Всхожесть зерна в полевых условиях определяется эффективностью прорастания, что обуславливает цель исследования – изучение влияния разных доз гамма-излучения на кинетику прорастания зерен

мягкой яровой пшеницы Екатерина, районированной в Волго-Вятском, Западно-Сибирском, Средневолжском и Уральском регионах.

Объект и методы исследований

Зерно мягкой яровой пшеница Екатерина рода *Triticum* вида *Aestivum* разновидность *Lutescens* удлиненной формы, окрашенное, белесо-темно-желтого цвета, бороздка узкая и неглубокая, масса 1000 семян равна $38,3 \pm 1,6$ г. Отобранные зерна ячменя соответствуют требованиям ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна», ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия».

Для активации на первом этапе проводилась обработка зерен мягкой яровой пшеница Екатерина 2020 года урожая разными дозами γ -излучения (5 Гр, 10 Гр, 15 Гр) в ООО «РЦОТ «Эра» на установке РТУ-3000. Источники гамма-облучения – Co^{60} , тип ГИК-А6 и М60К60.

Для проращивания зерен в первые сутки после обработки излучением были сформированы 1-я, 2-я и 3-я опытные группы образцов зерен по 100 шт. в каждой группе и обработанные соответственно следующими дозами: 5 Гр, 10 Гр и 15 Гр., для контроля аналогично – контрольная группа образцов зерен, необработанных излучением.

Проращивание зерен осуществлялось между слоями увлажненной фильтровальной бумаги согласно ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести» при температуре воздуха $(20 \pm 0,5)$ °С в темноте, с периодическим орошением водопроводной водой с постоянной температурой $+20$ °С.

Фенологические наблюдения осуществлялись в одно и то же время 2 раза в сутки. В соответствии с требованиями ГОСТ 10968-88 «Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности к прорастанию» проводился расчет энергии прорастания за 3 сут. и способности прорастания зерна через 5 сут. Расчетным путем по [7] определяли скорость прорастания (сут.) и дружность прорастания (шт.). Все исследования проводили в пятикратной повторности.

Результаты исследований

Зерна пшеницы начали проклевываться через 18-20 ч. Оболочка семени пшеницы сначала прорывалась корешками с последующим проклевыванием колептиля и активным ростом самого ростка. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

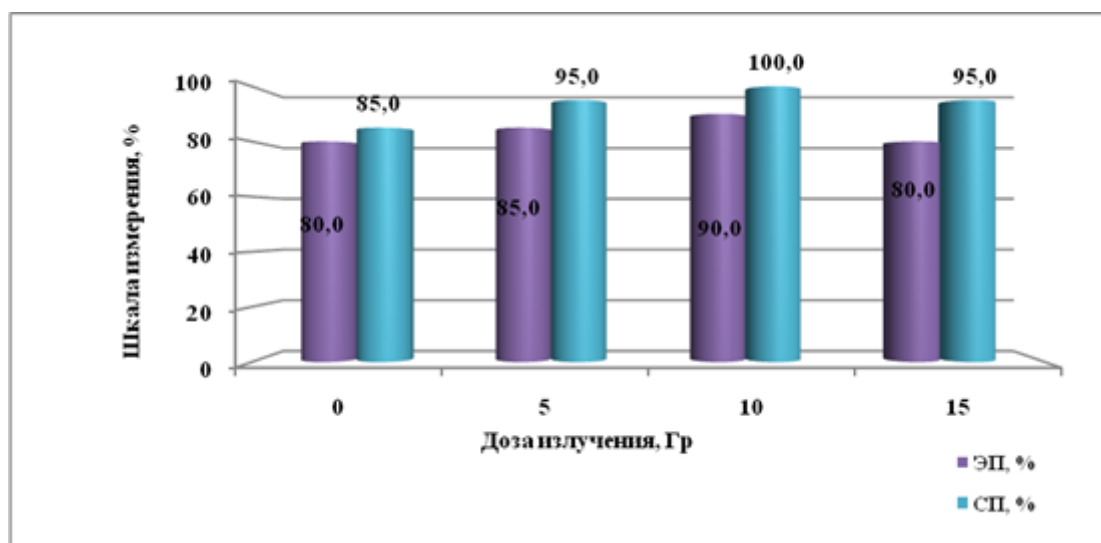


Рисунок 1. Результаты исследования зерен мягкой яровой пшеницы (ЭП – энергия прорастания, %; СП – способность к прорастанию, %)

По результатам проведенных исследований установлено, что скорость прорастания зерен пшеницы, необработанных и обработанных разными дозами гамма-излучения, изменялась незначительно от 3,34 до 3,54 сут. и составляет в среднем более 3 дней. Дружность прорастания низкая в контрольных образцах, необработанных излучением – 17 зерен. В 1-й и 3-й опытных группах – 19 зерен, во 2-й опытной группе – 20 зерен. Энергия прорастания и способность к прорастанию достаточно высокая во всех образцах, но наиболее высокие показатели в зернах

пшеницы, обработанных дозой 10 Гр – 90 % и 100 %, соответственно. В то же время в образцах зерен пшеницы, обработанных дозой 15 Гр, при энергии прорастания 80 %, что сопоставимо с необработанными образцами, за счет более высокой скорости прорастания, способность к прорастанию увеличилась до 95 %.

Таким образом, результаты данного этапа исследований позволяют сделать вывод о целесообразности радиостимуляции зерен пшеницы Екатерина дозами от 5 до 10 Гр для улучшения кинетики

прорастания зерен, что позволит улучшить всхожесть зерен в полевых условиях. Комплексные исследования в этом направлении будут продолжены.

Список литературы

1. Физико-химические аспекты радиационной обработки биообъектов / В.М. Авдюхина, В.Ю. Анянцев, М.К. Беклемишев [и др.] // Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов I международной молодежной конференции. Обнинск, 18-21 октября 2022. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2022. С. 102-103.

2. Тимакова Р.Т., Ильяхин Р.В. Влияние малых доз γ -излучения в условиях контролируемого микробиологического онтогенеза ярового ячменя // Индустрия питания. Food Industry. 2023. Vol. 8. № 1. С. 14–25. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-1-2.

3. Тимакова Р.Т., Ильяхин Р.В. К вопросу о радиостимуляции в предпосевной обработке зерна // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции.

Минск, 24-25 ноября 2022. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2022. С. 418-421.

4. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

5. Зезин Н.Н., Воробьев В.А., Воробьев А.В. Екатерина – новый сорт яровой пшеницы для адаптивно-ландшафтной системы земледелия Среднего Урала // Зерновое хозяйство России. 2017. № 49 (1). С.62-66.

6. Влияние биотических и абиотических условий выращивания на формирование высококачественного зерна новых сортов яровой пшеницы / С.Е. Терентьев, И.Н. Романова, С.М. Князева, Л.В. Маленкова // Пищевая промышленность. 2022. № 9. С. 22-25. DOI: 10.52653/PPI.2022.9.9.004.

7. Исследование влажностного режима при проращивании семян чиа (*Salvia hispanica* L.) / А.В. Проскура [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2018. № 2. С. 27-33.

EVALUATION OF THE EFFECT OF γ -RADIATION ON THE GERMINATION OF SPRING WHEAT

Ilyukhin R.V.

¹ Ural State University of Economic, 8 Marta st./Narodnaya Volya 62/45, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, Russian Federation, 620144

² Federal State Budget -Financed Educational Institution of Higher Education the Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Bolshhevikov ave. 22 bld., 1, St. Petersburg, Russian Federation, 193232

e-mail: iruslan@sputniksttv.ru

Treatment of the medium-early variety of soft spring wheat Ekaterina with low doses of gamma radiation ensures the achievement of high germination kinetics. With a comparable germination rate - more than 3 days, samples of wheat grains treated with doses of 5 Gy and 10 Gy are distinguished by a high germination capacity of up to 85-90 %. Further research is needed on the effect of radiostimulation on wheat of different varieties.

Keywords: soft spring wheat Ekaterina, dose, Gy, germination, germination ability, gamma radiation

УДК 637.07, 637.137, 637.143

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУХОГО КОБЫЛЬЕГО МОЛОКА

Ильяхина Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный экономический университет»,

620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной воли, д. 62/45, Российская Федерация

e-mail: janine86@mail.ru

Обработка сухого кобыльего молока, полученного в результате сублимационной сушки, разными дозами γ -излучения обеспечивает микробиологическую безопасность, исходя из целей дальнейшего использования молока:

для промышленной переработки или для непосредственного употребления в пищу без предварительной термической обработки согласно требований ТР ТС 033/2013. Необходимо дальнейшее проведение исследований по влиянию воздействия излучения на качественные показатели ценного кобыльего молока.

Ключевые слова: кобылье молоко, доза, Гр, сублимационная сушка, гамма-излучение, радиационные технологии, сухое молоко

Государственное техническое регулирование в соответствии с Федеральным законом от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и соответствующих технических регламентов, в частности ТР ТС 033/2013 «О безопасности молока и молочной продукции», регулирует вопросы, связанные с безопасностью продукции для недопущения причинения вреда жизни или здоровью граждан. Важнейшим индикатором безопасности является микробиологическая безопасность пищевой продукции, одним из эффективных методов достижения которой являются радиационные технологии в результате использования ионизирующего излучения.

Эффективность обработки в первую очередь зависит от дозы излучения, вида и штамма микроорганизмов, их исходного количества, мощности дозы и других факторов [1, 2].

По данным [3], в радиационных технологиях используются, главным образом, соматические эффекты облучения, в том числе для микроорганизмов: подавление репродуктивной функции и летальные эффекты.

Наиболее устойчивыми к ионизационному облучению оказались штамм *Salmonella* (грамотрицательные), менее устойчив штамм микроорганизмов *S. aureus* (грамположительные) [4].

При этом показана необходимость рассмотрения не только эффективности микрофлоры на конкретных продуктах, но и эффективности радиационных установок с различной мощностью для конкретного образца [5].

Согласно аналитическим данным за период с 01.01.2022 по 30.06.2022 по результатам лабораторных исследований установлено, что из 8712 проб молока и молочной продукции 204 пробы, или 2,34 %, не соответствовали требованиям безопасности [6], что требует применения совершенных методов сохранения молока и молочной продукции.

Молоко является уникальным биопродуктом, отличающимся сбалансированным составом. В последние годы усилился интерес к нетрадиционным видам молока, в том числе к козьему и кобыльему молоку.

Из всех видов молока кобылье молоко наиболее приближено к женскому молоку, что определяет его ценность для лечебно-профилактического питания

при туберкулезе, гепатите, патологии ЖКТ, в реабилитации онкологических больных и для поддержания иммунитета [7].

В настоящее время кобылье молоко производится предприятиями малого бизнеса в зоне традиционного распространения и отличается определенной сезонностью производства [8].

В этих условиях наиболее рационально производить из кобыльего молока сухие молочные консервы, отличающиеся длительными сроками хранения. Наряду с этим в процессе хранения сухого молока в неупакованном виде возможна повторная контаминация микроорганизмами.

Для уменьшения микробиологической обсемененности казеина и сухого молока эффективна обработка ионизирующим излучением дозой 5 кГр [9].

Цель исследования – оценка влияния разных доз γ -излучения на микробиологические показатели сухого кобыльего молока.

Объект и методы исследований

Объектом исследования является сухое кобылье молоко, полученное из сырого молока в результате сублимации без предварительного проведения этапа пастеризации [7].

Образцы сухого молока были обработаны разными дозами γ -излучения (1,0-2,0 кГр) в ООО «РЦОТ «Эра» на установке РТУ-3000. Источники гамма-облучения – Co^{60} , тип ГИК-А6 и М60К60.

Исследование микробиологических показателей проводили по ГОСТ 32901-2014 «Молоко и молочная продукция. Методы микробиологического анализа» (КМАФАнМ) в пятикратной повторности.

Результаты исследований

Образцы контрольной группы сухого кобыльего молока не были обработаны излучением (1-я контрольная группа). Образцы опытных групп были обработаны соответственно дозами 1,0 кГр (2-я опытная группа), 1,5 кГр (3-я опытная группа) и 2,0 кГр (4-я опытная группа). Результаты эксперимента представлены на рис 1.

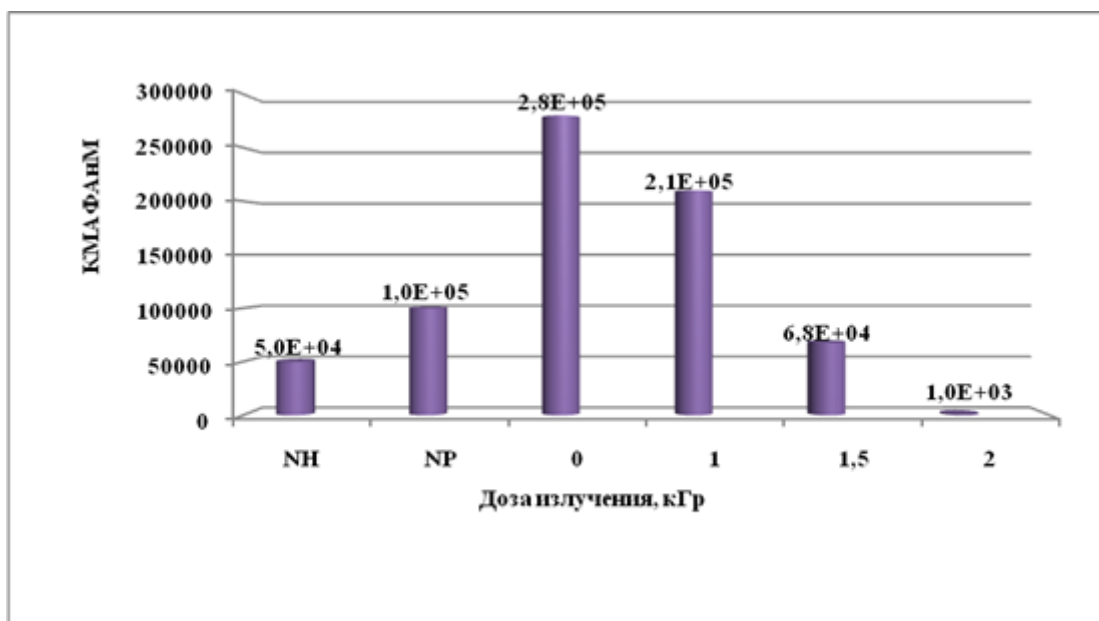


Рисунок 1. Показатели микробиологической безопасности сухого кобыльего молока (NH – нормативный показатель по ТР ТС 033/2013 для непосредственного употребления в пищу, NP – нормативный показатель по ТР ТС 033/2013 для промышленной переработки, 0 – молоко не обработано излучением, 1,0; 1,5 и 2,0 кГр – дозы излучения)

По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение дозы излучения способствует уменьшению общей бактериальной обсемененности, определяемой по КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов). Опытные образцы сухого кобыльего молока 3-й группы после обработки дозой 1,5 кГр пригодны для последующей промышленной переработки, Опытные образцы сухого кобыльего молока 4-й группы после обработки дозой 2,0 кГр – для непосредственного употребления в пищу без предварительной термической обработки.

Полученные данные по подбору доз излучения сопоставимы с исследованиями ряда авторов: дозы излучения свыше 1 кГр способствуют уменьшению микробиологической обсемененности [10-12].

Органолептическая оценка сухого кобыльего молока показывает, что все опытные группы молока соответствовали требованиям ГОСТ Р 52975-2008 «Консервы молочные. Молоко кобылье сухое. Технические условия». Получен однородный мелкий белый порошок с чуть сладковатым, свойственным кобыльему молоку вкусом, без посторонних привкусов и запахов.

Таким образом, по результатам данного этапа исследований можно сделать вывод об эффективности радиационной обработки сухого кобыльего молока разными дозами γ -излучения, исходя из поставленных целей для дальнейшего использования. Требуется продолжение исследований в этом направлении.

Список литературы

1. История развития радиационных технологий для сельского хозяйства и пищевой промышленности / Н.И. Санжарова, В.О. Кобыляк, Г.В. Козьмин, Н.Н. Лой // История науки и техники. 2020. № 7. С. 90-103. DOI: 10.25791/intstg.07.2020.1200.
2. Санжарова Н.И., Козьмин Г.В., Гордиенко Е.В. Развитие радиационных технологий для сельского хозяйства и пищевой промышленности: вклад ВНИИРАЭ // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: научные основы и перспективы практического применения: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 5 / Под редакцией Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2023. С. 9-16.
3. Радиобиологические основы использования ионизирующих излучений в агробиотехнологиях / С.А. Гераськин, Е.В. Бондаренко, В.С. Бондаренко, П.Ю. Волкова // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: научные основы и перспективы практического применения: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 5 / Под редакцией Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2023. С. 17-33.
4. Облучение биологических объектов с применением ионизационного пучка с целью ингибирования условно-патогенной и патогенной микрофлоры сельскохозяйственного сырья / М.А. Завьялов, В.А. Кухто, Н.В. Илюхина, А.Ю. Колоколова // Вестник Воронежского государственного университета

инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 3 (77). С. 278-282. DOI: 10.20914/2310-1202-2018-3-278-282.

5. Закономерности ингибирования условно-патогенной микрофлоры под воздействием ионизирующего облучения / Н.В. Илюхина, А.Ю. Колоколова, А.В. Прокопенко, В.П. Филиппович // Международный сельскохозяйственный журнал. 2018. № 5. С. 70-72.

6. О реализации Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации (к «правительственному часу» 530-го заседания Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации 5 октября 2022 года) // Аналитический вестник. 2022. № 22 (812). 171с.

7. Тимакова Р.Т., Илюхина Ю.В., Старцев В.Г. Сублимационная сушка кобыльего молока // Молочная промышленность. 2022. № 12. С. 42-44. DOI: 10.31515/1019-8946-2022-12-42-44.

8. Тимакова Р.Т. Модульный подход к управлению малыми сельскохозяйственными предприятиями //

Техника и технология пищевых производств: материалы XV Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф., 19-20 апреля 2023 г., в 2-х т., Могилев. Могилев: БГУТ, 2023. Т. 2. С. 294-295.

9. Zegota H., Malolepszy B. The decontamination of industrial casein and milk powder by irradiation // Radiation Physics and Chemistry. 2008. Vol. 77. № 9. PP. 1108-1111. DOI:10/1016/j. radphyschem. 2008.05.001.

10. Мусина О.Н., Коновалов К.Л. Радиационная обработка ионизирующим излучением продовольственного сырья и пищевых продуктов // Пищевая промышленность. 2016. № 8. С. 46-49.

11. Тимакова Р.Т. Радиационная обработка молока // Молочная промышленность. 2020. № 5. С. 30-31.

12. Николаев Н.И. Радиационная обработка продуктов питания как технология будущего // Наука и бизнес: пути развития. 2022. № 12 (138). С. 23-26.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GAMMA RADIATION ON MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF DRY MARE'S MILK

Iliukhina Yu.V.

¹ Ural State University of Economic, 8 Marta st./Narodnaya Volya 62/45, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, Russian Federation, 620144
e-mail: janine86@mail.ru

Processing of dry mare's milk obtained as a result of freeze-drying with different doses of gamma radiation ensures microbiological safety, based on the purposes of further use of milk: for industrial processing or for direct consumption without preliminary heat treatment according to the requirements of TR CU 033/2013. It is necessary to conduct further research on the effect of radiation exposure on the quality indicators of valuable mare's milk.

Keywords: mare's milk, dose, Gy, freeze drying, gamma radiation, radiation technologies, milk powder

УДК 539.1.06

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНОЙ И РЫБНОЙ ПРОДУКЦИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ЛЕТАЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Ипатова В.С.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Болотник Т.А.³, Никитченко А.Д.², Родин И.А.^{3,4}, Хмелевский О.Ю.², Черняв А.П.^{1,2}, Юров Д.С.¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Химический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Российская Федерация
e-mail: ^a ipatova.vs15@physics.msu.ru

Проведено исследование содержания летучих органических веществ в охлажденных образцах говядины, индейки и семги после облучения ускоренными электронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 0,1 кГр до 10 кГр. Во всех образцах продукции были идентифицированы различные соединения, что может быть связано с различным содержанием основных макромолекул в продуктах. Предложен механизм изменения концентрации летучих соединений в облученных продуктах мясного и рыбного происхождения за счет конкурирующих процессов радиационно-индуцированного распада и накопления за счет распада других органических молекул. По результатам мониторинга летучих соединений в облученных образцах говядины в течение 5 суток хранения установлена нелинейная зависимость концентрации соединений как от дозы облучения, так и от времени хранения. Ряд соединений, включая алканы, отсутствовали на протяжении первых 2-х суток хранения как в контрольных, так и в облученных образцах мяса говядины, но при дальнейшем хранении их концентрация возрастала, что может служить индикатором процессов порчи данного типа продукции.

Ключевые слова: радиационная обработка, ускоренные электроны, говядина, семга, индейка, летучие органические соединения, газовая хромато-масс спектрометрия

Мясная и рыбная продукция, а также мясо птицы являются неотъемлемым рационам большинства людей по всему миру, поскольку являются основным источником важнейших макромолекул, в частности белка [1].

Необходимость в обработке охлажденной продукции животного происхождения связана в первую очередь с подавлением опасных патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, вызывающих тяжелые виды заболеваний, а в некоторых случаях приводящие к летальному исходу [2]. Среди широко применяемых методов обработки пищевых продуктов, доказана высокая эффективность радиационных технологий, включающая в себя применение радиоизотопов ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs, ускорителей электронов и генерируемые с их помощью тормозные фотоны с энергиями до 10 МэВ и 5 МэВ соответственно, а также рентгеновское излучение [3]. Метод радиационной обработки не оставляет в продукте никаких остаточных следов радиации, не вызывает термических изменений и может быть использован для продукции в упаковке, что исключает повторную контаминацию [4].

Многочисленными исследованиями доказана высокая эффективность использования источников ионизирующего излучения в подавлении микроорганизмов, вирусов и грибов, населяющих пищевую продукцию [5-7], однако в ряде работ отмечается негативное влияние доз свыше 3 кГр на органолептические показатели, включающие в себя вкус, цвет и запах продуктов [8, 9].

Высококчувствительный метод газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) позволяет разделять и идентифицировать низкомолекулярные летучие соединения, в частности спирты, кетоны и альдегиды, в большинстве своем ответственные за запах мясной и рыбной продукции, с высоким разрешением [10].

Целью данного исследования было изучение влияния электронного излучения с максимальной энергией 1 МэВ в дозах до 10 кГр на образование и

количественное содержание различных летучих соединений в мясе говядины, индейки и семги сразу же после облучения, а также в процессе их хранения.

В качестве объектов исследования были выбраны продукты мясного (говядина и индейка) и рыбного происхождения (семга), хранившиеся в холодильной камере при температуре 2-3 °С в течение суток с момента выработки. Образцы продукции массой по (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 при температуре окружающей среды 20 °С. Контрольные необлученные образцы находились в тех же температурных условиях, что и образцы, подвергшиеся воздействию электронного излучения. Контроль поглощенной дозы проводился с использованием пленочной дозиметрии: полимерные пленки СО-ПД(Э)1/10 и СО-ПД(Ф)Р5/50 выкладывались рядом с исследуемым образцами на дюралюминиевую подложку под пучок ускорителя. После облучения, определяли изменения оптической плотности облученных пленок с помощью спектрофотометра UV-3600, далее происходил пересчет в поглощенную дозу. Образцы были облучены в диапазоне доз от 0,1 кГр до 10 кГр.

Анализ концентраций летучих соединений в облученных и контрольных образцах индейки и семги проводился сразу же после облучения на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra, снабженным автоматическим устройством ввода паровой фазы HT200H Headspace Autosampler. Для образцов говядины, хранившихся в холодильной камере при температуре 3 °С, измерения делались ежедневно в течение 5 суток хранения.

По результатам проведенных экспериментов были обнаружены различные летучие органические соединения для исследуемых продуктов животного происхождения (рис. 1).



Рисунок 1. Цветовая карта относительной концентрации летучих органических соединений в индейке, семге и говядине, облученных в различных дозах. Белые ячейки – соединение не обнаружено

На рисунке 1 приведены данные, нормированные на максимальное значение концентрации в каждом соединении для каждого продукта. Таким образом, наглядно продемонстрированы различия между облученным и контрольными образцами при обработке ускоренными электронами в различных дозах. Различия в профиле соединений для говядины, индейки и семги может быть связано с различным составом и процентным содержанием белков, жиров, углеводов и других высоко- и низкомолекулярных соединений в исследуемых образцах.

Влияние электронного излучения на идентифицированные низкомолекулярные соединения показал нелинейный характер их поведения от дозы облучения. На основе анализа изменения концентрации каждого соединения в образцах говядины, индейки и семги от дозы облучения предложен механизм изменения их содержания за счет конкурирующих процессов радиационно-индуцированного распада и накопления за счет распада других органических молекул. Построенная на базе предложенного механизма модель поведения летучих соединений от дозы облучения показала высокий уровень значимости (0,98-0,99), коррелирующий с экспериментальными данными, что говорит о возможности ее применения.

В процессе хранения облученных и контрольных образцов говядины ГХ-МС анализ позволил идентифицировать больше соединений, чем на 0е сутки сразу после обработки. Всего было зарегистрировано 27 различных соединений, включая 8 альдегидов, 8 спиртов, 6 кетонов, 3 углеводорода, а также два серосодержащих соединения – methanethiol и

dimethyl sulfide. Концентрации всех идентифицированных соединений показали нелинейные зависимости как от дозы облучения, так и от времени хранения.

Ряд соединений, таких как 1-butanol,3-methyl-, 1-butanol,2-methyl-, 1-propanol,2-methyl-, 1-octen-3-ol, 2-butanone,3-hydroxy-, 2-butanone,4-hydroxy-, heptane, hexane, octane, отсутствовали на протяжении первых 2х суток хранения как в контрольных, так и в облученных образцах мяса говядины. При дальнейшем хранении их концентрация возрастала, что может служить индикатором процессов порчи данного типа продукции.

Максимальное значение концентрации наблюдалось у большинства соединений при облучении в дозе 5 кГр, что говорит о существенном влиянии данной дозы на количественное содержание летучих органических соединений, вероятно за счет ускорения процессов радиолитического и последующего окисления макромолекул. Также установлено, что высокое содержание большинства альдегидов зафиксировано на 0-2 сутки хранения, для кетонов – на 2-3 сутки хранения, для спиртов – 2-4 сутки, для алканов – 3-4 сутки.

По результатам исследования было показано, что при облучении продуктов мясного и рыбного происхождения в дозах 0,1-10 кГр происходят нелинейные изменения концентраций различных летучих соединений, связанные со структурными повреждениями в биотканях. При этом для разных продуктов профиль летучих соединений может быть различен, что, вероятно, связано с их различным углеводно-белково-жировым составом.

Установлено, что при хранении продуктов мясного происхождения, в частности в говядине, происходит как изменение профиля летучих соединений в целом, так и изменение ключевых классов соединений, которые могут служить индикаторами порчи продукта.

Таким образом, при планировании радиационной обработки охлажденной мясной и рыбной продукции необходимо и важно проводить исследования по оценке влияния как физико-технических параметров обработки, так и учета влияния биохимических процессов, происходящих при хранении, с целью сохранения питательной ценности и безопасности продукции для потребителя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Font-i-Furnols M., Guerrero L. Consumer Preference, Behavior and Perception about Meat and Meat Products: An Overview // *Meat Science*. 2014. Vol. 98. PP. 361-371.
2. Estimating the burden of foodborne diseases, WHO, Geneva, Switzerland. Retrieved from: <https://www.who.int/activities/estimating-the-burden-of-foodborne-diseases>.
3. Food irradiation. Requirements for the development, validation and routine control of the process of irradiation using ionizing radiation for the treatment of food, ISO/TC 34 Food products, ICS: 67.020 Processes in the food industry, Geneva, Switzerland. 2004. PP. 7-39.
4. 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.
5. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 26-28 сентября 2018 г. / Под ред. Санжарова Н.И. [и др.]. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. 356 с.
6. Jayathilakan K., Sultana K., Pandey M.C. Radiation Processing: An Emerging Preservation Technique for Meat and Meat Products // *Defence Life Science Journal*. 2017. Vol. 2. № 2. PP. 133-141.
7. Indiarto R., Irawan A.N., Subroto E. Meat Irradiation: A Comprehensive Review of Its Impact on Food Quality and Safety // *Foods*. 2023. Vol. 12. P. 1845.
8. Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / U. Bliznyuk, V. Avdyukhina, P. Borshchegovskaya [et al.] // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 750. DOI: 10.1038/s41598-021-04733-3.
9. Effects of e-beam irradiation on amino acids, fatty acids, and volatiles of smoked duck meat during storage / Y. Jo, K.A. An, M.S. Arshad, J.H. Kwon // *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2018. Vol. 47. PP. 101-109.
10. Bleicher J., Ebner E.E., Bak K.H. Formation and Analysis of Volatile and Odor Compounds in Meat—A Review // *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 6703.

INFLUENCE OF MEAT AND FISH RADIATION PROCESSING ON THE CONTENT OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS

Ipatova V.S.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Bolotnik T.A.³, Nikitchenko A.D.², Rodin I.A.^{3,4}, Khmelevsky O.Yu.², Chernyaev A.P.^{1,2}, Yurov D.C.¹

¹ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Chemistry), Leninskie Gory 1, bld. 3, Moscow, Russian Federation, 119991

⁴ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Trubetskaya st. 8, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991
e-mail: ^a ipatova.vs15@physics.msu.ru

The content of volatile organic compounds in chilled beef, turkey and salmon after 1 MeV electron irradiation in the dose range from 0.1 kGy to 10 kGy was studied. Various compounds were identified in all product samples, which may be due to the different macromolecules content in the products. A mechanism for changing the concentration of volatile compounds in irradiated meat and fish due to competing processes of radiation-induced decay and accumulation due to the decay of other organic molecules is proposed. A non-linear dependence of the compounds concentration on both the irradiation dose and the storage time was established based on the results of monitoring volatile organic compounds in

irradiated beef samples during 5 days of storage. In both the control and irradiated beef samples, a number of substances, such as alkanes, were absent during the first two days of storage. However, their concentration increased during further storage, which can serve as an indicator of spoilage processes of this type of product.

Keywords: *radiation processing, accelerated electrons, beef, salmon, turkey, volatile organic compounds, gas chromatography-mass spectrometry*

УДК 539.1.04

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАРИЯ GEANT4 DNA В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ БИООБЪЕКТОВ И МАТЕРИАЛОВ

Кречетов Н.Д.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Золотов С.А.^{1,2}, Соколов С.А.¹, Студеникин Ф.Р.^{1,2}, Черняев А.П.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

e-mail: ^а krechetov.nd20@physics.msu.ru

Показана перспективность использования Geant4 DNA для построения и апробации моделей радиобиологических процессов в облучаемых объектах.

Keywords: *радиационные технологии, компьютерное моделирование, geant4, радиационная обработка биообъектов и материалов*

Радиационная обработка является удобной и универсальной технологией для обработки различных биологических объектов и материалов. Возможности ее применения весьма разнообразны – от стерилизации изделий медицинского назначения, очистки сточных вод и полного подавления патогенной микрофлоры в пищевой продукции до радиационной модификации полимеров и окрашивания минералов [1-7]. При этом технология является экологически чистой, и ее безопасность подтверждена многолетними международными исследованиями [8].

В ходе радиационной обработки биологических объектов и материалов происходит ионизация и возбуждение атомов среды, разрываются химические связи в макромолекулах и возникают продукты радиолитического разложения, которые далее инициируют химические реакции и образование свободных радикалов [9, 10]. Доза облучения, переданная объекту, определяет количество взаимодействий излучения с молекулами среды, а следовательно, количество химических реакций и общий эффект радиационной обработки.

Теоретическое предсказание эффекта воздействия излучения на биологические объекты и

привязка его к дозе является нетривиальной задачей ввиду чрезвычайно сложности исследуемых систем. Альтернативой выступает компьютерное моделирование радиационной обработки. В 2008 году инструмент Geant4 [11-13], имеющий в своей основе метод Монте-Карло, был расширен модулем Geant4 DNA [14], позволяющим моделировать взаимодействие ионизирующего излучения с отдельными молекулами, входящими в состав клеток биологических тканей, а также рассчитывать радиационно-химический выход реакции радиолитического разложения воды и моделировать химические повреждения молекул ДНК [15, 16]. В качестве демонстрации возможностей инструментария на рисунке 1 представлена геометрия молекулы гемоглобина, смоделированная в Geant4 с использованием модуля Geant4 DNA. Для оценки эффекта радиационной обработки молекула облучалась электронами с энергией от 0,1 кэВ до 1000 кэВ. В ходе виртуального эксперимента фиксировалась энергия, поглощаемая молекулой в ходе взаимодействия, происходящих в ее объеме. По накопленным данным была построена гистограмма частотности событий, представленная на рисунке 2.

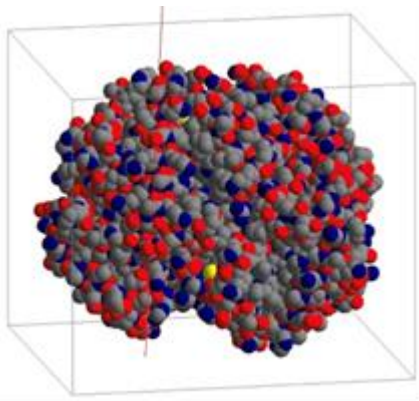


Рисунок 1. Молекула гемоглобина, смоделированная в Geant4. Цветами выделены атомы: Водород (H) – белая сфера, Углерод (C) – серая сфера, Кислород (O) – красная сфера, Азот (N) – темно-синяя сфера, Сера (S) – желтая сфера, Фосфор (P) – оранжевая сфера

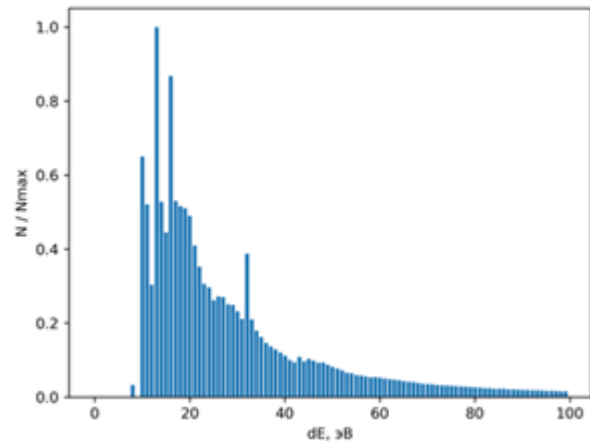


Рисунок 2. Зависимость частоты событий от энергии, поглощаемой молекулой в ходе взаимодействия

Располагая информацией об энергиях химических связей внутри молекулы, представляется возможным предсказание соединений, образующихся вследствие облучения гемоглобина.

Проведенный анализ показывает перспективным использование Geant4 DNA для построения и апробации моделей радиобиологических процессов в облучаемых объектах. Встроенный в Geant4 DNA функционал позволяет строить модели биологических молекул по данным RSCB PDB [17], который содержит трехмерные структуры более 100 тысяч биологических молекул. Стандартные средства инструментария предоставляют пользователю доступ к полной информации о каждом взаимодействии, произошедшем в объеме молекулы. Все это вместе делает Geant4 чрезвычайно удобным для изучения радиондуцированных изменений в биологических клетках и тканях.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы

1. Trends in Radiation Sterilization of Health Care Products. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008. 261 P.
2. Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review / T. Abou Elmaaty, S. Okubayashi, H. Elsisí, S. Abouelenin // Journal of Polymer Research. 2022. Vol. 29. P. 117. DOI: 10.1007/s10965-022-02952-4.
3. Degradation by Electron Beam Irradiation of Some Composites Based on Natural Rubber Reinforced

with Mineral and Organic Fillers / E. Manaila [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23(13). Article 6925. DOI: 10.3390/ijms23136925.

4. Working Material Produced by the International Atomic Energy Agency. In: Radiation Effects on Polymer Materials Commonly Used in Medical Devices. Report of the 1st RCM for CRP F2303; 15-19 November 2021. Vienna, Austria, 2021. 170 p.

5. Electron Beam Irradiation to Control Rhizoctonia solani in Potato / N. Chulikova, A. Malyuga, P. Borshchegovskaya [et al.] // Agriculture. 2023. Vol. 13. Article 1221. DOI: 10.3390/agriculture13061221.

6. Effect of electron and X-ray irradiation on microbiological and chemical parameters of chilled turkey / U. Bliznyuk, V. Avdyukhina, P. Borshchegovskaya [et al.] // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article 750. DOI: 10.1038/s41598-021-04733-3.

7. Irradiation of wastewater with electron beam is a key to sustainable smart/green cities: a review / K. Hossain [et al.] // Applied Water Science. 2018. Vol. 8(1). PP. 1-11. DOI: 10.1007/s13201-018-0645-6.

8. Ковалев В.П. Вторичное излучение ускорителей электронов. М.: Атомиздат, 1979. 198 с.

9. Дозиметрический контроль при проведении радиационной обработки пищевых продуктов / А.Н. Павлов, Н.И. Санжарова, А.П. Черняев [и др.] // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13. № 4. С. 40-50. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-4-40-50>.

10. ГОСТ Р ИСО 11137-3-2008. Стерилизация медицинской продукции. Радиационная стерилизация. Часть 3: Руководство по вопросам дозиметрии (ISO 11137-3-2006. Sterilization of health care products

Radiation. Part 3: Guidance on dosimetric aspects). M.: Стандартинформ, 2009. 15 с.

11. Recent Developments in Geant4 / *J. Allison [et al.]* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. Vol. 835. PP. 186-225.

12. Geant4 Developments and Applications / *J. Allison [et al.]* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. Vol. 53. PP. 270-278.

13. Geant4 – A Simulation Toolkit / *S. Agostinelli [et al.]* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 506. PP. 250-303.

14. The Geant4-DNA Project / *S. Incerti, G. Baldacchino, M. Bernal [et al.]* // International Journal of

Modeling, Simulation, and Scientific Computing. 2010. Vol. 01(02). PP. 157-178.

15. Geant4-DNA simulation of the pre-chemical stage of water radiolysis and its impact on initial radiochemical yields / *W.G. Shin, J. Ramos-Mendez, N.H. Tran [et al.]* // Physica Medica. 2021. Vol. 88. PP. 86-90.

16. Independent reaction times method in Geant4-DNA: Implementation and performance / *Ramos-Méndez, W. Shin, M. Karamitros [et al.]* // Medical Physics. 2020. Vol. 47(11). PP. 5919-5930.

17. The Protein Data Bank / *H.M. Berman [et al.]* // Nucleic Acids Research. 2020. Vol. 28. PP. 235-242. <https://doi.org/10.1093/nar/28.1.235>.

ANALYSIS OF POSSIBILITIES OF USING GEANT4 DNA TOOLKIT IN STUDIES OF RADIATION TREATMENT OF BIO-OBJECTS AND MATERIALS

Krechetov N.D.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchovskaya P.Yu.^{1,2}, Zolotov S.A.^{1,2}, Sokolov S.A.¹, Studenikin F.R.^{1,2}, Chernyaev A.P.^{1,2}

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

e-mail: ^a krechetov.nd20@physics.msu.ru

The prospects of using Geant4 DNA for constructing and testing models of radiobiological processes in irradiated objects are shown.

Keywords: radiation technologies, computer modeling, geant4, radiation treatment of bio-objects and materials

Radiation processing is a versatile technology for treating various biological entities and materials, offering applications from medical product sterilization to water purification and microbial control in food. During radiation treatment, atom ionization and excitation occur, breaking chemical bonds and generating radiolysis

products that initiate chemical reactions; Geant4 DNA computational modeling enables understanding and predicting the effects of ionizing radiation on biological molecules, aiding in studying radiobiological processes and alterations in biological cells and tissues.

УДК: 621.039.83

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ВИДОВ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

Кривоногова А.С.^{1,a}, Соковнин С.Ю.^{2,б}, Исаева А.Г.^{3,в}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 620142, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112а, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный аграрный университет», 620000, г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, д. 42, Российская Федерация

e-mail: ^a info@urfanic.ru, ^б admin@iep.uran.ru, ^в rector.urgau@yandex.ru

Преимуществом облучения ускоренными электронами является поверхностное действие, не затрагивающее глубоких слоев продукта. Однако применение этого метода для снижения микробной нагрузки в товарной продукции птицеводства имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для повышения эффективности обработки. Основные из них: неравномерность распределения дозы и наличие свободной жидкости в товарных упаковках с мясной продукцией.

Ключевые слова: *поверхностная радиационная обработка, продукция птицеводства, куриное яйцо, мясо, субпродукты, меланж, микрофлора*

Исследования радиационной обработки отдельных видов продуктов животного происхождения показывают, что действие ионизирующего излучения при «холодной» пастеризации не приводит к снижению качества и nutritивной ценности мяса, яйца, рыбы, морепродуктов [1, 6]. Однако при радиационной обработке куриного мяса и фарша имеют место изменения микроструктуры и биохимии облученных образцов, так как поглощенная доза (ПД), требуемая для полного уничтожения микрофлоры, существенно выше [3, 5]. Различная радиочувствительность бактерий и неравномерность распределения поглощенной дозы так же приводят к неоднозначным результатам. В связи с этим требуются изучение особенностей и поиск оптимальных способов радиационной обработки для каждого вида товарной продукции птицеводства.

Мы исследовали возможность применения наносекундных импульсов ускоренных электронов для обеззараживания куриного мяса, охлажденных куриных субпродуктов, яичного меланжа и пищевого яйца. Облучение проводили на базе ИЭФ УрО РАН на импульсно-периодическом наносекундном ускорителе УРТ-0,5 (длительность импульса 50 нс, энергия электронов 500 кЭв). Изучали радиочувствительность типовой микрофлоры *in vitro*, родовидовой состав и динамику бактериальной обсемененности образцов при различных параметрах воздействия, исследовали показатели качества мяса, субпродуктов, яйца после облучения, анализировали содержание аминокислот, витаминов, морфологические и технологические показатели. Работы были выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-16-04038). Целью исследований был поиск оптимальных способов поверхностной радиационной обработки товарных продуктов птицеводства, обеспечивающий их биологическую безопасность при сохранении качества.

Одним из значимых патогенов в птицеводстве является *Salmonella* spp. Нахождение этих бактерий в мясе, яйце, субпродуктах не допускается. Проведенные нами исследования с культурами *Salmonella enterica* (*S. gallinarum*, *S. enteritidis* и *S. typhimurium*) показали дозозависимый эффект угнетения роста от 0,5 до 5,5 кГр., при этом *S. typhimurium* оказались наиболее устойчивыми к облучению. Доза 5,5 кГр была достаточна для полного уничтожения сальмонелл. Тем не менее, нам представляется недостаточным ориентироваться на нее при радиационной обработке пищевых продуктов, так как среди микрофлоры мяса и яиц есть более радиорезистентные

бактерии, также способные нанести вред человеку. К таковым относятся многие условно-патогенные микроорганизмы: *S. aureus*, *S. epidermidis*, *Proteus* spp., *Enterobacter* spp., *Enterococcus* spp., *P. aeruginosa*, *E.coli*, *Klebsiella* spp., *Candida* spp. и др. Большинство из них не только могут колонизировать микробиоценозы животных и человека, но и являются носителями генов антимикробной резистентности, т.е. – активными компонентами резистома. Анализ выживаемости этих микроорганизмов при воздействии ускоренными электронами показал, что большинство грамотрицательных бактерий погибало при ПД до 3 кГр, *P. aeruginosa* – при 5 кГр. Наиболее устойчивыми к воздействию были бактерии родов *Staphylococcus* и *Enterococcus*, которые частично сохраняли жизнеспособность даже при ПД более 10 кГр, хоть и утрачивали при этом способность ферментировать отдельные сахара. Снижение обсемененности продуктов питания этими микроорганизмами не только позволит увеличить сроки хранения и предотвратить порчу, но также и снизит риск попадания агентов антимикробной резистентности к человеку.

Мы проводили экспериментальную поверхностную обработку ускоренными электронами пищевого куриного яйца в товарной пластиковой упаковке. Куриное яйцо в норме внутри является стерильным, поэтому для его обеззараживания достаточно устранения микрофлоры с поверхности скорлупы и из ее пор. Дозиметрический анализ показал, что при воздействии ускоренных электронов с энергией 0,5 мЭв и ПД 5 кГр на поверхность яйца, поглощенная доза тормозного излучения внутри него, под скорлупой, не превышает 8 сГр. [2]. Экспериментальное облучение упаковок с куриными яйцами равномерным по ширине импульсным электронным пучком показало, что ключевой проблемой в достижении нужного антимикробного эффекта была неравномерность распределения дозы. Была обнаружена сильно выраженная зависимость выживаемости бактерий от угла падения лучей на поверхность яйца. На поверхности скорлупы в местах, где поток электронов проходил по нормали, бактерии погибали при дозах 3-7 кГр, в то время как на боковых сторонах яйца, где луч проходил по касательной, жизнеспособные стафилококки и энтерококки выявляли и при ПД 30-40 кГр. И хотя при 40 кГр на поверхности скорлупы внутри яйца не возникало изменений основных химических и структурных свойств белка, желтка и оболочек, тем не менее, обработка товарных партий яйца такими высокими дозами представляется нежелательной, энергетически и экономически не выгодной. Для

достижения нужного эффекта при меньших поглощенных дозах (5-7 кГр) необходимо было равномерное облучение упаковок со всех сторон. Эта проблема была решена внесением изменений в конструкцию установки и процесс обработки [4].

Изучали возможность облучения импульсами ускоренных электронов куриного филе и субпродуктов – печени, сердец в товарной упаковке. Удалось достичь снижения микробной нагрузки на 30-50 % при облучении образцов филе с поглощенной дозой в диапазоне 10-15 кГр. При обработке печени микрофлора в поверхностных слоях (1-2 мм) полностью погибала при 36 кГр. Но жидкость на дне подложек оставалась сильно загрязненной и содержала до 10^6 микробных клеток в мл даже при воздействии высоких доз. Схожая картина была получена при поверхностном облучении куриных сердец на подложках. В целом, использование ускоренных электронов для снижения микробной обсемененности поверхности охлажденного куриного мяса и субпродуктов было малоэффективно при поглощенных дозах ниже 30 кГр. Кроме того, если в товарной упаковке имелась свободно перемещающаяся жидкость, очень быстро происходила реконтаминация обеззараженных участков поверхности.

Эффективность обеззараживания жидких сред ускоренными электронами зависела не только от исходной обсемененности, энергии, величины поглощенной дозы и толщины слоя, но и от характера самой жидкости. Так, обнаружили, что при облучении моечной воды и технологической жидкости для охлаждения тушек диапазоны ингибирующих и стерилизующих доз были в 2-3 раза ниже, чем для яичного меланжа.

Перечисленные особенности не говорят о малой эффективности ускоренных электронов в обеззараживании продуктов птицеводства. Преимуществом этого метода является поверхностное действие, не

затрагивающее глубоких слоев продукта. И решение проблем равномерного распределения поглощенной дозы при облучении яиц, удаления лишней жидкости из упаковок с куриным мясом, а также подбора оптимальных параметров при обработке жидких продуктов позволит в полной мере реализовать потенциал и достоинства радиационной обработки ускоренными электронами в промышленном птицеводстве.

Список литературы

1. Development of shelf-stable, ready-to-eat (RTE) shrimps (*Penaeus indicus*) using γ -radiation as one of the hurdles / S.R. Kanatt, S.P. Chawla, R. Chander [et al.] // LWT-food science and technology. 2006. Vol. 39. № 6. PP. 621-626.
2. The use of nanosecond electron beam for the eggs surface disinfection in industrial poultry / S.Y. Sokovnin, I.M. Donnik, A.S. Krivonogova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115. P. 022034. DOI 10.1088/1742-6596/1115/2/022034.
3. Yoon K.S. Effect of gamma irradiation on the texture and microstructure of chicken breast meat // Meat science. 2003. Vol. 63. № 2. PP. 273-277.
4. Недорезов М.Н., Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. Поверхностный стерилизатор яйца на основе ускорителя УРТ05-М // Физика. Технологии. Инновации (ФТИ-2019). Екатеринбург, 2019. С. 212-216.
5. Радиационная обработка мясных продуктов. За и против / А.А. Семенова, М.А. Асланова, А.С. Дыдыкин [и др.] // Мясная индустрия. 2020. № 7. С. 14-17. DOI 10.37861/2618-8252-2020-7-14-17.
6. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности / Г.В. Козьмин, Н.И. Санжарова, И.И. Кибина [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 5. С. 87-92.

APPLICATION FEATURES OF ACCELERATED ELECTRONS FOR DIFFERENT TYPES OF FOOD PRODUCTS

Krivonogova A.S.^{1,a}, Sokovnin S.Yu.^{2,b}, Isaeva A.G.^{3,c}

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution "Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", Belinskogo st. 112a, Ekaterinburg, Russian Federation, 620142

² Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen st. 106, Ekaterinburg, Russian Federation, 620016

³ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ural State Agrarian University", K. Liebknechta st.42, Ekaterinburg, Russian Federation, 620000

e-mail: ^a info@urfanic.ru, ^b admin@iep.uran.ru, ^c rector.urgau@yandex.ru

The advantage of irradiation with accelerated electrons is the surface action, which does not affect the deep layers of the product. However, the use of this method to reduce microbial load in commercial poultry products has its own features, which should be taken into account to increase the effectiveness of treatment. The main ones are: uneven dose distribution and the presence of free liquid in commercial packages with meat products.

Keywords: surface radiation treatments, poultry products, chicken eggs, meat, by-products, melange, microflora

The possibility of using nanosecond pulses of accelerated electrons with the energy of 500 keV for disinfection of chicken meat, chilled chicken by-products, egg melange and food eggs was investigated. The dynamics of bacterial contamination of samples at different irradiation parameters, quality indicators of meat, by-products, eggs after irradiation were studied. The work was supported by the Russian Science Foundation (№ 16-16-04038). Our studies with *Salmonella enterica* cultures showed a dose-dependent effect of growth inhibition at irradiation doses from 0.5 to 5.5 kGy. The most resistant to irradiation was *S. typhimurium*. Analysis of survival of bacteria of genera *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Proteus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas* and *Escherichia* showed that the majority of Gram-negative bacteria died at doses up to 3 kGy, *P. aeruginosa* – at 5 kGy, *Staphylococcus* and *Enterococcus* – at doses over 10 kGy.

Experimental irradiation of hen's eggs in commercial plastic packaging revealed a strong dependence of bacterial survival on the angle of incidence of rays on the egg surface. The absorbed sterilizing doses on the shell surface differed by a factor of 6-10. To achieve the desired inhibitory effect at absorbed doses of 5-7 kGy, uniform irradiation of the packages from all sides was required.

The possibility of irradiation with accelerated electron pulses of chicken fillets and by-products - liver, hearts in commercial packaging was studied. The reduction of microbial load by 30-50 % was achieved when irradiating fillet samples with absorbed dose in the range of 10-15 kGy. When liver was treated, microflora in surface layers (1-2 mm) was completely killed at 36 kGy. But the liquid at the bottom of the substrates contained up to 106 microbial cells per ml even when exposed to high doses. Recontamination of the decontaminated surface areas occurred very quickly when the liquid was moved.

The effectiveness of electron irradiation of liquid media depended not only on the initial infestation, energy, absorbed dose and layer thickness, but also on the nature of the liquid itself. When irradiating washing water and process liquid for carcass cooling, the ranges of inhibitory and sterilizing doses were 2-3 times lower than for egg melange.

Solution of the problems of uniform distribution of absorbed dose at irradiation of eggs, removal of excess liquid from packages with chicken meat, and also selection of optimum parameters at treatment of liquid products will allow to realize in full measure the potential and advantages of radiation treatment by accelerated electrons in industrial poultry farming.

УДК 539.1.04:631.52

СЕЛЕКЦИЯ МУТАНТНЫХ ФОРМ СОРТОВ РИСА, УСТОЙЧИВЫХ К СТРЕССОВЫМ ФАКТОРАМ, ПОСРЕДСТВОМ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Кругляк А.И.^{1,а}, Алексеёнок Ю.В.¹, Бакирулы К.Б.², Жалбыров А.Е.², Аппазов Н.О.³, Дорошкевич А.С.¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, Российская Федерация

² Товарищество с ограниченной ответственностью «Казахский научно-исследовательский институт рисоводства им. И. Жахаева», 120008, г. Кызылорда, пр. Абая, 25Б, Республика Казахстан

³ Некоммерческое акционерное общество «Кызылординский университет имени Коркыт Ата», 120014, г. Кызылорда, ул. Айтеке би, д. 29А, Республика Казахстан

e-mail: ^а Anastasiya.Kruglyak@nfjinr.ru

Использование радиационно-индуцированного мутагенеза позволяет комплексно решать проблемы засухи и засоления почв, а также возрастания спроса на продукцию, помогая выводить сорта растений с необходимыми свойствами. В результате облучения семян риса быстрыми нейтронами с энергией до 4,1 МэВ (ЭГ-5, ОИЯИ, Дубна, Россия) впервые получены мутантные формы сортов риса «Сыр Сулуы», «Лидер» и «Айкерим», отличающиеся устойчивостью к засолению, засухе и обоим стрессовым факторам одновременно. Полученные растения будут использованы в качестве исходных форм в синтетической селекции при создании сортов с агрономически важными свойствами.

Ключевые слова: радиационно-индуцированный мутагенез, рис, нейтронное воздействие, засухоустойчивость, селекция риса

Рис (*Oryza sativa* L.) является важным продуктом питания для большей части мирового населения [1], а также универсальным модельным объектом для злаковых культур, ввиду простоты своего генома [2].

В последние годы для создания новых культур риса в разных странах мира все чаще используют метод индуцированного мутагенеза [3].

Нейтроны в качестве мутагена способны выделять более высокую энергию по сравнению с γ -лучами, особенно в биологических материалах, поскольку они содержат элементы с легким атомным весом, в частности водород [4]. Таким образом, использование нейтронного облучения приводит к различному спектру мутаций по сравнению с другими видами мутагенов.

Облучение семян риса быстрыми нейтронами произведено на ускорителе ЭГ-5 (ОИЯИ, Дубна, Россия). После радиационного воздействия семена выращивали на экспериментальном участке ТОО «Казахский НИИ растениеводства им. И. Жахаева» в республике Казахстан.

В результате установлены соответствующие средние летальные дозы (LD_{50}).

Показано, что наибольшее количество мутантных форм способен продуцировать сорт «Сыр Сулуы». Большинство растений этого сорта отличаются низкорослостью и карликовостью (< 80 см), короткостью и высокой пустозерностью метелок, что указывает на то, что они являются мутантными формами, проявляющими устойчивость к стрессовым факторам (NaCl, сорбит). Эти растения будут использованы в качестве

исходных форм в синтетической селекции при создании сортов с необходимыми свойствами.

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 Belarus-JINR Program № 308 items № 21, 22; RO-JINR Program No. 366/2021 item 84, Serbia-JINR Program No. 373 2023 items 4 and 5, Vietnam-the International Center of Physics at the Institute of Physics Grant ICP.2022.04.

Список литературы

1. Abscisic acid and abiotic stress tolerance – different tiers of regulation / R. Mehrotra, P. Bhalothia, P. Bansal [et al.] // J. Plant Physiol. 2014. Vol. 171. PP. 486-496.
2. Mutagenesis in Rice: The Basis for Breeding a New Super Plant / V.E. Viana [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01326>
3. Mutation of Cellulose Synthase Gene Improves the Nutritive Value of Rice Straw / S. Yanjing [et al.] // Asian-Australas J. Anim. Sci. 2012. Vol. 6. PP. 800-805.
4. Thermal neutron as a potential mutagen for induced plant mutation breeding: radiosensitivity response on wheat and rice / S.T. Kadam, G. Vishwakarma, Y. Kashyap [et al.] // Genet Resour Crop Evol. 2023. Vol. 70. PP. 789-798.

BREEDING MUTANT FORMS OF RICE VARIETIES RESISTANT TO STRESS FACTORS BY FAST NEUTRON IRRADIATION

Kruglyak A.I.^{1,a}, Aleksiayenak Y.V.¹, Bakiruly K.B.², Zhalbyrov A.E.², Appazov N.O.³, Doroshkevich A.S.¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie st. 6, Dubna, Moscow region, Russian Federation, 141980

²Kazakh Scientific Research Institute of Rice Growing named after I. Zhakhaev, Abai ave. 25B, Kyzylorda, Republic of Kazakhstan, 120008

³Non-profit limited company «Kozkyt Ata Kyzylorda University, Aiteke bi st. 29A, Kyzylorda, Republic of Kazakhstan, 120014
e-mail: ^aAnastasiya.Kruglyak@nfj.jinr.ru

The use of radiation-induced mutagenesis makes it possible to address the problems of drought and salinization of soils, as well as an increased demand for products, helping to breed plant varieties with the necessary properties. As a result of irradiation of rice seeds with fast neutrons with energies up to 4.1 MeV (EG-5, JINR, Dubna, Russia), mutant forms of rice varieties Aikerim, Leader and Syr Suluy were obtained. They are resistant to salinity, drought and both stress factors at the same time. The obtained plants will be used as initial forms in synthetic breeding to create varieties with agronomically important properties.

Keywords: radiation-induced mutagenesis, rice, neutron irradiation, drought resistance, rice breeding

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИНКУБАЦИОННОГО ЯЙЦА ОБЛУЧЕНИЕМ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Кривоногова А.С.^{1,а}, Вазиров Р.А.^{2,б}, Логинов Е.А.^{1,а}

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 620142, г. Екатеринбург, ул. Белинского, д. 112а, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, Российская Федерация
e-mail: ^а info@urfanic.ru, ^б ruslan.vazirov@urfu.ru

Дезинфекция инкубационных яиц является важной задачей в промышленном птицеводстве. Поверхностная радиационная обработка инкубационного яйца может стать эффективным методом обеззараживания, который позволяет уничтожить условно-патогенные бактерии на скорлупе, не затрагивая внутренних структур яйца и зародыша.

Ключевые слова: *поверхностная радиационная обработка, дезинфекция, инкубационное яйцо, микрофлора, цыплята-бройлеры*

Микрофлора, с которой контактирует цыпленок после вывода из яйца, оказывает существенное влияние на его здоровье и в дальнейшем на качество продукции. Особенно актуальной эта проблема стала в последние десятилетия из-за распространения антимикробной резистентности в микробиомах сельскохозяйственной птицы. В настоящее время широко применяются химические методы дезинфекции (формалином, хлорамином, озоном и др.) [2]. Однако они имеют ряд недостатков, один из которых – токсичность для человека и животных. Радиационная обработка ускоренными электронами может стать альтернативой химической дезинфекции, так как позволяет стерилизовать поверхность скорлупы, не вызывая радиобиологического повреждения внутренних структур яйца из-за малой величины доз тормозного излучения [1].

Исследовали возможность дезинфекции инкубационных яиц бройлеров с помощью поверхностной радиационной обработки импульсами ускоренных электронов. Экспериментальные работы проводили на базе Института электрофизики УрО РАН совместно с коллективом группы электрофизических технологий под руководством С.Ю. Соковнина. Суточные яйца облучали на установке УРТ-0,5 (энергия электронов до 500 кэВ, длительность импульса 50 нс) [3]. Поглощенная доза на поверхности скорлупы составляла 40кГр, что в несколько раз превышало рекомендованную, однако позволяло выявить радиобиологические эффекты в случае их развития [1, 4]. После облучения яйца инкубировали по технологии, используемой в промышленном птицеводстве, определяли показатели вывода яиц, анализировали состояние здоровья, биохимические, иммунологические и гематологические показатели крови цыплят-бройлеров на протяжении срока выращивания, после убоя проводили патологоанатомическое

исследование. Работы были выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №1 6-16-04038).

При овоскопии обнаружили незначительные различия в структуре скорлупы: среди облученных яиц точки и палочки на скорлупе встречались на 30 % чаще. Анализ внутренней структуры яйца, белка, желтка, воздушной камеры, а также динамики развития зародышей не выявил статистически значимых различий между опытной и контрольной группами, все изменения находились в рамках естественных индивидуальных вариаций нормального развития. Выборочное патологоанатомическое исследование яиц опытной группы не выявило радиационных повреждений зародышей, каких-либо последствий радиобиологических эффектов облучения в первые сутки. Показатели вывода облученных электронами и необлученных яиц были одинаковыми, за исключением периода вывода – в опытной группе он был короче на 4 часа, чем в контрольной. Цыплята, полученные из яиц, обработанных ускоренными электронами, проявляли более высокую активность, лучше поедали корм в течение всего периода выращивания. При анализе биохимических, иммунологических и гематологических показателей крови у цыплят контрольной группы чаще выявляли признаки воспалительных процессов, повышение концентрации глобулинов, сниженный уровень гемоглобина. Только у 16 % цыплят, полученных из необлученных яиц, данные показатели были в пределах референсных значений, в то время как в опытной группе – у 97 % цыплят. При патологоанатомическом исследовании выявили признаки хронического воспалительного процесса у 86 % цыплят в контрольной группе и у 4 % – в опытной. Предположительно, это связано с обсеменением цыплят патогенной микрофлорой с поверхности скорлупы в процессе вывода. Это приводило к нарушению соотношения нормальной и патогенной

микрофлоры и снижению защитных функций, а впоследствии, к развитию хронического воспалительного процесса у цыплят. В опытной группе, где поверхность яйца была стерилизована ускоренными электронами, не происходило контаминации цыплят патогенными и условно-патогенными бактериями со скорлупы. При патологоанатомическом, гистологическом, биохимическом исследованиях цыплят опытной группы признаков радиационного повреждения не обнаружили.

Полученные результаты позволяют считать метод поверхностной обработки ускоренными электронами перспективным для обеззараживания инкубационного яйца в промышленном птицеводстве.

Список литературы

1. Properties of hens' eggs after surface irradiation by nanosecond electron beam / S.Y. Sokovnin, M.E. Balezin, R.A. Vazirov [et al.] // Radiation Physics and

Chemistry. 2019. Vol. 165. P. 108398. DOI 10.1016/j.radphyschem.2019.108398.

2. Волошин А., Донсков А., Черных С. Перспективы внедрения аэроозонных технологий для дезинфекции инкубационных яиц / Наука и современность: Сборник статей международной научно-практической конференции. Уфа: РИО МЦИИ «ОМЕГА САЙНС», 2014. С. 32-35.

3. Недорезов М.Н., Соковнин С.Ю., Бalezin М.Е. Поверхностный стерилизатор яйца на основе ускорителя УРТ05-М // Физика. Технологии. Инновации (ФТИ-2019). Екатеринбург, 2019. С. 212-216.

4. Перова Н.В., Тенишев В.П. Обеспечение безопасности пищевой и сельскохозяйственной продукции при обработке ионизирующим излучением // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы. Обнинск, 2018. С. 169-172.

IMPROVEMENT OF HATCHING EGG QUALITY BY ACCELERATED ELECTRON IRRADIATION

Krivosnogova A.S.^{1,a}, Vazirov R.A.^{2,b}, Loginov E.A.^{1,a}

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution "Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", Belinskogo st. 112a, Ekaterinburg, Russian Federation, 620142

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin», Mira st. 19, Ekaterinburg, Russian Federation, 620002

e-mail: ^a info@urfanic.ru, ^b ruslan.vazirov@urfu.ru

Disinfection of hatching eggs is an important task in industrial poultry production. Surface radiation treatment of hatching eggs can be an effective method of disinfection, which allows the destruction of opportunistic bacteria on the shell without affecting the internal structures of the egg and embryo.

Keywords: surface radiation treatment, disinfection, hatching egg, microflora, broiler chickens

The possibility of disinfection of broiler hatching eggs using radiation treatment with pulses of accelerated electrons was investigated. For this purpose daily eggs were irradiated on the URT-0,5 (electron energy up to 500 keV, pulse duration 50 ns, absorbed dose on the shell surface was 40kGy. After irradiation, eggs were incubated according to the technology used in industrial poultry farming, egg hatch rates were determined, health, biochemical, immunological and hematological blood parameters of broiler chickens were analyzed during the growing period, and after slaughtering a pathological and anatomical study was carried out.

Analysis of the internal structure of the egg - albumen, yolk, air chamber, as well as the dynamics of embryo development did not reveal statistically significant differences between the experimental and control groups, all changes were within the natural individual variations of normal development. Selective

pathological examination of eggs of the experimental group did not reveal radiation damage of embryos, any consequences of radiobiological effects of irradiation in the first day. Hatching rates of electron-irradiated and non-irradiated eggs were similar, except for the hatching period, which was 4 hours shorter in the experimental group than in the control group. Chickens obtained from eggs treated with accelerated electrons were more active and ate feed better during the whole rearing period. Only 16 % of chickens obtained from non-irradiated eggs had biochemical, immunological and hematological parameters within the normal range, and most chickens showed signs of inflammatory process. In the experimental group, 97 % of chickens were normal. Pathological examination revealed signs of chronic inflammatory process in 86 % of chickens in the control group and 4 % in the experimental group. Presumably, this is due to contamination of chickens with pathogenic microflora on the shell

surface during hatching, which subsequently led to the development of chronic inflammatory process in chickens. In the experimental group, where the egg surface was sterilized by accelerated electrons, there was no

contamination of chickens with pathogenic and opportunistic bacteria, so the frequency of inflammatory processes was much lower.

УДК 543.429.22:577.334

ЭПР-СПЕКТРОМЕТРИЯ СЕМЯН ПШЕНИЦЫ, ОБЛУЧЕННЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Меджидов И.М.^а, Лой Н.Н., Басырова Д.В., Петрухина Д.И., Глуценко Н.В., Харламов В.А.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^а immedzhidov@mail.ru*

В данной работе изучена возможность применения спектрометрии на основе электронного парамагнитного резонанса для идентификации факта облучения семян пшеницы. Облучение семян пшеницы низкоэнергетическими электронами продуцирует образование свободных радикалов. Образцы были облучены в дозах от 1 до 5 кГр. Наблюдается увеличение интенсивности сигнала с увеличением дозы облучения. Полученное значение g-фактора свидетельствует о наличии углеродосодержащих радикалов.

Ключевые слова: ЭПР-спектрометрия, пшеница, свободные радикалы, ионизирующее излучение

Введение

Пищевая безопасность и контроль качества продукции является актуальной задачей в последние несколько десятилетий. Для достижения данной задачи активно используются процессы обработки ионизирующим излучением. Облучение пищевых продуктов – это процесс, в котором используется ионизирующее излучение для уничтожения бактерий, вирусов и других вредных микроорганизмов в пищевых продуктах. Этот процесс широко используется для повышения безопасности и срока годности пищевых продуктов, а также для предотвращения заболеваний пищевого происхождения, вызываемых патогенными микроорганизмами, такими как сальмонелла, кишечная палочка, листерия и т.д.

Актуальность облучения пищевых продуктов заключается в его способности снижать риск заболеваний пищевого происхождения и повышать качество и безопасность пищевых продуктов. По данным ВОЗ болезни пищевого происхождения ежегодно поражают миллионы людей во всем мире, вызывая такие симптомы, как диарея, рвота и лихорадка. В некоторых случаях эти заболевания могут быть тяжелыми и даже смертельными, особенно для уязвимых групп населения, таких как маленькие дети, беременные женщины и пожилые люди. Процесс облучения заключается в воздействии на пищу ионизирующим излучением, которое разрушает ДНК микроорганизмов и препятствует их размножению. Этот процесс также эффективен для уменьшения порчи и продления срока годности скоропортящихся продуктов, таких

как фрукты, овощи и мясо, которые часто перевозятся на большие расстояния и хранятся в течение длительного времени, прежде чем попасть к потребителям.

Несмотря на доказанные преимущества облучения пищевых продуктов, существуют некоторые опасения по поводу его использования. Поэтому необходимо строго соблюдать установленные МАГАТЭ правила по использованию ионизирующего облучения. Недооблучение может быть не таким эффективным, а повторное облучение и вовсе запрещено, т.к. это вызывает порчу продукции. Для контроля безопасности облучения, в частности дозы облучения, используют различные методы дозиметрии при обработке продукции. Но часто встречаются случаи, когда продукция уже была облучена, но никакой информации об этом нет. Как уже было сказано выше, повторное облучение продукции запрещено, поэтому очень важно знать была продукция облучена или нет.

Актуальным и самым чувствительным методом идентификации факта облучения является спектрометрия на основе электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). ЭПР-спектрометрия является мощным аналитическим методом, используемым для изучения поведения свободных радикалов в различных материалах, включая органические и неорганические соединения, металлы и биологические системы. Это неразрушающий метод, который использует высокочастотное электромагнитное поле для наблюдения резонанса неспаренных электронов в магнитном поле. А как мы знаем, при облучении пищевой

продукции образуются свободные радикалы. Поэтому, данный метод можно использовать для идентификации факта облучения пищевой продукции на основе свободных радикалов.

Исследования различных авторов подтверждают многогранность и возможность применения данной методики для различных видов пищевой продукции, в том числе злаковых культур [1-4]. Также наши предыдущие исследования показали возможность идентификации факта облучения и определения дозы облучения на следующих объектах: сушеное яблоко, черный перец, петрушка и укроп [5, 6].

Данный метод регламентируется множеством национальных (ГОСТ Р 52529-2006, ГОСТ 31652-2012 и т.д.) и Европейских (EN 1787:2000, EN 13708:2001 и т.д.) нормативных документов.

Цель данной работы заключалась в исследовании возможности применения ЭПР-спектроскопии для идентификации факта облучения семян пшеницы низкоэнергетическим электронным излучением.

Материалы и методы

Объектом исследования были семена яровой пшеницы сорта «Ирень». Семена были облучены на электронном ускорителе «Дуэт» (ИСЭ СО РАН, г. Томск) в дозах от 1 до 5 кГр. Необлученный образец использовался в качестве контроля. Энергия электронов составляла 120 кэВ. После облучения образцы хранили в полиэтиленовых пакетах при атмосферном давлении без доступа солнечного света.

ЭПР-спектры регистрировались спустя 21 день после облучения при помощи спектрометра ESR70-03 XD/2 (г. Минск, Беларусь) на микроволновой полосе X. Частота СВЧ составляла 9,4 ГГц. Образцы измельчали до фрагментов размерами не более 0,5 мм при помощи блендера фирмы «Kitfort» и ступки. Из каждого образца бралось по 50 мг исследуемого вещества и помещалось в специальную кварцевую пробирку (Ø: 4 мм), предназначенную для проведения спектроскопии. Пробирки с веществом опускали в полость с магнитным полем на уровне резонатора и регистрировали сигнал. Образцы исследовали в 3-кратной повторности.

g-фактор можно определить по следующей формуле:

$$h\nu = g\mu_B B, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; ν – СВЧ-частота X-диапазона; μ_B – магнетон Бора; B – выбранная точка магнитного поля (Тл).

В ЭПР-спектроскопии g-фактор является критическим параметром, который используется для определения спина электрона и характера изучаемого парамагнитного центра.

Параметры ЭПР-спектрометра во время регистрации были следующими:

- середина поля – 3350 Э;
- диапазон поля – 1000 Э;
- частота модуляции – 100 кГц;
- модуляция – 4 Э;
- мощность СВЧ – 50 мВт;
- коэффициент усиления – 50;
- время снятия спектра – 600 сек.

Результаты и обсуждения

Исследование проводили путем измерения интенсивности сигнала и последующим сравнением с дозой облучения. Интенсивность сигнала оценивали путем измерения амплитуды сигнала. Статистика и обработка данных проводилась при помощи программного обеспечения Microsoft Excel 2022 по t-критерию Стьюдента. Достоверность данных относительно контроля <0,05. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

Наблюдается увеличение интенсивности ЭПР-сигнала с увеличением дозы облучения, что, несомненно, является показателем возможности применения ЭПР-спектроскопии для идентификации факта облучения. Стоит отметить, что образовавшиеся в ходе облучения свободные радикалы имеют свойство распадаться со временем, поэтому, интенсивности сигналов образцов с дозой облучения 1, 2 и 3 кГр не сильно отличаются друг от друга. Также это объясняется наличием стабильных и короткоживущих радикалов. Чем выше доза облучения, тем больше стабильных радикалов образуется, которые в дальнейшем можно будет идентифицировать спустя большее время. В нашем случае прошел 21 день после процесса радиационной обработки и, тем не менее, имеется возможность определить факт облучения. Для определения дозы облучения необходимо иметь базу градуировочных данных и понимание, как влияет время на кинетику затухания интенсивности сигнала.

ЭПР-спектр необлученного образца в сравнении с образцом 5 кГр представлен на рисунке 2.

g-фактор в точке пересечения контура производной с нулевой линией равен 2,0041. Полученные данные свидетельствуют о наличии углеродосодержащих радикалов.

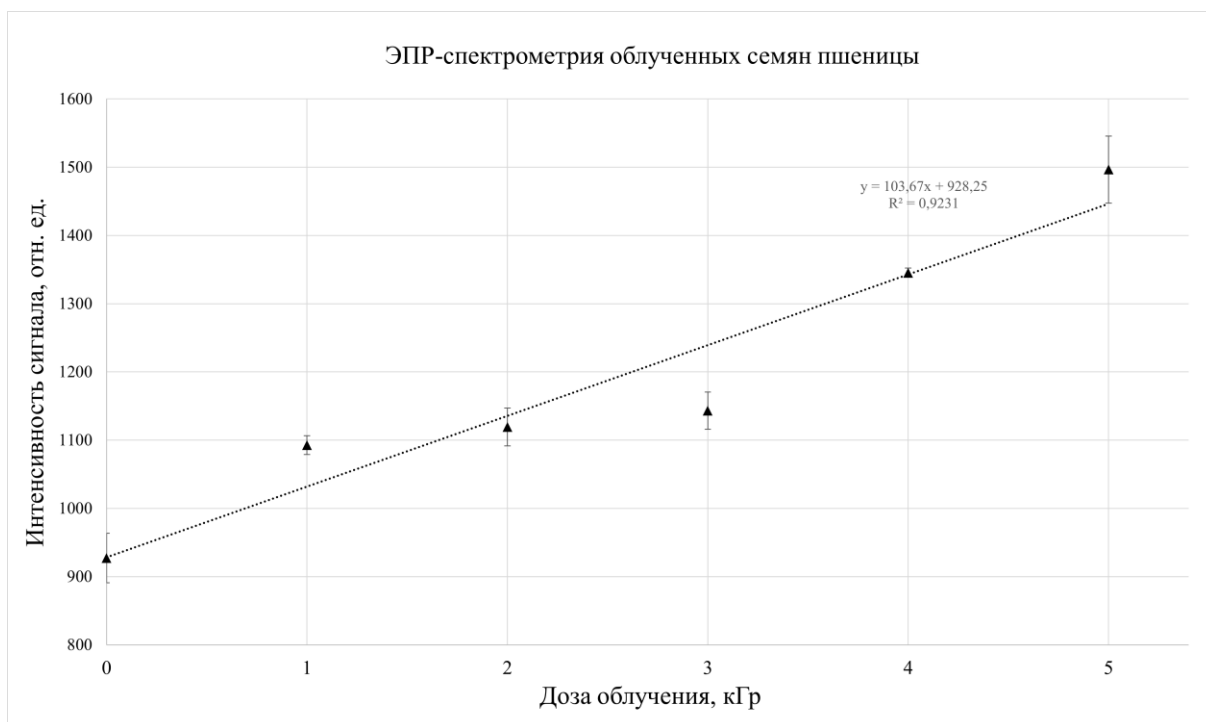


Рисунок 1. Зависимость интенсивности сигнала от дозы облучения

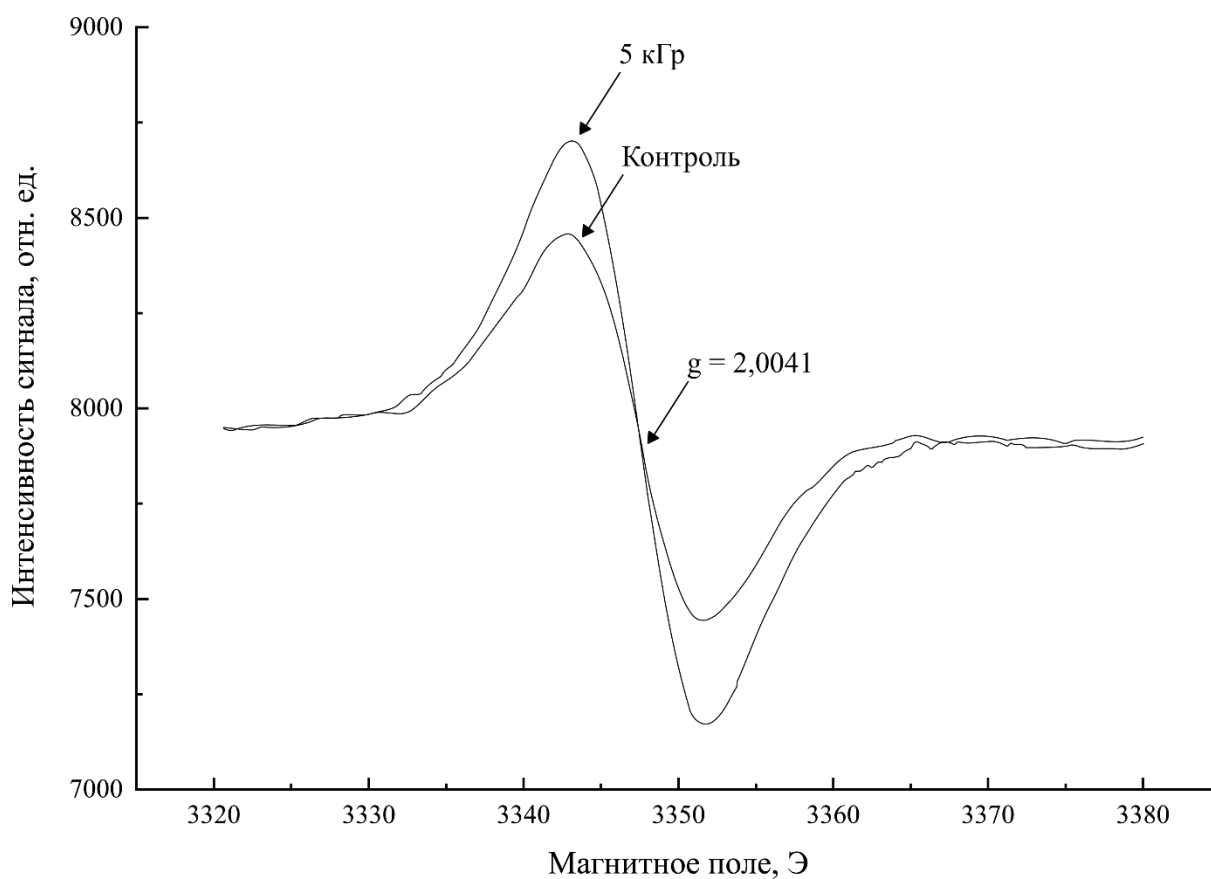


Рисунок 2. ЭПР-спектр образца с дозой 5 кГр в сравнении с контролем

Заклучение

В данной работе была проведена ЭПР-спектроскопия образцов семян пшеницы, облученных низкоэнергетическими электронами в дозе от 1 до 5 кГр. Полученные результаты свидетельствуют о возможности идентификации факта облучения семян пшеницы спустя 21 день после облучения. Полученное значение g-фактора свидетельствует о наличии углеродосодержащих радикалов. Для оценки дозы облучения необходимо иметь базу градуировочных данных. Немаловажным является исследование кинетики затухания сигнала, т.к. со временем свободные радикалы распадаются, и полученная информация может быть недостоверной.

Список литературы

1. D. Onderdelinden, L. Strackee. Identification of Irradiated Foodstuffs. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1974. 3. 127.

2. Electron spin resonance study of γ -irradiated Anatolian chickpea (*Cicer arietinum* L.) / Canan Ayda, B.IROL Engin, Mustafa Polat, Talat Aydin // Radiation Effects and

Defects in Solids. 2008. Vol. 163. № 1. PP. 7-17. DOI: 10.1080/10420150701688479.

3. EPR detection of free radicals in (I) coffee and (II) gamma-ray irradiated foodstuffs / G.J. Troup, J.R. Pilbrow, D.R. Hutton [et al.] // Int. J. Rad. Appl. Instrum. A. 1989. Vol. 40. PP. 1223-1226. doi:10.1016/0883-2889(89)90068-3.

4. ESR studies of irradiated ground corn as a dosimeter / E.P. Munoz [et al.] // Radiat. Phys. Chem. 1994. Vol. 43. PP. 311-313.

5. Методы идентификации факта облучения и их применение на примере специй, сушеных трав и яблок / И.М. Меджидов, Д.И. Петрухина, В.А. Харламов, И.В. Полякова // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: научные основы и перспективы практического применения: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 5. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2023. С. 161-169.

6. Investigation of dried apple samples for identification of radiation treatment I.M. Medzhidov, I.V. Polyakova, S.A. Gorbatov [et al.] // Genetic and radiation technologies in agriculture. 2022. PP. 147-150.

EPR SPECTROMETRY OF WHEAT SEEDS IRRADIATED WITH LOW-ENERGY ELECTRONS

Medzhidov I.M.^a, Loy N.N., Basyrova D.V., Petrukhina D.I., Gluchshenko N.V., Kharlamov V.A.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^a immedzhidov@mail.ru

The possibility of wheat seed irradiation identification through the utilization of electron paramagnetic resonance (EPR)-based spectrometry is investigated in this study. The formation of free radicals is induced by the irradiation of wheat seeds using low-energy electrons. The samples were exposed to doses ranging from 1 to 5 kGy. An increase in signal intensity corresponding to the radiation dose was observed. The presence of carbon-containing radicals is confirmed by the obtained g-factor value.

Keywords: EPR spectrometry, wheat, free radicals, ionizing radiation

УДК 539.1.04

ДВУХФАКТОРНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУ РЕЖИМОМ, ДОЗОЙ ПРЕПОСЕВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАБОТКИ И КАЧЕСТВЕННЫМИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ УРОЖАЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

Московская К.А.^{1,a}, Лой Н.Н.¹, Сулова О.В.¹, Воробьев М.С.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

Проведен двухфакторный дисперсионный анализ с целью определения влияния выбора различных доз и режимов предпосевного электронного облучения на количественные и качественные показатели 100-суточных растений ярового ячменя. Обнаружено, что большинство показателей, где наблюдается влияние выбора режима облучения, имеют большие значения при обработке семян электронами с энергией 160 кэВ, т.е. во II режиме.

Ключевые слова: двухфакторный дисперсионный анализ, ячмень яровой, полевой опыт, качественные и количественные показатели урожая, урожайность

На сегодняшний день наиболее актуальными задачами современного сельского хозяйства являются:

- защита растений от патогенной микрофлоры в почвах и на посевном материале;
- получение высококачественной растениеводческой продукции;
- повышение продуктивности сельскохозяйственных культур.

Для их решения необходимо выявление закономерностей действия различных факторов и условий на рост и развитие растений. Одним из инструментов поиска влияния одних факторов на другие является дисперсионный анализ, дающий возможность установить изменчивость переменной под воздействием тех или иных регулируемых условий. Дисперсионный анализ поможет прийти к окончательному выводу о формировании биологических эффектов у ярового ячменя при воздействии различных видов, режимов и доз ионизирующего излучения на его семена, что

позволит использовать этот феномен в практике современного сельского хозяйства.

В связи с этим целью исследований являлось проведение двухфакторного дисперсионного анализа между режимом, дозой предпосевного электронного облучения и качественными и количественными показателями урожая ярового ячменя.

В качестве объекта исследований выбран яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир. Изучаемая культура представляет собой незаменимое сырье, широко используемое в производственных, технических и кормовых целях.

Работы, связанные с облучением семян, проводились совместно с ИСЭ СО РАН в г. Томск. Применялся ускоритель электронов «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом, генерирующий пучок большого сечения с выводом его в атмосферу через тонкую металлическую фольгу (рис. 1) [1].



Рисунок 1. Электронный ускоритель «Дуэт»

Дозы предпосевной обработки: 1, 2, 3, 4, 5 кГр.
Режимы облучения: I режим – энергия электронов 130 кэВ, II режим – энергия электронов 160 кэВ.
Мощность дозы излучения – 100 Гр/имп. Глубина поглощения дозы <300 мкм. Контролем являлись необлученные семена.

В период с мая по август 2022 года проведен полевой опыт на экспериментальном участке НИЦ

«Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ на дерново-подзолистой супесчаной почве, на делянках, расположенных рендомизированным способом. Данный метод расположения базируется на том, что любые методы вариационной статистики применимы только лишь к случайным явлениям, и по этой причине статистическая обработка итогов эксперимента более обосновано применима при беспорядочном

расположении вариантов в пространстве [2]. Каждый из вариантов схемы размещали повторно на трех делянках (трехкратная повторность).

В нашем опыте при исследовании воздействия предпосевного облучения был соблюден принцип единственного закономерного отличия, т.е. обработка почвы на всех без исключения делянках опыта была одинакова, посев проведен в один промежуток времени, на всех делянках использовалась одна и та же концепция ухода.

Качественные и количественные показатели урожая оценивали на 100-е сутки после посева. Количество зерна урожая определяли методом пробного снопа. Качество (содержание золы, протеинов, жира, клетчатки, сухого вещества) определяли методом диффузной отражательной спектроскопии в ближней ИК-области спектра на ИК-анализаторе «Инфрапид-61».

В таблице 1 представлены результаты влияния режима и дозы облучения на разные показатели структуры урожая полевого эксперимента и урожайность (ц/га).

Выявлена зависимость высоты растений (см) от режима предпосевного облучения. Режим II электронной обработки оказал наибольшее влияние на показатель роста и развития. Также выбор энергии электронов в предпосевном облучении влиял на массу зерна одного растения (г). Режим с энергией электронов 160 кэВ также характеризуется большими значениями показателя. Особый интерес вызывают результаты двухфакторного дисперсионного анализа между дозой и режимом облучения и массой 1000 зерен (г) (рис. 2). Обнаружено влияние обоих факторов на показатель структуры урожая.

Таблица 1

Критерий F (результат двухфакторного дисперсионного анализа) для показателей структуры урожая и урожайности полевого опыта

Факторы	F крит	Критерий F						
		высота раст., см	всего стеблей, шт.	кол-во продукт. стеблей, шт.	масса на 1 раст., г		масса 1000 зерен, г	урож-ть, ц/га
					соломы	зерна		
Режим	7,71	44,90*	1,14	2,77	3,70	12,91*	9,01*	0,88
Доза	6,39	0,48	0,52	1,08	0,95	2,01	13,43*	0,79

* – выявленное влияние фактора на показатель ($F > F_{крит}$)

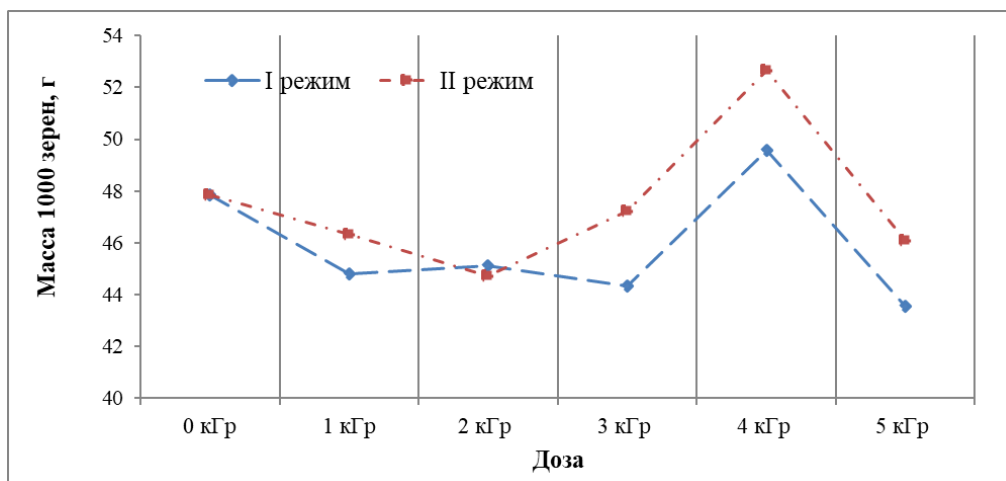


Рисунок 2. Масса 1000 зерен (г) в зависимости от режима и дозы предпосевного облучения

Выявлено наличие корреляции между массой 1000 зерен растений, облученных разными дозами в I режиме, и между этим же показателем растений, облученных разными дозами во II режиме (коэффициент корреляции = 0,89). Наибольший показатель массы 1000 зерен в обоих режимах отмечен при дозе 4 кГр. Также стоит отметить, что влияние II режима

способствовало увеличению массы 1000 зерен во всех дозах, за исключением 2 кГр.

На разные характеристики качества урожая зерна, в целом, облучение различными дозами и режимами не оказало действия, кроме сухого вещества (табл. 2).

Критерий F (результат двухфакторного дисперсионного анализа) для показателей структуры урожая и урожайности полевого опыта

Факторы	F крит.	Критерий F				
		зола	протеин	углеводы	сухое вещество	жир
		% от общего содержания всех веществ				
Режим	7,71	5,28	4,08	4,75	10,71*	0,07
Доза	6,39	0,70	0,66	1,52	1,37	2,01

Содержание сухого вещества в зерне урожая полевого опыта больше у растений, облученных во II режиме.

Таким образом, оценено с помощью двухфакторного дисперсионного анализа влияние выбора доз и режима предпосевного электронного облучения на количественные и качественные характеристики урожая ярового ячменя сорта Владимир. На некоторые изучаемые параметры в значительной степени оказал воздействие выбор режима облучения, а именно растения, претерпевшие предпосевную обработку во II режиме, характеризуются большими значениями показателей.

Список литературы

1. Особенности численного моделирования многочастотного источника электронов с плазменным эмиттером / В.Т. Астрелин, М.С. Воробьев, А.Н. Козырев, В.М. Свешников // Современные проблемы математического моделирования: сборник трудов XVIII Всероссийской конференции-школы молодых исследователей. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2019. С. 156.

2. Практикум по агрохимии: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 24-28.

TWO-FACOR ANOVA BETWEEN THE MODE, THE DOSE OF PRE-SOWING ELECTRONIC TREATMENT AND THE QUALITATIVE AND QUANTITATIVE INDICATORS OF THE SPRING BARLEY

Moskovskaya K.A.^{1,a}, Loi N.N.¹, Suslova O.V.¹, Vorobyov M.S.²

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Akademicheskyy Ave. 2/3, Tomsk, Russian Federation, 634055

e-mail: ^a mimimi.po@mail.ru

A two-way analysis of variance was carried out to determine the effect of choosing different doses and modes of presowing electron irradiation on the quantitative and qualitative indicators of 100-day-old spring barley plants. It was found that most of the indicators, where the influence of the choice of irradiation mode is observed, have large values when seeds are treated with electrons with an energy of 160 keV, i.e. in II mode.

Keywords: two-way analysis of variance, spring barley, field experience, qualitative and quantitative yield indicators, productivity

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПО ГЛУБИНЕ

Соколов С.А.^{1,а}, Антипина Н.А.³, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Золотов С.А.¹, Кречетов Н.Д.¹, Никитченко А.Д.^{1,2}, Николаева А.А.³, Студеникин Ф.Р.^{1,2}, Черняев А.П.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16, Российская Федерация

e-mail: ^аsokolov.sa20@physics.msu.ru

Ключевые слова: радиационные технологии, восстановление спектров, распределение поглощенной дозы, спектр электронного пучка

Постоянное развитие радиационных технологий связано с их эффективностью, экологической безопасностью и широкими областями применения в науке, медицинской практике, сельском хозяйстве и пищевой промышленности. В настоящее время в мире наблюдается неуклонный рост количества медицинских и промышленных центров, работающих на базе ускорителей электронов [1-3]. Важным фактором успешного применения радиационных технологий является наличие информации о пространственном распределении поглощенной дозы в облучаемом объекте, которое определяется как свойствами облучаемого объекта (геометрией, элементарным составом, плотностью), так и свойствами ускорителя электронов, в первую очередь энергетическим спектром пучка [4, 5].

Ранее авторами был разработан алгоритм, позволяющий восстановить спектр пучка от промышленного ускорителя электронов на основе экспериментально измеренного распределения поглощенной дозы по глубине фантома [6]. Для реализации алгоритма, с помощью программного кода Geant4 (CERN, Швейцария), основанного на методе Монте-Карло, предварительно были рассчитаны распределения поглощенной дозы по глубине в различных опорных материалах (вода, алюминий, полипропилен), полученные при облучении моноэнергетическими пучками ускоренных электронов с энергией в диапазоне от 0.1 МэВ до 10 МэВ с шагом в 0.1 МэВ. На основе имеющегося экспериментально измеренного распределения поглощенной дозы алгоритм позволяет подобрать такую взвешенную комбинацию распределений дозы в опорных веществах от моноэнергетических электронов, которая максимально близка к экспериментально измеренному и будет соответствовать исходному спектру пучка ускорителя

электронов, что позволит рассчитывать ожидаемое распределение поглощенной дозы в других материалах и облучаемых объектах различной геометрии. При этом точность восстановления зависит от того, насколько приближены данные, полученные с помощью компьютерного моделирования к экспериментально измеренным значениям.

С целью проверки разработанного алгоритма [6] было проведено экспериментальное измерение распределений поглощенной дозы по глубине в водном фантоме MP-3 PTW (Фрайберг, Германия) и фантоме из полипропилена RW-3 Slab Phantom PTW (Фрайберг, Германия).

Несмотря на то, что алгоритм разрабатывался в первую очередь для промышленных ускорителей, для его экспериментальной проверки был выбран медицинский ускоритель Varian TrueBeam (Varian Medical Systems, Пало-Альто, США), расположенном в отделении нейрохирургии и радиотерапии НМИЦ нейрохирургии им. академика Н.Н. Бурденко. Такой выбор обусловлен тем, что медицинские ускорители обладают более высокой точностью дозиметрических методов, а также высокой стабильностью пучка по сравнению с ускорителями электронов в промышленных центрах радиационной обработки биообъектов и материалов.

Для проведения экспериментальных измерений были выбраны два режима работы ускорителя с наиболее вероятными энергиями 6 МэВ и 9 МэВ. Данные энергии являются характерными и часто используемыми в центрах промышленной радиационной обработки [1].

Для дозиметрических измерений были выбраны ионизационные камеры PTW: Semiflex 3D [7] и Roos Chamber [8].

В ходе обработки экспериментальных результатов без учета ионизационных камер было выявлено расхождение значений, измеренных экспериментально и значений, полученных при проведении компьютерного моделирования. Максимальное отклонение (до 15 %) наблюдалось в поверхностных слоях фантомов на глубине от 0 до 2 см. Данные расхождения связаны с тем, что в ходе моделирования не учитывалась геометрия ионизационных камер. Поэтому было проведено дополнительное моделирование, в ходе которого в фантомы из воды и полипропилена были добавлены ионизационные камеры PTW: Semiflex 3D и Roos Chamber. На глубине относительно поверхности фантома на главной оси пучка размещалась ионизационная камера таким образом, что ее референсная точка находилась на главной оси пучка. Значения глубины расположения камер в моделированиях варьировались от 0 мм до 52 мм с шагом 1 мм. При моделировании эксперимента с водным фантомом размещалась ионизационная камера PTW: Semiflex 3D. Камера задавалась как цилиндр с высотой 2,4 мм и радиусом 2,4 мм, одно из оснований которого заменено полусферой с радиусом 2,4 мм, центр которой совпадает с центром основания цилиндра. Корпус камеры выполнен из ПММА, толщина стенок 0,66 мм. В центре полости, являющейся чувствительным объемом камеры, располагался алюминиевый электрод в виде цилиндра с высотой 2,4 мм и диаметром 0,8 мм.

При моделировании эксперимента с полипропиленовым фантомом размещалась ионизационная камера Roos Chamber. Корпус камеры моделировался цилиндром из ПММА с диаметром 44 мм и высотой 10 мм. Чувствительный объем камеры представлял собой цилиндрическую полость с диаметром 16 мм и высотой 2 мм, заполненную воздухом, центральная ось которого совпадала с главной осью пучка.

Уточнение геометрии эксперимента при моделировании и учет наличия ионизационных камер привело к снижению максимального отклонения экспериментально измеренных значений поглощенной дозы от значений, полученных в ходе моделирования с 15 % до 1 %, что позволяет рассчитывать распределение поглощенной дозы по глубине в других материалах с максимальной погрешностью не более 1 %.

В ходе данного исследования экспериментально проверена и подтверждена корректная работа

предложенного алгоритма восстановления спектра пучка от ускорителя электронов на основе экспериментально измеренного распределения поглощенной дозы по глубине фантома [6].

Исследование выполнено в рамках программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Список литературы

1. Черняев А.П. Радиационные технологии: наука, народное хозяйство, медицина. М.: Изд-во Московского ун-та, 2019. 231 с.
2. Accelerators in Various Sectors of the World Economy / A.P. Chernyaev [et al.] // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. Vol. 13. № 7. PP. 988-990.
3. Chernyaev A.P., Kolyvanova M.A., Borshegovskaya P.Yu. Radiation technology in medicine. Part 1. Medicine accelerators // Moscow Univ. Phys. Bull. 2015. Vol. 70. № 6. PP. 457-465.
4. Electron spectrum reconstruction as nonlinear programming model using micro-adjusting algorithm / G. Li, A. Wu, H. Lin, Y. Wu // 7th Asian-Pacific Conference on Medical and Biological Engineering; APCMBE 2008, 22-25 April 2008, Beijing, China: IFMBE Proceedings. Vol. 19. PP. 451-454.
5. Realization and Comparison of Several Regression Algorithms for Electron Energy Spectrum Reconstruction / L. Gui, L. Hui, W. Ai-Dong [et al.] // Chin. Phys. Lett. 2008. Vol. 25. № 7. P. 2710.
6. Восстановление спектров промышленных ускорителей электронов по глубинным дозовым распределениям / У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская, В.С. Ипатова [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 4. С. 601-608.
7. A new reference-type ionization chamber with direction-independent response for use in small-field photon-beam dosimetry – An experimental and Monte Carlo study / B. Delfs [et al.] // Medicine Physics. 2019. Vol. 29. № 1. PP. 39-48.
8. Zink K., Wulff J. Monte Carlo calculations of beam quality correction factors k_Q for electron dosimetry with a parallel-plate Roos chamber // Phys. Med. Biol. 2008. Vol. 53. № 6. doi: 10.1088/0031-9155/53/6/006.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ALGORITHM FOR RECOVERY OF THE SPECTRA OF INDUSTRIAL ELECTRON ACCELERATORS BASED ON DISTRIBUTIONS ABSORBED DOSE BY DEPTH

Sokolov S.A.^{1,a}, Antipina N.A.³, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshegovskaya P.Y.^{1,2}, Zolotov S.A.¹, Krechetov N.D.¹, Nikitchenko A.D.^{1,2}, Nikolaeva A.A.³, Studenikin F.R.^{1,2}, Chernyaev A.P.^{1,2}

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Federal State Autonomous Institution «N.N. Burdenko Neurosurgery Research Institution» of the Ministry of Health of the Russian Federation, 4th Tverskaya-Yamskaya st. 16, Moscow, Russian Federation, 125047

e-mail: ^a sokolov.sa20@physics.msu.ru

Keywords: radiation technologies, spectrum reconstruction, absorbed dose distribution, electron beam spectrum

The continuous development of radiation technologies is linked to their efficiency, ecological safety, and broad applications in science, medicine, agriculture, and food industries. Current trends show an increase in centers utilizing electron accelerators. An algorithm has been developed to reconstruct the beam spectrum of electron accelerators based on absorbed dose distribution data. Using the Geant4 code, dose distributions in various materials were simulated. The algorithm uses a combination of dose distributions to match experimental data and estimate absorbed dose in

different materials accurately. Experimental validation was performed using a medical Varian TrueBeam accelerator. Despite differences in measurements and simulations, refinement of the geometry of the experiment in modeling and taking into account the presence of ionization chambers reduced discrepancies from 15 % to within 1 %, enabling accurate dose distribution calculation in various materials. This study confirmed the algorithm's efficacy in reconstructing accelerator beam spectra based on absorbed dose data.

УДК 614.876:633.11+577.15+ 632.4

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ И ПОРАЖЕННОСТЬ БОЛЕЗНЯМИ ПРОРОСТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Суслова О.В.^{1,a}, Лой Н.Н.¹, Московская К.А.¹, Воробьев М.С.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3, Российская Федерация
e-mail: ^a belovol-1983@mail.ru

В лабораторном опыте изучено влияние предпосевного облучения семян на ферментативную активность и пораженность болезнями проростков яровой пшеницы. Показано, что облучение в дозах 3, 4 и 5 кГр при режиме II (энергия электронов 120 кэВ) и в дозе 1 кГр при режиме I (энергия электронов 100 кэВ) статистически значимо увеличивает на 2,5-5,4 % пораженность и на 8,6-14,0 % распространенность гельминтоспориоза на проростках яровой пшеницы сорта Ирень и снижает на уровне тенденции активность каталазы в 7-ми суточных проростках.

Ключевые слова: предпосевное электронное облучение семян, ферментативная активность, пораженность проростков болезнями, яровая пшеница

В современном мире высокотехнологичная обработка, к которой можно отнести обработку пучками заряженных частиц, находит все большее распространение в разных областях промышленности, науки и техники [1, 2]. В частности, обработка низкоэнергетическими электронными пучками с энергиями до 300 кэВ позволяет воздействовать на материалы, не оказывая при этом существенного влияния на глубину более 1 мм. В процессе подготовки зерна к посеву указанным физическим способом дезинфекция обеспечивает сохранение зародыша, а также

оказывает стимулирующий эффект при прорастании семян за счет действия тормозного рентгеновского излучения [3, 4]. По сравнению с такими традиционно используемыми в растениеводстве методами предпосевной обработки как опрыскивание семян стимуляторами роста растений, растворами микроэлементов и т.п., прогрев токами высокой частоты, ультрафиолетовое и лазерное облучение, метод облучения ионизирующим излучением имеет преимущества по интенсивности воздействия на объекты и по стабильности получаемых результатов [5].

Каталаза широко распространена в растительных тканях. Сущность каталитического действия каталазы состоит в разложении пероксида водорода с выделением молекулярного кислорода. Пероксид водорода, образующийся в обменных реакциях, в известных концентрациях для клетки токсичен, в связи с чем нельзя недооценивать роль каталазы, активирующей процесс разложения пероксида водорода с образованием воды и неактивного кислорода [6].

Цель исследований – оценить действие предпосевного электронного облучения семян на ферментативную активность и пораженность болезнями проростков яровой пшеницы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали семена яровой пшеницы Ирень. Облучение семян проводили за 12 суток до закладки в рулоны в ИСЭ СО РАН (г. Томск) на широкоапертурном электронном ускорителе «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом и выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу [7]. Семена яровой пшеницы общей массой $m=15$ г были свободно разложены в открытой чашке Петри, что позволяло уложить зерно в один слой на расстоянии 20 мм от выводного окна ускорителя. Зерно облучали в дозах 1, 2, 3, 4 и 5 кГр в двух разных режимах – I (энергия электронов 100 кэВ) и II (энергия электронов 120 кэВ). Мощность излучения 100 Гр/импульс. Суммарная введенная доза набиралась путем изменения количества импульсов. При этом глубина поглощения дозы не превышала 300 мкм.

Семена проращивали в рулонах фильтровальной бумаги в термостате при соблюдении температурного режима. Повторность данного эксперимента 3-

х кратная. На 7-е сутки проводили определение лабораторной всхожести по ГОСТ 12038-84 и пораженность проростков болезнями по ГОСТ 12044-93 [8, 9].

Определения активности каталазы проводили по методике Аebi [10].

Экспериментальные данные анализировали методами непараметрической статистики с помощью программ MS Excel и STATISTICA. Статистическую значимость различий оценивали с помощью критерия Стьюдента, а также по НСП (наименьшей существенной разнице) при 95 % - ном уровне значимости.

Результаты

Экспериментальные результаты показали увеличение пораженности проростков гелиминтоспориозом (возбудитель *Helminthosporium sativum* Paml. King, et Bakke) и его распространенности при больших значениях дозы облучения. При облучении семян в дозах 3, 4 и 5 кГр при режиме II (энергия электронов 120 кэВ) и при дозе 1 кГр при режиме I (энергия электронов 100 кэВ) пораженность растений статистически значимо превышала (на 2,5-5,4 %) значение в контроле (табл. 1). Распространенность гелиминтоспориоза в этих вариантах также была достоверно выше на 8,6-14,0 % по сравнению с контролем (табл. 1).

В остальных вариантах опыта пораженность проростков гелиминтоспориозом и его распространенность не отличались от контроля.

Изучение влияния электронного облучения семян на активность ферментативных процессов показало, что активность каталазы была выше при режиме I (энергия электронов 100 кэВ), чем при режиме II (энергия электронов 120 кэВ) (табл.2).

Таблица 1

Влияние электронного облучения на повреждения растений гелиминтоспориозом

Доза облучения, кГр (режим)	Пораженность, %	Распространенность, %
0 (контроль)	3,8	12,7
1 (I)	6,7*	23,3*
2 (I)	4,5	17,3
3 (I)	5,5	16,7
4 (I)	5,3	18,0
5 (I)	3,3	10,7
1 (II)	5,3	19,3
2 (II)	4,7	18,0
3 (II)	7,5*	26,0*
4 (II)	6,3*	21,3*
5 (II)	9,2*	26,7*
НСП, σ_5	2,3	6,8

* – различие с контролем статистически значимо при $p \leq 0,05$

Влияние электронного облучения на активность каталазы

Доза облучения, кГр (режим)	Активность каталазы, МЕ/мл
0 (контроль)	15,09
1 (I)	18,30
2 (I)	7,49
3 (I)	15,84
4 (I)	13,27
5 (I)	20,87
1 (II)	10,92
2 (II)	10,49
3 (II)	9,95
4 (II)	4,92
5 (II)	6,10
НСР, σ_5	15,28

Однако снижение активности каталазы при дозах 3-5 кГр и энергии электронов 120 кэВ по сравнению с контролем отмечено лишь на уровне тенденции, так как оно не является достоверным.

На основании полученных результатов можно заключить, что облучение в дозах 3, 4 и 5 кГр при режиме II (энергия электронов 120 кэВ) и при дозе 1 кГр при режиме I (энергия электронов 100 кэВ) статистически значимо увеличивает на 2,5-5,4 % пораженность и на 8,6-14,0 % распространенность гельмитоспориоза на проростках яровой пшеницы сорта Ирень и снижает на уровне тенденции активность каталазы в 7-ми суточных проростках.

Список литературы

1. Радиационная обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным эмиттером / М.С. Воробьев, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль [и др.] // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 3. С. 169-172.

2. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 224 с.

3. Influence of electronic irradiation on the affection of barley by root rot / N.N. Loy, N.I. Sanzharova, S.N. Gulina [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1393. PP. 012107.

4. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

5. Физика. Технологии. Инновации: сборник научных трудов / Под ред. В.Н. Рычкова. Екатеринбург: УРФУ, 2015. 358 с.

6. Методы оценки антиоксидантного статуса растений / Г.Г. Борисова, М.Г. Малева, Г.Ф. Некрасова, Н.В. Чукина. Екатеринбург. Издательство Уральского университета, 2012. С. 61.

7. M S Vorobyov, N N Koval, and S A Sulakshin 2015 Instrum. Exp. Tech. 58 – №5. – 687.

8. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартиформ, 2011. С. 31.

9. ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. М.: Стандартиформ, 2011.

10. Aebi H. Catalases // Methods of Enzymatic Analysis. 1971. Vol. 3. PP. 273-286.

THE EFFECT OF PRE-SOWING ELECTRON IRRADIATION OF SEEDS ON THE ENZYMATIC ACTIVITY AND DISEASE INFESTATION OF SPRING WHEAT SEEDLINGS

Suslova O.V.^{1,a}, Loy N.N.¹, Moskovskaya K.A.¹, Vorobyov M.S.²

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Akademicheskoy Ave. 2/3, Tomsk, Russian Federation, 634055

e-mail: ^abelovol-1983@mail.ru

The effect of pre-sowing irradiation of seeds on the enzymatic activity and disease infestation of spring wheat seedlings has been studied in laboratory experiment. It has been shown that at doses of 3, 4 and 5 kGy in mode II (electron energy 120 keV) and at a dose of 1 kGy in mode I (electron energy 100 keV) statistically significantly increases the incidence of helminthosporiosis by 2.5-5.4 % and by 8.6-14.0 % the prevalence of helminthosporiosis on seedlings of spring wheat of the Iren variety and reduces by at the trend level, catalase activity in 7-day-old seedlings.

Keywords: *pre-sowing electronic irradiation of seeds, enzymatic activity, disease infestation of seedlings, spring wheat*

УДК 539.1.04

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВСХОЖЕСТЬ И ФИТОПАТОГЕННЫЙ СТАТУС СЕМЯН

Чибисова М.С.^{1,a}, Близняк У.А.^{1,2}, Борщegovская П.Ю.^{1,2}, Чуликова Н.С.³, Малюга А.А.³, Ипатова В.С.², Зубрицкая Я.В.¹, Никитченко А.Д.¹, Черняев А.П.^{1,2}, Юров Д.С.²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, 630501, Новосибирская обл., Новосибирский р-он, р.п. Краснообск, ул. Центральная, д. 2Б, Российская Федерация

e-mail: ^achibisova.ms20@physics.msu.ru

В данной работе изучено влияние низкоэнергетического электронного и рентгеновского излучений на всхожесть и фитосанитарное состояние семян льна сорта «Северный», гибрида рапса «Билдер» и пшеницы сорта «Новосибирская 29» с естественным заражением фитопатогенными и плесневыми грибами. Показано, что обработка семян в диапазоне доз от 4 Гр до 150 Гр оказывает как стимулирующее, так и ингибирующее воздействие на биометрические и фитосанитарные показатели семян. Установлены дозы, стимулирующие всхожесть прорастания облученных семян, при этом снижающие общее количество и диаметр грибов: при обработке ускоренными электронами для семян льна доза 16 Гр, для рапса – 8 Гр и 60 Гр, для пшеницы – 40 Гр и 70 Гр; при обработке рентгеновским излучением семян льна эффективными дозами оказались 8 Гр, 12 Гр, 30 Гр, 40 Гр и 60 Гр, для рапса наблюдалось подавление грибов более чем на 46 % для всех доз облучения, при этом стимулирующий эффект на всхожесть оказали дозы 8 Гр, 16 Гр, 50 Гр и 100 Гр, для семян пшеницы не выработаны эффективные дозы, поскольку для всех доз облучения наблюдалось увеличение количества грибов более чем на 17 %.

Ключевые слова: *радиационная обработка, электронное излучение, рентгеновское излучение, доза облучения, лен, рапс, пшеница, биометрические показатели, фитосанитарное состояние*

В условиях экологической и политической ситуации в сочетании с резким увеличением численности населения планеты продовольственная безопасность и устойчивое развитие стали главной заботой на предстоящие годы [1]. Обработка почвы и сельскохозяйственных культур на различных стадиях формирования растений обеспечивает биоразнообразие и поддержание баланса экосистем, что является ключевым фактором для развития сельского хозяйства [2]. Радиационные технологии обладают большим потенциалом в области промышленной агробиотехнологии для повышения урожайности и качества сельскохозяйственных культур, подавления патогенной и грибковой микрофлоры, присутствующей в семенном материале, а также для подавления

прорастания корнеплодов, зерновых и масличных культур. Радиационная обработка сельскохозяйственных культур является экологически чистым и эффективным решением по сравнению с традиционными методами, использующими химические реагенты, опасные как для окружающей среды, так и для потребителей [3].

Многочисленными исследованиями показано, что дозы облучения от 5 Гр до 20 Гр используются для предпосевной обработки сельскохозяйственных культур с целью увеличения скорости прорастания растений, тем самым сокращая вегетационный период и снижая риск распространения грибковых и бактериальных заболеваний из почвы [4]. Более высокие дозы, варьирующиеся от 50 Гр до 150 Гр,

подавляют прорастание и частично подавляют образование парши и гнили на собранных корнеплодах [5]. В большинстве работ используется гамма-излучение от источников ^{60}Co и ^{137}Cs , однако с наблюдаемым мировым трендом в переходе к управляемым источникам ионизирующего излучения повышенный интерес представляют работы по исследованию влияния ускоренных электронов и тормозных фотонов на сельскохозяйственные культуры, в частности зерновые и масличные. При этом низкие энергии ускоренных электронов, а также тормозных рентгеновских фотонов, воздействуют исключительно на внешние слои облучаемых объектов, не оказывая при этом негативного воздействия на внутреннюю структуру облучаемых образцов.

Целью данной работы было изучение влияния низкоэнергетического рентгеновского и электронного излучений на всхожесть семян льна, рапса и пшеницы с естественным заражением фитопатогенными и плесневыми грибами, а также оценка их фитосанитарного состояния.

В качестве объектов исследования были выбраны семена пшеницы сорта «Новосибирская 29», гибрида рапса «Билдер» и льна сорта «Северный», зараженные естественным путем фитопатогенными и плесневыми грибами. Семена пшеницы, рапса и льна упаковывали по 30, 200 и 130 штук соответственно, в герметично закрывающиеся пакеты, что составляло по массе 1 г.

Облучение проводилось на ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т001 с максимальной энергией 1 МэВ (НИИЯФ МГУ, г. Москва), а также на аппарате 1BPV23-100 с рентгеновской трубкой RAD-100 и молибденовым анодом (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, г. Москва). Для контроля и оценки поглощенной дозы использовали дозиметрический раствор Фрикке. Семена льна, рапса и пшеницы

облучали в дозах 0, 4, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100 и 150 Гр. Мощность дозы электронного излучения составила 0,2-1,3 Гр/с, а рентгеновского – 0,1 Гр/с.

После проведения облучения семена были доставлены в СФНЦА РАН для дальнейшего биометрического и фитосанитарного анализа. Из пакетов с облученными и контрольными семенами случайным образом отбиралось по 30 семян для каждой дозы, после чего культуры высевали по 10 штук в чашки Петри с питательной средой PDA (картофельный декстрозный агар), где они проросли. В ходе эксперимента оценивали энергию прорастания К3 (измеряемую на 3-й день после посева на питательную среду) и константу всхожести семян К7 (измеряемую на 7-й день) в соответствии с ГОСТ 12038-84 [6]. Количество и диаметр колоний грибов на облученных и необлученных семенах определяли на 7-й день исследования.

Анализ экспериментальных данных показал нелинейную зависимость энергии прорастания и всхожести (К3 и К7), а также количества и диаметра грибов при облучении в дозах от 0 Гр до 150 Гр семян пшеницы (рис. 1), рапса (рис. 2) и льна (рис.3) электронным и рентгеновским излучением. Под положительным эффектом понимается стимулирование энергии прорастания и всхожести растений, а также подавление колоний грибов, под отрицательным эффектом – угнетение всхожести семян и стимулирование роста грибов.

При облучении электронным излучением наблюдалось значительное стимулирование энергии прорастания пшеницы на 3-и сутки К3 после посева на 126-401 % для всех доз относительно контрольных образцов. Всхожесть семян на 7-е сутки К7 также показала значения выше контрольных на 27-100 % для всех исследуемых доз.

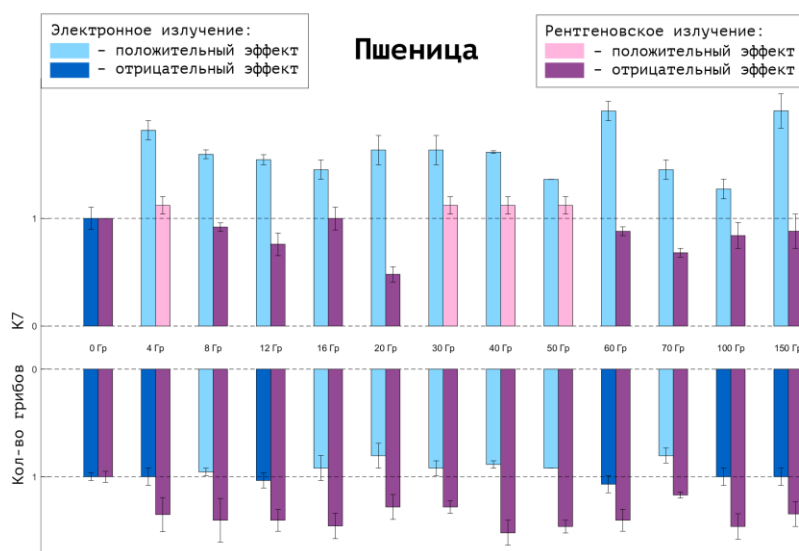


Рисунок 1. Зависимость относительных значений всхожести К7 и количества грибов от дозы облучения ускоренными электронами (синие столбцы) и рентгеновскими фотонами (розовые столбцы) для семян пшеницы

Большинство доз электронного излучения ингибировали количество грибов на 5-20 % и диаметр грибов на 1-8 % относительно контроля, однако для 12 Гр и 60 Гр наблюдалось незначительно повышение колоний на 5-7 %. Таким образом, выработанные эффективные дозы по суммарным показателям для семян пшеницы составили 40 Гр и 70 Гр.

При облучении рентгеновским излучением семян пшеницы возрастание значений К3 и К7 на 9-17 % наблюдалось при дозах 4 Гр, 30 Гр и 50 Гр, остальные дозы показали уменьшение параметров – на 12-52 % относительно контрольных показателей. Во всех дозах наблюдалось значительное повышение количества грибов по сравнению с контролем на 17-52 % при одновременном снижении их диаметра до 26 %. Однако, вследствие стимулирования роста колоний грибов на семенах пшеницы при обработке

рентгеновским излучением в дозах до 150 Гр эффективных доз выявлено не было.

Облучение семян рапса ускоренными электронами стимулировало К3 и К7 в диапазоне доз 4-16 Гр и 60-70 Гр. В половине доз грибы были полностью подавлены, в остальных дозах произошло резкое стимулирование роста колоний на 133-467 % относительно контроля. Эффективные дозы по совокупности данных составили 8 Гр и 60 Гр.

При облучении рапса рентгеновскими фотонами одновременное повышение значений К3 и К7 наблюдалось при 16 Гр, также стимулирующей для К7 оказалась доза 100 Гр. Все дозы эффективно снизили количество грибов на 46-77 % по сравнению с контрольными семенами. Таким образом, эффективными дозами по сумме показателей были выбраны 8 Гр, 16 Гр, 50 Гр и 100 Гр.

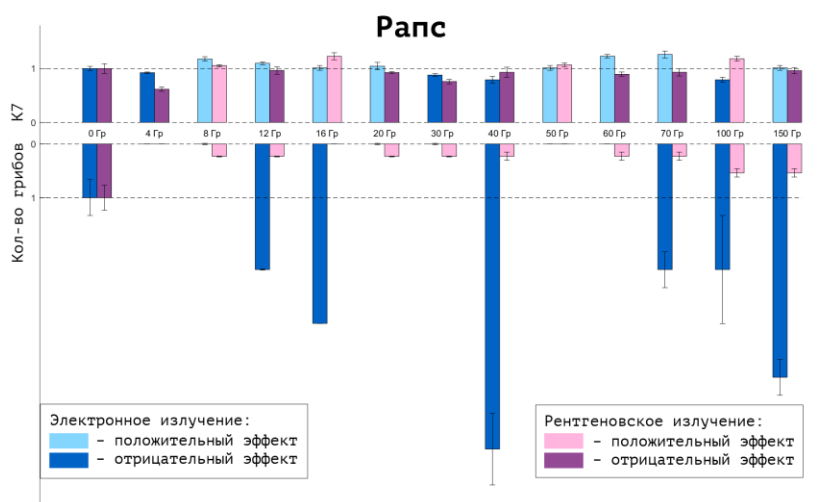


Рисунок 2. Зависимость относительных значений всхожести К7 и количества грибов от дозы облучения ускоренными электронами (синие столбцы) и рентгеновскими фотонами (розовые столбцы) для семян рапса

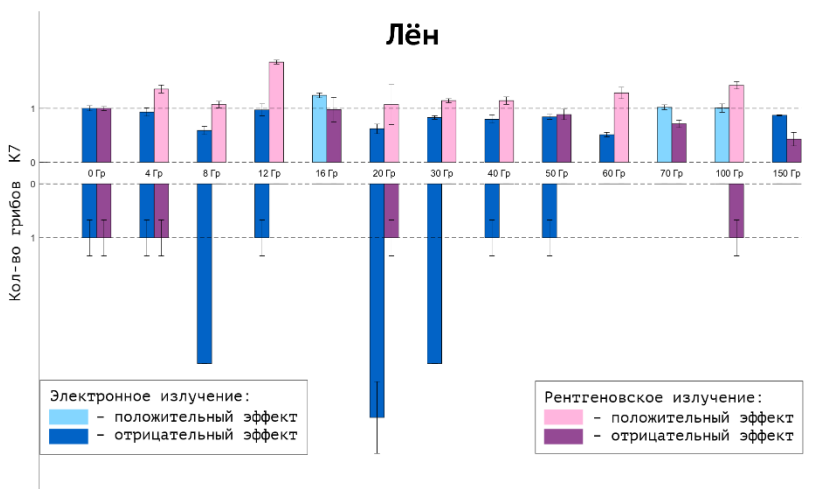


Рисунок 3. Зависимость относительных значений всхожести К7 и количества грибов от дозы облучения ускоренными электронами (синие столбцы) и рентгеновскими фотонами (розовые столбцы) для семян льна

При облучении семян рапса низкоэнергетическими электронами доза 16 Гр простимулировала значения всхожести К3 и К7 на 15–24 %, показатели остальных доз оказались значительно ниже контрольных. При дозах 8 Гр, 20 Гр и 30 Гр наблюдалось резкое увеличение колоний грибов относительно контроля на 182–359 %, но при высоких дозах 60–150 Гр грибы полностью отсутствовали. По совокупности данных доза облучения 16 Гр была выбрана как наиболее эффективная доза.

Облучение семян льна рентгеновским излучением привело к стимуляции значений К3 и К7 на 36–86 % при дозах 4 Гр, 12 Гр и 20 Гр, остальные дозы либо подавляли всхожесть, либо стимулировали только на 7-й день. Все дозы, кроме 4 Гр, 20 Гр и 100 Гр полностью подавили грибы, в остальных диаметр грибов был ниже более чем на 17 %, но их количество оставалось на уровне контрольных образцов. Эффективными дозами были выбраны 8 Гр, 12 Гр, 30 Гр, 40 Гр и 60 Гр.

В ходе проведенного исследования показано как стимулирующее, так и ингибирующее воздействия доз рентгеновского и электронного излучений в диапазоне доз от 0 Гр до 150 Гр на всхожесть растений и их фитосанитарное состояние. Для каждого вида семян и источника ионизирующего излучения были выработаны эффективные дозы по совокупности всех исследуемых параметров.

Анализ фитосанитарного состояния семян пшеницы, рапса и льна выявил широкий спектр как фитопатогенных грибов, таких как *Alternaria*, *Fusarium* и *Biolaris*, так и плесневых грибов *Aspergillus*, *Mucor* и *Penicillium* и *Trichoderma*. При этом количество фитопатогенов, найденных в пшенице, оказалось меньше, чем на семенах льна и рапса, однако, они оказались более стойкими к воздействию высоких доз облучения.

Все исследования проводились в лабораторных условиях, интересным представляется проведение

предпосевной обработки ионизирующим излучением семян в почвенно-климатических условиях Российской Федерации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Galanakis C.M. The «Vertigo» of the Food Sector within the Triangle of Climate Change, the Post-Pandemic World, and the Russian-Ukrainian War // *Foods*. 2023. Vol. 12(4). PP. 721.

2. RGRU. URL: <https://rg.ru/2022/08/03/chtoposeesh.html> (дата обращения: 30.06.2023).

3. The pulsed X-ray treatment of wheat against pathogenic fungi / A.A. Isemberlinova, I.S. Egorov, S.A. Nuzhnyh [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021. Vol. 503. PP. 75–78.

4. Пономаренко П.А., Безотосный С.С., Фролова М.А. Стимуляционный эффект при спецобработке семян сельскохозяйственных культур гамма-лучами // *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. 112–114.

5. Impact of 1-MeV Election Beam Irradiation on the Phenology and Microflora of Potatoes / N.S. Chulikova, A.A. Malyuga, U.A. Bliznyuk [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2022. Vol. 86(12). PP. 1549–1556.

6. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ, 2011. С. 31.

IMPACT OF ELECTRON AND X-RAY IRRADIATION ON GERMINATION AND PHYTOPATHOGENIC STATUS OF CROPS

Chibisova M.S.^{1,a}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Malyuga A.A.³, Chulikova N.S.³, Ipatova V.S.², Zubritskaya Ya.V.¹, Nikitchenko A.D.¹, Chernyaev A.P.^{1,2}, Yurov D.S.²

¹ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Central st. 2B, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Russian Federation, 630501
e-mail: ^a chibisova.ms20@physics.msu.ru

This study examines the influence of low-energy electron and X-ray radiation on the germination and phytosanitary condition of seeds of flax variety "Severny", rapeseed variety "Stroitel", and wheat variety "Novosibirskaya 29" with natural infection by phytopathogenic and mold fungi. It is shown that seed processing in the dose range of 4 Gy to 150 Gy has

both stimulating and inhibitory effects on the biometric and phytosanitary indicators of the seeds. The doses that stimulate the germination of irradiated seeds while reducing the total number and diameter of fungi were determined: for flax seeds processed with accelerated electrons, the dose is 16 Gy; for rapeseed – 8 Gy and 60 Gy; for wheat – 40 Gy and 70 Gy. For X-ray radiation processing effective doses for flax seeds were 8 Gy, 12 Gy, 30 Gy, 40 Gy, and 60 Gy; for rapeseed, suppression of fungi by more than 46% was observed for all irradiation doses, while doses of 8 Gy, 16 Gy, 50 Gy, and 100 Gy showed a stimulating effect on germination; for wheat seeds, effective doses were not determined as all irradiation doses resulted in an increase in the number of fungi by more than 17 %.

Keywords: *radiation processing, electron radiation, X-ray radiation, irradiation dose, flax, rapeseed, wheat, biometric indicators, phytosanitary condition*

УДК 533.922

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГРИБКОВЫХ ФИТОПАТОГЕНОВ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Шишко В.И.^а, Петрухина Д.И.^б, Тхорик О.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^а valentine585@yandex.ru; ^б petrukhina.dari@yandex.ru*

В данной работе рассматривается использование нетермальной атмосферной аргоновой плазмы (НААП) для борьбы с болезнями растений, в частности, для обеззараживания семян от грибковых патогенов. Обработка НААП позволяет эффективно снизить микробную нагрузку семян зерновых, улучшить их всхожесть и ростовые показатели, и даже дезактивировать грибковые патогены. Этот эффект достигается при помощи воздействия на семена непосредственно плазмой и ионизированным газом, а также при поливе ростков водой обработанной плазмой. Настоящая работа представляет обзор научных исследований, подтверждающих эффективность применения НААП в сельском хозяйстве и микробиологии для обеззараживания семян и борьбы с грибковыми патогенами.

Ключевые слова: *НААП, нетермальная атмосферная аргоновая плазма, грибковые патогены, дезинфекция семян, сельское хозяйство, биологическая безопасность*

Введение

В наше время с возрастающими изменениями в мировом климате проблема заболеваний растений, вызванных грибковыми патогенами, становится все более актуальной. Как показывают недавние исследования, эти патогены, становясь все более распространенными и устойчивыми, представляют серьезную угрозу для здоровья населения [1]. Кроме того, год от года наблюдается снижение урожайности сельскохозяйственных культур на 20-30 % из-за болезней растений [2]. Усиление климатических изменений, таких как повышение температуры и концентрации CO₂, может менять уровень восприимчивости растений к определенным патогенам, что в свою очередь способствует появлению новых болезней [3].

С учетом этих обстоятельств, традиционные методы контроля фитопатогенов, такие как использование пестицидов, становятся менее эффективными и связаны с рядом недостатков. Особое внимание ученых привлекает технология нетермальной плазмы – ионизированный газ с температурой, пригодной для воздействия на биообъекты. Во время генерации плазмы образуются свободные радикалы, которые

вызывают повреждения мембран и ДНК. Это свойство позволяет успешно применять плазму для уничтожения патогенных для растений микроорганизмов [4, 5].

Большинство исследований в этой области демонстрируют эффективное действие против фитопатогенов *in vitro* и дезинфекцию семян и растений [6, 7]. В данной работе мы проводим обзор технологии нетермальной плазмы, ее дезинфицирующие механизмы, а также исследуем потенциальное применение этой технологии в сельском хозяйстве.

Механизмы дезинфицирующего эффекта нетермальной плазмы

Механизмы обеззараживания семян при помощи плазмы до сих пор полностью не изучены, однако некоторые процессы можно определить. В частности, реактивные частицы, электроны, заряженные частицы и ультрафиолетовое излучение, генерируемые плазмой, имеют потенциальную способность наносить вред микроорганизмам [8]. Окислительное повреждение макромолекул, таких как мембранные липиды, белки и ДНК, может происходить под

влиянием реактивных частиц, генерируемых плазмой. Снижение внутриклеточного pH из-за диффузии в микробные клетки может нарушать гомеостаз pH [9]. В то же время, заряженные частицы, накапливающиеся на поверхности, могут вызывать электростатическое разрушение мембран микробных клеток. Ультрафиолетовое излучение плазмы может вызвать повреждение ДНК [8, 9].

При этом стоит отметить, что, несмотря на вред, наносимый микроорганизмам, взаимодействие плазмы с поверхностью семян также может вносить свой вклад в процесс инактивации микробов. Физико-химические изменения, происходящие на поверхности семян под воздействием плазмы, могут нанести вред микробам [8]. Но для полного понимания механизмов, лежащих в основе инактивации микробов плазмой, требуются дальнейшие исследования.

Одним из новых направлений в применении плазмы стала «вакцинация растений». Плазма, генерируя активные формы кислорода и азота (АФКА), которые являются хорошо изученными сигнальными молекулами, регулируемыми стрессовые реакции у растений, способна индуцировать устойчивость к болезням (резистентность) [9].

Эта гипотеза нашла подтверждение в ряде исследований. Например, в одном из них было показано, что прорастание и рост семян томата увеличиваются после обработки плазмой, и растения становятся более устойчивыми к бактериальному увяданию листьев [8]. Это указывает на возможность использования плазмы не только в качестве средства для борьбы с уже существующими заболеваниями растений, но и в качестве профилактического средства, усиливающего естественную резистентность растений к болезням.

Однако для более глубокого понимания механизмов, лежащих в основе этих эффектов, и определения оптимальных параметров плазменной обработки для различных видов растений и болезней, необходимо провести дополнительные исследования.

Обработка НААП грибковых фитопатогенов

Применение нетермальной плазмы в борьбе с болезнями растений, распространяемыми через зараженные семена, в основном осуществляется путем прямого воздействия плазмы на семена, либо путем воздействия газа, генерируемого плазмой, или воды, обработанной плазмой [8-10].

Для предотвращения болезней, передаваемых через зараженные семена, необходимо обеспечить инактивацию патогенных микроорганизмов, поражающих семена. В ряде исследований прямая плазменная обработка семян использовалась наиболее часто [11, 12].

Газ, генерируемый плазмой, и вода, обработанная плазмой, также применялись для дезинфекции семян. В нескольких работах было отмечено улучшенное прорастание семян и обеззараживание

микроорганизмов после обработки плазмой [13, 14]. Это может быть результатом удаления патогенных микроорганизмов или активации процесса прорастания семян самой плазмой.

Во многих исследованиях плазменная обработка не показывала отрицательного влияния на жизнеспособность семян, включая прорастание и последующий рост [13, 14]. Эти результаты подтверждают перспективность плазменной обработки как метода обеззараживания.

Множество исследований свидетельствуют об эффективности уничтожения спор грибов при помощи плазмы, генерируемой с использованием диэлектрического барьерного разряда [15]. В частности, в исследовании [15] авторы разработали плазменное устройство, которое производит атомарный водород для дезактивации грибковых патогенов. Авторы предположили, что атомарный водород, производимый плазменным устройством, играет решающую роль в процессе инактивации спор грибов [15].

Выводы

Исходя из обзора научной литературы, проведенного в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Нетермальная атмосферная аргоновая плазма (НААП) вносит значительный вклад в борьбу с болезнями растений, распространяемыми через зараженные семена, при помощи прямого воздействия плазмы на семена или воздействия газа, генерируемого плазмой, и воды, обработанной плазмой.

2. Плазменная обработка эффективна для обеззараживания семян, причем такая обработка не только не угнетает прорастание, но и во многих случаях даже улучшает эти показатели.

3. Использование плазмы, генерируемой с использованием диэлектрического барьерного разряда, показывает высокую эффективность уничтожения спор грибов. В частности, плазменное устройство, производящее атомарный водород, способно дезактивировать грибковые патогены.

Все эти факты свидетельствуют о большом потенциале использования нетермальной атмосферной плазмы в сельском хозяйстве и микробиологии для обеззараживания семян и борьбы с грибковыми патогенами.

Дальнейшие исследования в этой области обязательны для определения оптимальных параметров плазменной обработки и дальнейшего расширения ее применения.

Список литературы

1. WHO fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action. Switzerland, Geneva: World Health Organization (WHO), 2022. 48 p.
2. Oerke E.C. Crop losses to pests // J. Agric. Sci. 2006. Vol. 144. PP. 31-43.

3. Elad Y., Pertot I. Climate change impact on plant pathogens and plant diseases // *J. Crop Improv.* 2014. Vol. 28. PP. 99-139.
4. A review on microbiological decontamination of fresh produce with nonthermal plasma / C. Pignata, D. D'Angelo, E. Fea, G. Gilli // *J. Appl. Microbiol.* 2017. Vol. 122. PP. 1438-1455.
5. Sakudo A., Yagyu Y., Onodera T. Disinfection and sterilization using plasma technology: fundamentals and future perspectives for biological applications // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20. PP. 5216.
6. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies / M. Ito [et al.] // *Plasma Processes Polym.* 2017. Vol. 15. PP. 1700073.
7. Plant Disease Control by Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma / B. Adhikari [et al.] // *Frontiers in Plant Science.* 2020. Vol. 11. PP. 1-15.
8. Improving microbiological safety and quality characteristics of wheat and barley by high voltage atmospheric cold plasma closed processing / A. Los, D. Zizuzina, S. Akkermans [et al.] // *Food Res. Int.* 2018. Vol. 106. PP. 509-521.
9. Differential inactivation of fungal spores in water and on seeds by ozone and arc discharge plasma / M.H. Kang, A. Pengkit, K. Choi [et al.] // *PloS One.* 2015. Vol. 10.
10. Low-pressure plasma application for the inactivation of the seedborne pathogen *Xanthomonas campestris* / T. Nishioka, Y. Takai, T. Mishima [et al.] // *Biocontrol Sci.* 2016. Vol. 21. PP. 37-43.
11. Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma / A. Mitra, Y.F. Li, T.G. Klämpfl [et al.] // *Food Bioprocess Technol.* 2014. Vol. 7. PP. 645-653.
12. The effect of lowtemperature plasma on fungus colonization of winter wheat grain and seed quality / L. Kordas, W. Pusz, T. Czapka, R. Kacprzyk // *Pol. J. Environ. Stud.* 2015. Vol. 24. PP. 433-438.
13. Selcuk M., Oksuz L., Basaran P. Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus spp.* and *Penicillium spp.* by cold plasma treatment // *Bioresour. Technol.* 2008. Vol. 99. PP. 5104-5109.
14. A non-thermal plasma seed treatment method for management of a seedborne fungal pathogen on rice seed / Y. K. Jo, J. Cho, T.C. Tsai [et al.] // *Crop Sci.* 2014. Vol. 54. PP. 796-803.
15. Novel atmospheric pressure plasma device releasing atomic hydrogen: reduction of microbial-contaminants and OH radicals in the air / H. Nojima, R.E. Park, J.H. Kwon [et al.] // *J. Phys.* 2007. Vol. 40. P. 501.

USING NON-THERMAL PLASMA FOR FUNGAL PHYTOPATHOGEN CONTROL: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

Shishko V.I.^a, Petrukhina D.I.^b, Tkhorik. O.V.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^avalentine585@yandex.ru; ^bpetrukhina.dari@yandex.ru*

This study examines the use of non-thermal atmospheric argon plasma (NTAAP) to control plant diseases, in particular to disinfect seeds from fungal pathogens. NTAAP treatment effectively reduces microbial load on seeds, improves their germination and growth, and even inactivates fungal pathogens. This effect is achieved by the direct influence of the plasma on the seeds, as well as by the plasma-generated gas, and plasma-treated water. This paper presents a review of scientific studies confirming the effectiveness of using NTAAP in agriculture and microbiology for seed disinfection and fungal pathogen control.

Keywords: NTAAP, non-thermal atmospheric argon plasma, fungal pathogens, seed disinfection, agriculture, biological safety

Секция

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ**

**FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF RADIOECOLOGY
AND AGROECOLOGY**



ИЗМЕНЕНИЕ ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ *HORDEUM VULGARE* L. ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИРКОНА, P И ДРУГИХ РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ

Бабина К.В.^{1,а}, Амосова Н.В.¹, Русинов Д.А.², Азарова А.Б.³

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии», 143050, Московская обл., Одинцовский р-он, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5, Российская Федерация

³ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2, корп. 2, Российская Федерация
e-mail: ^а babinakv@oiate.ru

Выявление ростостимулирующего действия регуляторов роста растений на проростки зерновой культуры – важный этап скрининга химических соединений по определенным критериям. Сравнительная характеристика эталонного препарата для обработки семян ячменя с эффективностью биорегуляторов нового поколения позволяет изучить тенденции изменения цитогенетических показателей и создать платформу отбора наиболее перспективных из них с целью внедрения в сельскохозяйственную практику.

Ключевые слова: ячмень, регуляторы роста, циркон, хромосомные аберрации

Глобальный рост населения планеты, особенно в последние десятилетия, обостряет проблему способности человечества в полной мере обеспечить себя необходимым продовольствием. Одним из возможных решений может стать повышение продуктивности сельскохозяйственных культур и качества продукции в целом, что может быть достигнуто, в том числе, за счет применения регуляторов роста растений (PPP) [1].

Важной характеристикой PPP является их позитивное влияние на устойчивость растений к различным неблагоприятным факторам среды. Усиливающееся антропогенное давление на компоненты биосферы приводит к трансформации биологических систем в сторону ухудшения экологической обстановки, нарушения температурных режимов и появления в среде агентов физической и химической природы, нарушающих рост и развитие растений (тяжелые металлы, радионуклиды, гербициды, токсианты). Внедрение же PPP в технологии возделывания сельскохозяйственных культур дает возможность преодолеть последствия техногенного воздействия и расширить границы используемых для сельскохозяйственного производства земель [2].

В работе приведено сравнение действия природного регулятора роста Циркона, P (разрешен для применения на территории РФ) и синтезированных росторегулирующих препаратов: N, N'-дефенилмочевина (NN-ДФМ) и биостимулятора роста, полученного по разработанной во ФГБНУ ВНИИ

фитопатологии уникальной технологии жидкофазного каталитического окисления крахмалосодержащего растительного сырья – отходов производства картофеля на цитогенетические показатели ячменя ярового сорта Калькюль.

Циркон, P – природное фенольное соединение, действующим веществом которого является комплекс гидроксикоричных кислот. Воздействуя системно, он активизирует рост, цветение и плодоношение растений, а также повышает их устойчивость к абиотическим и биотическим факторам [5].

N, N'-дифенилмочевина - **N-(1,2,4-триазол-4-ил)-N'-фенилмочевина** (номер cas102-07-8) – относится к классу регуляторов роста растений с цитокининовой или цитокининоподобной активностью – ароматическим мочевинам.

Биостимулятор роста содержит комплекс фитогормонов цитокининовой и гиббереллиновой природы, свободные аминокислоты и гидроксикоричные кислоты, обладающие биологической активностью.

Регуляторы роста растений применяли для обработки семян ячменя ярового перед посевом: Циркон, P – в концентрации 1 мл/л; N, N'-дифенилмочевина (NN-ДФМ), в концентрации 10⁻⁵ М; биостимулятор роста (Биостимулятор), в концентрациях 10⁻⁴, 10⁻⁵ и 10⁻⁶ мл/л.

Семена ячменя (по 50 шт.) помещали в чашки Петри и замачивали в 10 мл дистиллированной воды. Прорастивание семян осуществляли при температуре

25 °С в течение 2 сут в термостате. Повторность опыта – 4-х кратная.

Частоту aberrантных клеток (ЧАК) и митотический индекс (МИ) в клетках корневой меристемы проростков ячменя оценивали через 2 сут проращивания семян, когда длина проростков достигала 5-10 мм (ЧАК – отношение суммы ана- и телофазных клеток, в которых были зарегистрированы нарушения, к общему числу проанализированных ана-телефаз первого деления меристематических клеток корневой меристемы проростков; МИ – митотический индекс, процент делящихся клеток от общего числа проанализированных). Образцы фиксировали в уксусном спирте (3:1). Цитогенетический анализ проводили в ана-телофазах на временных давленных препаратах, окрашенных ацетокармином. Давленные препараты просматривали под микроскопом при увеличении 400. В каждом варианте анализировали от 900 до 1500 ана-телофаз [4].

Для обработки результатов исследования использовали стандартные статистические методы анализа данных. Достоверность различий определяли по U-критерию Манна-Уитни.

Значимое повышение МИ по сравнению с контролем зафиксировано во всех вариантах опыта кроме вариантов использования Биостимулятора в концентрациях 10^{-4} мл/л и 10^{-5} мл/л, где, напротив, происходит его уменьшение. Сопоставление МИ исследуемых регуляторов роста с эффектами Циркона свидетельствует о том, что существенное увеличение величины показателя происходит только при концентрации Биостимулятора 10^{-6} мл/л и при обработке семян N, N'-дефенилмочевиной (табл. 1).

Использование NN-DFM приводит к достоверному как по сравнению с контролем снижению ЧАК (на 72,7 %), так и с вариантом использования Циркона (на 42,9 %). При этом число делящихся клеток (по показателю МИ) выше (на 44,4 % и 28,4 % в том же сравнении), что свидетельствует о высокой пролиферативной способности клеток. Следует отметить, что применение Биостимулятора в концентрации 10^{-6} мл/л также приводит к снижению ЧАК на 83 % по сравнению с контролем (различия значимы при $p < 0,05$).

Таблица 1

Влияние регуляторов роста на цитогенетические показатели у проростков ячменя ярового сорта Калькюль

Вариант	Митотический индекс, %	Частота aberrантных клеток, %
Контроль	7,2±0,8	1,1±0,12
Циркон, P	8,1±0,2*	0,7±0,11
NN-DFM	10,4±0,2*▲	0,3±0,07*
Биостимулятор (10^{-4})	5,4±0,1*▲	2,5±0,10*▲
Биостимулятор (10^{-5})	6,1±0,7*▲	1,8±0,09*▲
Биостимулятор (10^{-6})	9,3±0,5*▲	0,6±0,04*

* – различия с контролем значимы при $p < 0,05$; ▲ – различия с вариантом Циркон значимы при $p < 0,05$

Исходя из вышеизложенного, можно сделать заключение о целесообразности применения тестируемых росторегулирующих препаратов – N, N'-дефенилмочевины и Биостимулятора в концентрации 10^{-6} мл/л, поскольку именно они имели наиболее выраженные изменения показателей в положительную сторону. Вероятно, это связано с их цитокиновой (цитокинподобной) природой и биологической активностью, способствующих повышению как качественных и количественных характеристик урожая, активизации формообразовательных и ростовых процессов, так и инициации экспрессии генов, которые кодируют транскрипционные факторы, запускающие антиоксидантные системы [3, 5, 6].

Список литературы

1. Карпова Г.А., Теплицкая Д.Г. Влияние регуляторов роста на формообразовательные, ростовые и физиологические процессы в онтогенезе растений пшеницы и ячменя // Известия высших учебных

заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2019. № 4(28). С. 16-25.

2. Костин В.И. Изменения реакций растений под действием регуляторов роста, физических и химических факторов и устойчивость к стрессу в онтогенезе озимых культур // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 2(26). С. 55-69.

3. Котляров Д.В., Котляров В.В., Федулов Ю.П. Физиологически активные вещества в агротехнологиях. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2016. 224 с.

4. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1998. 520 с.

5. Чмелева С.И., Кучер Е.Н., Соловей Я.Н. Использование препарата циркон для повышения холодоустойчивости пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2015. Т. 1(67). № 3. С. 73-80.

CHANGES IN THE CYTOGENETIC INDICATORS OF HORDEUM VULGARE L. UNDER THE ACTION OF ZIRCON, P AND OTHER PLANT GROWTH REGULATORS

Babina K.V.^{1,a}, Amosova N.V.¹, Rusinov D.A.², Azarova A.B.³

¹ *Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039*

² *Federal State Budgetary Scientific Establishment the All-Russian Scientific Research Institute of a Phytopathology, Institute st. 5, r.p. Bolshie Vyazemy, Moscow region, Odintsovsky district, Russian Federation, 143050*

³ *Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya st. 2, bld. 2, Pushchino, Moscow region, Russian Federation, 142290*

e-mail: ^a *babinakv@oiate.ru*

Identification of the growth-stimulating effect of plant growth regulators on cereal seedlings is an important stage in the screening of chemical compounds according to certain criteria. Comparative characteristics of the reference preparation for the treatment of barley seeds with the effectiveness of new generation bioregulators allows us to study the trends in changes in cytogenetic parameters and create a platform for selecting the most promising of them in order to introduce them into agricultural practice.

Keywords: *barley, growth regulators, zircon, chromosome aberrations*

The global population growth of the planet exacerbates the problem of humanity's ability to fully provide itself with the necessary food. One of the possible solutions may be to increase the productivity of agricultural crops and the quality of products in general, which can be achieved, among other things, through the use of plant growth regulators (PGRs) [1].

An important characteristic of PGRs is their positive effect on plant resistance to various adverse environmental factors. Increasing anthropogenic pressure on the components of the biosphere leads to the transformation of biological systems in the direction of environmental degradation, violation of temperature regimes and the appearance in the environment of

agents of a physical and chemical nature that disrupt the growth and development of plants. The introduction of PPP in crop cultivation technology makes it possible to overcome the consequences of technogenic impact and expand the boundaries of land used for agricultural production [2].

The paper compares the action of the natural growth regulator Zircon, P and synthesized growth-regulating drugs: N, N'-dephenylurea (NN-DFM) and a growth biostimulant obtained using the unique technology of liquid-phase catalytic oxidation of starch-containing vegetable raw materials - waste products of potato production on the cytogenetic parameters of barley of the Kalkul spring variety.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ АКТИНОБАКТЕРИЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ ДЛЯ БИОЛОГИЗАЦИИ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Батаева Ю.В.^{1,а}, Григорян Л.Н.^{2,б}

¹ Федеральное бюджетное учреждение науки «Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 142279, Московская область, г.о. Серпухов, п. Оболенск, д. 24, Территория «Квартал А», Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное государственное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20а, Российская Федерация
e-mail: ^а aveatab@mail.ru, ^б lilyagrigoryan90@gmail.com

В результате проведенных исследований разработаны схемы получения экспериментальных образцов биопрепаратов на основе штаммов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), *Nocardioopsis umidischolae* RCAM04882, *Nocardioopsis umidischolae* RCAM04883 и цианобактерий *Anabaena constricta* IPPASB-2020 для использования в качестве биоудобрений и средств защиты растений в растениеводстве.

Ключевые слова: экспериментальные образцы, биопрепарат, актинобактерии, цианобактерии, технология получения

Аридный климат и агрогенно преобразованные территории определяют экологические и физико-химические условия существования микроорганизмов, которые характеризуются высокой активностью. Наиболее адаптированными к таким условиям являются цианобактерии и актинобактерии, изучение функциональной активности которых является перспективным направлением для фундаментальных и прикладных исследований при использовании штаммов или их вторичных метаболитов, направленных на развитие органического земледелия.

В результате проведенных исследований из почвенных экосистем Астраханской области выделены штаммы актинобактерий *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), *Nocardioopsis umidischolae* RCAM04882, *Nocardioopsis umidischolae* RCAM04883 и цианобактерий *Anabaena constricta* IPPASB-2020. Штаммы депонированы в международные коллекции: НУ ВНИИСХМ, ГКПМ-Оболенск, IPPAS, GenBank NCBI.

Разработаны технологии получения экспериментальных образцов биопрепаратов, которые прошли лабораторные и полевые испытания на томатах, перце, картофеле, хлопчатнике [1].

Цианобактерии *A. constricta* IPPASB-2020 культивировали в вихревом биореакторе (БИОК-022) при температуре 28 °С в течение 5 суток при 60 об/мин с люминесцентной лампой (4000 кельвин). Посевной материал вносили в количестве 20 % от ее общего объема. За это время происходило максимальное наращивание биомассы – 47 мг/м²/ч сухого вещества. Полученную биомассу высушивали в термостате при температуре 37 °С до постоянного веса и измельчали. Для обработки семян и растений использовали суспензию, полученную путем

разведения сухой биомассы в воде. Результатом от использования цианобактерий является увеличение всхожести семян, повышение энергии роста и урожайности растений, защита от фитопатогенов в условиях аридного климата [2].

Комплексную схему изготовления экспериментальных образцов биопрепаратов на основе актинобактерий можно представить следующим образом: штаммы *N. umidischolae* RCAM04882, *N. umidischolae* RCAM04883 и *S. carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) (каждый по отдельности) выращивали в вихревом биореакторе (БИОК-022) на картофельной среде (рН = 7,0) при температуре плюс 28 °С в течение 72 часов при равномерном перемешивании и постоянной аэрации. Далее в полученные суспензии (живые клетки, споры и продукты метаболизма) с титром клеток 10⁹ КОЕ/мл в качестве загустителя добавляли карбоксиметилцеллюлозу в количестве 1 %. Схема получения экспериментальных образцов на основе штаммов актинобактерий позволяет получать бактериальные препараты в любой микробиологической лаборатории при минимальных производственных затратах.

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора.

Список литературы

1. Григорян Л.Н., Батаева Ю.В. Почвенные актиномицеты аридной зоны и их биологическая активность: монография. Астрахань: АГУ им. В.Н. Татищева, 2023. 158 с.

2. Способ стимуляции роста и развития растений, повышения урожайности и защиты от

фитопатогенных грибов в Аридной зоне: пат. 2634387 С2 Российская Федерация, МПК А01N 63/02. / Ю.В. Батаева, И.С. Дзержинская; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет». № 2015143855; заявл. 19.04.2017; опубл. 26.10.2017; Бюл. № 11.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR OBTAINING EXPERIMENTAL SAMPLES OF BIOLOGICAL PRODUCTS BASED ON ACTINOBACTERIA AND CYANOBACTERIA FOR BIOLOGIZATION OF AGRICULTURE

Bataeva Yu.V.^{1,a}, Grigoryan L.N.^{2,b}

¹ Federal Budgetary Institution of Science «State Scientific Center for Applied Microbiology and Biotechnology» of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human, Territory «Kvartal A» 24, Obolensk, Serpukhov, Moscow region, Russian Federation, 142279

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan Tatishchev State University», Tatishcheva st. 20a, Astrakhan, Russian Federation, 414056

e-mail: ^a aveatab@mail.ru, ^b lilyagrigoryan90@gmail.com

As a result of the conducted research, schemes have been developed for obtaining experimental samples of biological products based on strains of *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), *Nocardiopsis umidischolae* RCAM04882, *Nocardiopsis umidischolae* RCAM04883 and cyanobacteria *Anabaena constricta* IPPASB-2020 for use as biofertilizers and plant protection products in crop production.

Keywords: *experimental samples, biopreparation, actinobacteria, cyanobacteria, production technology*

Arid climate and agrogenically transformed territories determine the ecological and physico-chemical conditions of the existence of microorganisms, which are characterized by high activity. Cyanobacteria and actinobacteria are the most adapted to such conditions.

As a result of the conducted studies, strains of actinobacteria *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), *Nocardiopsis umidischolae* RCAM04882, *Nocardiopsis umidischolae* RCAM04883 and cyanobacteria *Anabaena constricta* IPPASB-2020 were isolated from the soil ecosystems of the Astrakhan region. The strains were deposited in international collections: NU VNIISHM, SKPM-Obolensk, IPPAS, GenBank NCBI.

Technologies have been developed for obtaining experimental samples of biological products that have passed laboratory and field tests on tomatoes, peppers,

potatoes, cotton [1]. Cyanobacteria *A. constricta* IPPASB-2020 were cultured in a vortex bioreactor at a temperature of 28 °C for 5 days at 60 revolutions per minute with a fluorescent lamp (4000 kelvin). The seed material was introduced in the amount of 20 % of its total volume. The resulting biomass was dried in a thermostat at 37 °C to a constant weight and crushed [2]. Actinobacteria strains were grown in a vortex bioreactor on potato medium (pH = 7.0) at a temperature of plus 28 °C for 72 hours with uniform stirring and constant aeration. Further, carboxymethylcellulose in an amount of 1 % was added to the suspension with a concentration of 10⁹ cells per milliliter as a thickener.

The work was carried out within the framework of the industry research program of Rospotrebnadzor.

ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО УФ- И ОСТРОГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЯЧМЕНЯ ЯРОВОГО

Гусева О.А.^а, Цыгвинцев П.Н., Гончарова Л.И.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^аgusevaoks65@yandex.ru*

В вегетационном эксперименте оценено влияние хронического УФ-излучения, острого гамма-облучения и их сочетанного действия на растения ячменя ярового. Было выявлено, что ультрафиолет В способствует накоплению флавоноидов, каротиноидов и увеличивает коэффициент нефотохимического тушения при воздействии как в виде чистого облучения, так и в сочетании с ультрафиолетом А и гамма-излучением.

Ключевые слова: *УФ-А, УФ-В, гамма-облучение, флавоноиды, хлорофиллы, каротиноиды, коэффициент нефотохимического тушения, ячмень яровой*

Изучение физиолого-биохимических процессов и устойчивости растений к неблагоприятным факторам окружающей среды имеет важное значение [1]. Известно, что физиологические и биохимические параметры растений характеризуют широкий спектр процессов и реагируют на стрессовые факторы окружающей среды [2]. Например, из всего спектра солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения поверхности Земли достигают волны УФ-А и УФ-В диапазонов, в то время как УФ-С поглощается в основном кислородом в стратосфере. При этом излучение УФ-В (длина волны 280-320 нм) является высокоэнергетичным и способно генерировать избыточное количество активных форм кислорода (АФК) в клетках растений, с возможным повреждением молекул ДНК, белков, мембран и фотосинтетического аппарата [2]. Также одними из важных ответных реакций растений на влияние ультрафиолетового и ионизирующего излучений являются изменения процессов роста, воспроизводства, развития, а также физиолого-биохимическая перестройка метаболических процессов [3].

В настоящей работе изучалось влияние повышенных доз хронического УФ-излучения, острого γ -облучения и их сочетанного действия фотосинтетические и биохимические показатели на растения ячменя ярового сорта «Владимир» в вегетационном эксперименте. Спектрофотометрическим методом с помощью спектрофотометра UNICO-1201 (производитель ООО «ЮНИКО-СИС», РФ, Санкт-Петербург) определялось содержание хлорофиллов а, b и каротиноидов с выделением в этаноле 96 % по методике Lichtenhaler H.K. et al. [4], флавоноидов – по методике Tevini M et al. [5]. Определение параметра флуоресценции хлорофилла – нефотохимического тушения (qN) – проводили с помощью амплитудно-

импульсного флуориметра Junior-PAM (Walz Inc., Effeltrich, Germany).

Хроническое УФ-А облучение осуществлялось с помощью ламп Black Light BLUE фирмы Philips, УФ-В излучения – с помощью ламп ЛЭР-40 от момента появления всходов (формирование 4-5 настоящих листьев) до фазы полной спелости. Длительность облучения растений составляла 6 часов в сутки: с 10 утра до 16 вечера. При достижении фазы выход в трубку растения подвергали острому γ -облучению, которое проводили на установке ГУР-120, расположенной на территории НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (источник γ -квантов – ^{60}Co). Мощность дозы γ -излучения составляла 78 Гр/час, суточная мощность дозы УФ-А излучения в разных вариантах – 44 и 88 мкВт/см², УФ-В излучения – 47 мкВт/см².

Статистическую обработку данных проводили с помощью стандартных методов биометрии, достоверное отличие от контроля ($p < 0,05$) рассчитывали на основе t-критерия Стьюдента для средних. Обработка показателей флуориметра осуществлялась с помощью полнофункционального ПО Wincontrol-3.

По достижении ячменем стадии выхода в трубку и после проведения дополнительного острого γ -облучения отбирали растительный материал для определения содержания биохимических и фотосинтетических показателей. Анализ полученных данных показал, что при влиянии чистого УФ-В излучения и при его добавлении к УФ-А излучению (доза облучения 13,7 кДж/м²) наблюдается достоверное повышение ($p < 0,05$) содержания флавоноидов на 51 % и 49 % соответственно относительно контроля. Также выявлено достоверное увеличение ($p < 0,05$) показателя после γ -облучения при исследуемых дозах в среднем на 13 % относительно контроля (табл. 1). Наблюдалось достоверное повышение ($p < 0,05$) флавоноидов и при сочетанном облучении в исследуемых группах

9 и 10 на 30 % и 51 % соответственно относительно контроля.

При изучении влияния ультрафиолетового и γ -излучения на растения ячменя в целом не наблюдались изменения в содержании хлорофиллов *a* и *b*. При сочетанном облучении УФ-А+УФ-В (группа 6) наблюдалось снижение хлорофиллов *a* и *b* на 62 %

относительно контроля. Содержание каротиноидов в исследуемых вариантах в целом также не отличалось от контрольного показателя, однако, добавление УФ-В излучения как в сочетанном с УФ-А и γ -излучением, так и в чистом облучении способствовало увеличению параметра в среднем на 23 % относительно контроля.

Таблица 1

Изменение содержания флавоноидов при влиянии хронического УФ- и острого γ -излучения (* – достоверное отличие от контроля, $p < 0,05$)

Исследуемая группа	Доза облучения			Содержание флавоноидов, мг/100 г
	УФ-А, кДж/м ² в сутки	УФ-В, кДж/м ² в сутки	γ , Гр	
Контроль	0	0	0	524,15±0,53
1	13,7	0	0	523,91±48,90
2	27,4	0	0	443,06±14,09
3	0	14,5	0	795,75±8,15*
4	0	0	4	613,88±6,60*
5	0	0	2	576,53±0,69*
6	13,7	14,5	0	785,75±1,06*
7	13,7	0	4	588,22±9,85
8	13,7	0	2	520,69±29,63
9	13,7	14,5	4	680,53±4,16*
10	13,7	14,5	2	791,26±6,98*
11	27,4	14,5	0	544,18±41,63
12	27,4	0	4	536,67±0,13*
13	27,4	0	2	470,83±5,93
14	27,4	14,5	4	539,70±89,10
15	27,4	14,5	2	287,97±33,75
16	0	14,5	4	278,24±55,52
17	0	14,5	2	361,41±46,94

Таблица 2

Изменение содержания фотосинтетических пигментов при влиянии хронического УФ- и острого γ -излучения

Исследуемая группа	Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/100 г	Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/100 г	Содержание каротиноидов, мг/100 г
Контроль	98,88±4,84	42,77±2,08	19,46±0,83
1	69,24±1,24	30,34±0,42	14,08±0,23
2	100,15±0,59	44,01±0,31	19,93±0,30
3	103,84±0,71	38,10±0,98	23,49±0,044
4	88,70±1,55	35,45±4,08	17,30±0,50
5	81,41±6,13	36,19±2,40	15,62±1,23
6	37,06±4,73	37,05±1,65	24,25±1,08
7	97,66±0,84	43,13±0,24	19,55±0,30
8	74,79±12,50	33,41±5,89	14,93±2,39
9	118,33±2,22	41,89±0,60	26,40±0,89
10	86,04±4,02	30,68±1,67	20,07±1,28
11	96,54±4,17	29,01±4,40	22,92±0,49

Исследуемая группа	Содержание хлорофилла <i>a</i> , мг/100 г	Содержание хлорофилла <i>b</i> , мг/100 г	Содержание каротиноидов, мг/100 г
12	111,56±1,85	40,57±0,39	24,96±0,39
13	94,38±0,12	33,67±0,05	21,14±0,38
14	96,81±2,34	43,00±1,21	19,44±0,36
15	71,88±3,63	32,20±1,72	14,02±2,39
16	100,25±2,29	35,68±2,29	22,11±1,95
17	97,53±5,56	30,14±5,56	22,76±0,69

Как видно из рисунка 1, увеличение коэффициента нефотохимического тушения относительно контроля наблюдается в случае действия УФ-В и гамма-облучения в дозе 4 Гр. Данный эффект пропадает при сочетанном их действии с УФ-А в минимальной дозе

(13,7 кДж/м²). Данные наблюдения показывают, что действие УФ-В и УФ-А излучений имеют не совсем аддитивный характер и их спектры действия не могут быть совмещены в общем случае.

Коэффициент нефотохимического тушения (qN), отн. ед.

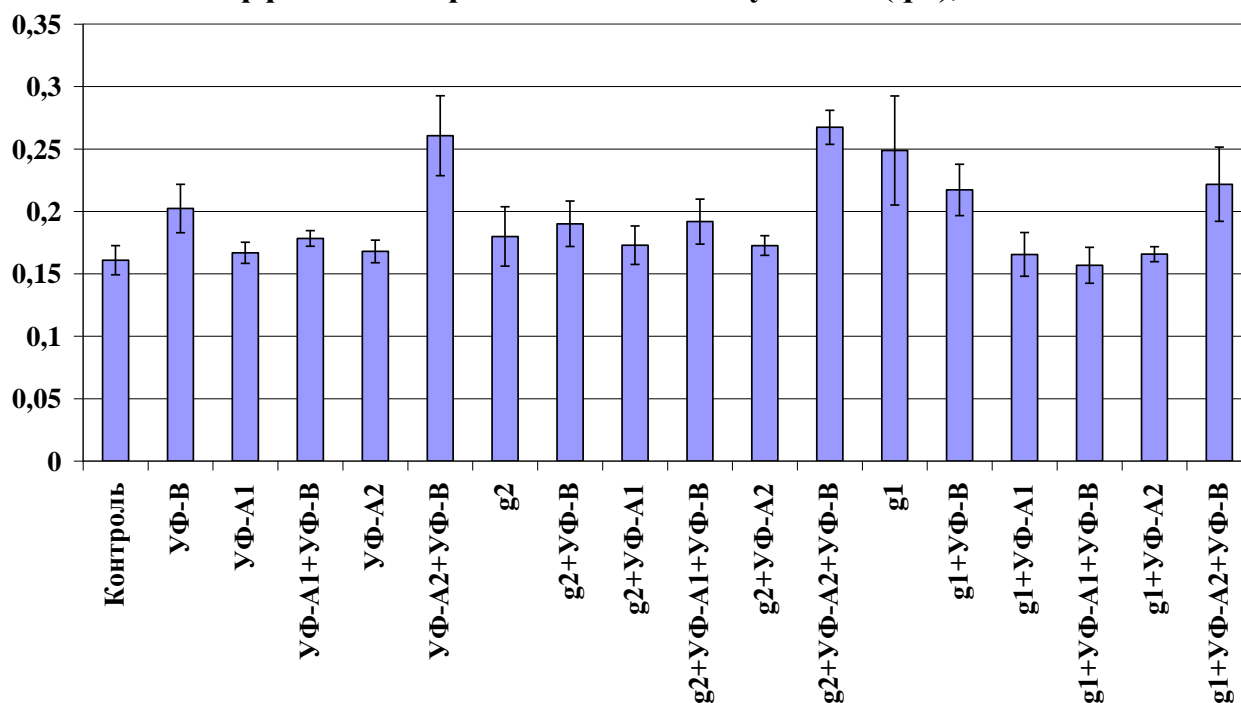


Рисунок 1. Динамика коэффициента qN при влиянии хронического УФ- и острого γ -излучения

Таким образом, наибольшее влияние на изменение содержания биохимических и фотосинтетических параметров оказывает УФ-В излучение, обладающее большей энергией квантов, как в одиночном, так и в сочетанном действии с УФ-А с дозой облучения 27,4 кДж/м² и γ -излучением.

Список литературы

1. Гапоненко В.И., Шамаль Н.В. Фотосинтетические пигменты и продукционная способность растений ячменя под влиянием предпосевного гамма-облучения семян и кратковременной засухи // Теоретические и прикладные аспекты биохимии и биотехнологии растений: сб. науч. тр. 3-й междунар. науч. конф., 14-16

мая 2008 г., Минск: к 50-летию Отд. биохимии и биотехнологии растений. Минск: Изд. центр БГУ, 2008. 562 с.

2. Lee J.H., Shibata S., Goto E. Time-Course of Changes in Photosynthesis and Secondary Metabolites in Canola (*Brassica napus*) Under Different UV-B Irradiation Levels in a Plant Factory With Artificial Light // Front. Plant Sci. 2021. Vol. 12. doi: 10.3389/fpls.2021.786555

3. Биохимические механизмы адаптации растений в условиях радиационного воздействия / Е.П. Храмова, Г.И. Высочина, О.В. Тарасов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2008. Вып. 16. С. 259-267.

4. Lichtenhaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // Biochemical Society of Transaction. 1983. Vol. 11. PP. 591-592.

5. Tevini M., Iwanzik W., Thoma U. Some effects of enhanced UV-B irradiation on the growth and composition of plants // Planta. 1981. Vol. 153. PP. 388-394.

EFFECT OF CHRONIC UV- AND ACUTE GAMMA-RADIATION ON BIOCHEMICAL AND PHOTOSYNTHETIC PARAMETERS OF BARLEY

Guseva O.A.^a, Tsygvintsev P.N., Goncharova L.I.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^agusevaoks65@yandex.ru

In a vegetation experiment, the effect of chronic UV radiation, acute gamma irradiation and their combined effects on spring barley plants were assessed. It was found that ultraviolet B contributes to the accumulation of flavonoids, carotenoids and increases the coefficient of non-photochemical quenching when exposed both as pure irradiation and in combination with ultraviolet A and gamma-radiation.

Keywords: *ultraviolet A, ultraviolet B, gamma-radiation, flavonoids, chlorophylls, carotenoids, non-photochemical quenching coefficient, barley*

Plant material was sampled to determine the content of biochemical and photosynthetic parameters when the barley reached the phase «Exit into the tube» and after additional acute gamma-irradiation. Data analysis showed that under the influence of pure UV-B radiation and when it was added to UV-A₁ radiation (irradiation dose 13.7 kJ/m²), a significant increase ($p < 0.05$) in the content of flavonoids by 51% and 49%, respectively, was observed regarding control. A significant increase ($p < 0.05$) of the index after gamma-irradiation at the studied doses by an average of 13 % relative to the control was also revealed. There was a significant increase ($p < 0.05$) of flavonoids in combined exposure to UV-A₁+UV-B+gamma 1 and UV-A₁+UV-B+gamma 2 by 30 % and 51 %, respectively, relative to the control. When studying the effect of ultraviolet and gamma-radiation on barley plants, in general, no

change was observed in the content of such photosynthetic pigments as chlorophylls *a* and *b*. With combined exposure to UV-A₁ + UV-B, a decrease in chlorophylls *a* and *b* by 62 % was observed relative to the control. The content of carotenoids in the studied variants in general also did not differ from the control. The addition of UV-B radiation, both in combination with UV-A and gamma-radiation, and in pure irradiation, contributed to an increase in the parameter by an average of 23 % relative to the control. An increase in the non-photochemical quenching coefficient relative to the control is observed under the action of UV-B and gamma-irradiation at a dose of 4 Gy. This effect disappears when combined with UV-A at the minimum dose (13.7 kJ/m²). These observations show that the effects of UV-B and UV-A radiation are not quite additive and their action spectra cannot be combined in the general case.

УДК 546.47+546.56:633.16:546.47/49

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ЦИНКА И МЕДИ НА ТОКСИЧЕСКИЙ СТРЕСС, ВЫЗВАННЫЙ У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ КАДМИЕМ

Дикарев А.В.^a, Дикарев Д.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

e-mail: ^aar.djuna@yandex.ru

Был выполнен вегетационный эксперимент, в котором на дерново-подзолистой супесчаной почве выращивали яровой двурядный ячмень сорта «Зазерский 85». В почву вносился кадмий в двух концентрациях: только Cd^{2+} и Cd^{2+} в различных сочетаниях с цинком или медью. Выясняли, как внесение микроэлементов модифицирует токсическое действие тяжелого металла (ТМ), не имеющего выраженных физиологических функций. Показано, что внесение одного кадмия ведет к значимому угнетению процессов роста и развития растений ячменя. Цинк ослаблял токсическое воздействие кадмия; такое стимулирующее действие проявлялось тем ярче, чем выше была доза цинка, а его токсичность при рассмотренных дозах не обнаруживалась. Медь оказывала стимулирующее действие при меньших дозах, нежели чем цинк, а при более высоких наблюдалось развитие острого стресса, вызванного совместным токсическим воздействием двух ТМ.

Ключевые слова: ячмень, кадмий, медь, цинк, устойчивость к тяжелым металлам

Кадмий – один из наиболее опасных и распространенных тяжелых металлов. Он способен серьезно ограничивать продуктивность сельского хозяйства, что предопределяет необходимость исследования его воздействия на растительные организмы [1]. Медь и цинк также входят в группу ТМ, однако обладают важными физиологическими ролями, относясь к микроэлементам. Но при повышенном содержании в почве цинк и медь также оказывают токсическое воздействие на растения, вызывая эффекты, сходные с действием других ТМ [2]. Актуальность проблемы загрязнения агрофитосферы ТМ предопределяет необходимость изучения механизмов их поступления из почвы в растения, транспорта, распределения и аккумуляции в разных органах и клеточных структурах, а также их влияния на продуктивность и качество урожая. Стоит заметить, что в реальных условиях редко отмечается ситуация, когда почва загрязнена только одним ТМ, чаще встречаются смеси из нескольких металлов. Поэтому представляет особый интерес анализ комплексного воздействия нескольких ТМ на растения. В рамках этой проблематики становится актуальной работа, рассматривающая особенности синергического и антагонистического взаимодействия с одной стороны – кадмия, а с другой – меди и цинка.

Цель исследования – изучение ответа ярового ячменя на сочетанное воздействие токсического ТМ (кадмия) и различных концентраций двух ТМ – микроэлементов (медь и цинк) по морфометрическим, физиолого-биохимическим показателям и продуктивности.

Материалы и методы

Поведение Zn, Cu и Cd в системе «почва-растение» изучали в вегетационном опыте в теплице. Объект исследования – ячмень яровой двурядный (*Hordeum vulgare* L.) сорта «Зазерский 85», выращенный на дерново-подзолистой супесчаной почве. Физические и химические показатели почвы, концентрацию Zn, Cu и Cd в растениях, содержание подвижных форм и валовое количество элементов в почве определяли общепринятыми методами [3, 4]. Квазиравновесные почвенные растворы были получены в середине эксперимента с помощью центрифугирования. В извлеченных почвенных растворах определяли pH, содержание Zn, Cd, микро- и

макроэлементов. Концентрацию Zn и Cd в анализируемых растворах определяли методом ICP-OES. Получены данные по содержанию малонового диальдегида (МДА) [5], содержанию низкомолекулярных антиоксидантов [6], сырого протеина [7]. Оценены морфометрические параметры растений на 30-й день эксперимента, в конце вегетации проанализирована структура урожая.

Результаты и обсуждение

В эксперименте было выявлено, что внесение в почву токсического ТМ (кадмий) приводило к развитию стресса и заметному угнетению процессов роста и развития растений ярового ячменя. Если совместно с кадмием вносился другой ТМ, обладающий также свойствами микроэлемента (медь или цинк), то наблюдаемые эффекты в существенной мере изменялись. Конкретные особенности влияния смеси металлических ионов на растения зависели также от дозы поллютанта (кадмий) и микроэлемента (медь или цинк).

В целом добавление микроэлементов способствовало нивелированию токсических эффектов. При малых дозах микроэлемента стимулирующий эффект был выражен незначительно, а при высоких – постепенно исчезал, заменяясь совместным токсическим действием обоих ТМ. Цинк, обладая относительно невысокой токсичностью, проявлял себя в основном как стимулятор, почти не обнаруживая токсического воздействия, в то время как медь при высокой дозе действовала как поллютант, и растения оказывались подавленными в большей степени, чем при внесении одного кадмия. Наиболее ярко описанные эффекты проявлялись при более высокой (45 мг/кг) дозе кадмия, но куда слабее при относительно низкой (25 мг/кг).

Судя по внешнему виду и морфометрическим параметрам растений на 30-й день эксперимента, внесение цинка совместно с кадмием приводило к нивелированию токсического воздействия последнего и восстановлению процессов роста и развития ячменя до уровней, близких к контрольным. Отмечалась стимуляция при максимальной (150 мг/кг) дозе цинка. Медь при внесении в почву 25 мг/кг кадмия действовала похожим образом, но при дозе кадмия 45 мг/кг стимулирующий эффект меди отмечался лишь при низких ее дозах (50 мг/кг), в то время как при

высоких проявлялось токсическое действие меди; при максимальной (200 мг/кг) наблюдалось полное подавление процессов роста и развития растений.

Оценив содержание элементов в почве, удалось выяснить, что при высоких концентрациях меди (100 и 200 мг/кг), также как и при внесении в почву одного кадмия, отмечалось накопление по сравнению с контролем в почвенном растворе марганца, стронция, кальция и калия. Добавление вместо меди цинка возвращало уровни содержания этих элементов к близким с контрольными. Воздействие ТМ приводило к нарушению функций корня по поглощению питательных ионов, которые, вымываясь из почвы, накапливались в почвенном растворе. Внесение цинка и меди в низкой концентрации способствовало восстановлению функций ризодермы корня по селективному поглощению ионов и эндодермы по их транспорту в стелу.

Оценка биохимических параметров дала следующие результаты. При внесении в почву одного кадмия заметного роста содержания МДА в тканях не наблюдалось. По мере увеличения дозы вносимого совместно с кадмием цинка происходил некоторый рост содержания МДА, что свидетельствовало об определенном накоплении АФК. При относительно низкой (25 мг/кг) дозе кадмия внесение меди способствовало некоторому росту уровней содержания МДА, но по мере увеличения дозы меди отмечались разнонаправленные колебания этого показателя, и нельзя было говорить о развитии окислительного стресса. При более высокой дозе кадмия (45 мг/кг) и при максимальной концентрации меди (200 мг/кг) отмечался взрывной рост содержания МДА, но при более низких дозах меди значимых отличий от контроля не наблюдалось.

Наличие в почве ТМ действительно способствовало развитию окислительного стресса и связанного с ним процесса перекисного окисления липидов плазмалеммы, но эти эффекты приобретали яркую манифестацию лишь при дозах поллютантов, близких к летальным. При более низких концентрациях ТМ антиоксидантные системы организма, судя по всему, достаточно эффективно справлялись с детоксикацией активных форм кислорода (АФК), потому роста содержания МДА не отмечалось.

Анализ содержания антиоксидантов позволил собрать следующие данные. Внесение кадмия в почву приводило к росту этого показателя, что говорило о росте выхода АФК. Добавление цинка в почву практически не изменяло содержания антиоксидантов кроме наибольшей дозы цинка (150 мг/кг). В случае если медь вносилась вместе с невысокой (25 мг/кг) дозой кадмия, отмечалось постепенное усиление синтеза антиоксидантов, причем при максимальной дозе (200 мг/кг) меди этот показатель становился значимо выше такового при внесении одного кадмия. Сходная картина проявлялась еще более ярко в вариантах с более высокой (45 мг/кг) дозой кадмия.

Полученные данные, вместе с результатами анализа содержания МДА, свидетельствовали о том, что

цинк достаточно ярко проявлял стимулирующее действие, позволяя растениям ячменя преодолевать последствия вызванного кадмием стресса, при этом даже при максимальной дозе токсическое действие цинка еще не проявлялось. С этим связан и некоторый спад накопления МДА и синтеза антиоксидантов при наибольшей дозе цинка. Медь более токсична, поэтому она в целом способствовала росту выхода АФК, на что организм реагировал усиленным синтезом антиоксидантов.

Содержание сырого протеина оказалось не слишком информативным показателем. Во всех рассмотренных вариантах данный показатель колебался на близких к контрольному уровнях. Однако в некоторых случаях все же отмечалось его некоторое возращание, что могло быть связано с синтезом стрессовых белков. Рассмотренный показатель оказался слишком нечувствительным, не позволяя четко отметить эффекты воздействия ТМ на синтез белков. Требуется оценить уровни экспрессии специфических белков.

Оценка структуры урожая позволила сделать следующие выводы. Воздействие кадмия приводило к существенному угнетению процессов роста и развития растений, особенно касающихся работы генеративных органов. Внесение цинка совместно с кадмием способствовало постепенному (по мере роста концентрации цинка) восстановлению нормальных функций организма, выраженному в увеличении зеленой массы, хотя при рассматриваемых дозах анализируемые показатели не возвращались к контрольному уровню. Стимулирующее действие цинка не затрагивало генеративные органы растений и отмечалось формирование большого количества пустых колосьев. Добавление меди отражалось на продуктивности сходным с цинком образом, но более ярко. Отчетливее всего это проявлялось при концентрации меди 100 мг/кг (в случае, если кадмий вносился в дозе 25 мг/кг) и 50 мг/кг (кадмий – 45 мг/кг). При этом масса зерна была выше таковой, чем при внесении цинка. Однако при увеличении дозы меди (кадмий – 45 мг/кг) стимулирующий эффект пропал, сменяясь угнетением.

Выводы

В результате выполненного исследования удалось выяснить, что внесение в почву совместно с ТМ, обладающим главным образом токсическим действием, еще и ТМ-микроэлемента существенно модифицировало наблюдаемый ответ растительного организма. Цинк, как менее токсичный элемент, в целом оказывал стимулирующее действие и позволял нивелировать стрессовые эффекты. Медь, будучи более токсичной, проявляла стимулирующее действие лишь при небольших дозах (или когда поллютант – в данном случае кадмий – был внесен в меньшей концентрации), а при более высоких дозах меди она становилась синергистом кадмия, приводя к стойкому угнетению растений.

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. Vol.51. PP. 525-533.

2. Copper-induced root growth inhibition of *Allium cepa* var. *Agrogarum* L. involves disturbances in cell division and DNA damage / R. Qin [et al.] // Environmental toxicology and chemistry. 2015. Vol. 34. № 5. PP. 1045-1055.

3. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.

4. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. чл.-корр. АН СССР А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.

5. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. Vol. 125. № 1. PP. 189-198.

6. Vijayalakshmi M., Ruckmani K. Ferric reducing anti-oxidant power assay in plant extract // Bangladesh J. Pharmacol. 2016. Vol. 11. PP. 570-572.

7. Protein measurement with the Folinphenol reagent / D.H. Lowry, H.J. Rosebrough, A.L. Farr, R.J. Randall // J. Biol. Chem. 1951. Vol. 193. № 1. PP. 265-275.

RESEARCHING OF ZINK AND COPPER MODIFICATION INFLUENCE TO BARLEY TOXIC STRESS, WHICH IS INVOKED BY CADMIUM

Dikarev A.V.^a, Dikarev D.V.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^a ar.djuna@yandex.ru*

Spring barley of the «Zazerskii 85» cultivar was grown in the vegetative experiment, which was carried on the sandy-loamy soil. Cadmium was added in the soil at two concentrations – alone and with zinc or copper at different doses. The goal of this work was search of the answer on the question: how addition of the essential elements is changed cadmium influence on plants? It was shown, that cadmium alone provoked a significant suppression of barley plants growth. With the zinc dose increasing a toxic influence of the cadmium slackened, but zinc was not manifested toxicity itself. Copper is a more hazardous element and has a tendency to manifest a stimulation effect at the lower doses, than zinc. High copper doses are provoked an acute stress, which are bond with combined cadmium and copper influence. At the low cadmium dose copper is revealed more pronounced stimulated influence, than zinc.

Keywords: *spring barley, cadmium, copper, zinc, environmental stress, heavy metals tolerance*

УДК 634.73+631.58

ВЫРАЩИВАНИЕ ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР (ГОЛУБИКИ ВЫСОКОРОСЛОЙ И ЖИМОЛОСТИ), КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ЗЕМЕЛЬ

Евсеев Е.Б.

*Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», 247618, г. Хойники, ул. Терешковой, д. 7, Республика Беларусь
e-mail: info@zapovednik.by*

В статье рассмотрен перспективный контейнерный вариант выращивания голубики и жимолости на землях, загрязненных радионуклидами, с целью обеспечения населения качественной ягодной продукцией и снижения дозовых нагрузок.

Ключевые слова: *голубика, жимолость, загрязненные радионуклидами земли, контейнерный способ выращивания, снижение дозовых нагрузок населения*

Основной целью государственной политики является продовольственная безопасность страны, которая направлена на повышение обеспеченности качественным продовольствием и его доступности для полноценного питания и здорового образа жизни населения путем развития конкурентоспособного аграрного производства и создания условий для потребления продуктов питания на рациональном

уровне. Продовольственная независимость государства оценивается по десяти группам продуктов (один из них фрукты и ягоды) и следующим уровням: оптимистический, недостаточный и критический. Решить основные проблемы по обеспечению продовольственной безопасности помогут инновационные подходы в сельском хозяйстве [1].

Таблица 1

Параметры собственного производства с/х продукции, сырья и продовольствия до 2030 года, тыс. тонн [1]

Наименование продукции	2015 год	2020 год	2030 год	Уровни продовольственной безопасности	
				Критический	Оптимистический
Зерно	8 657	10 000	11 500	6 000	9 000
Картофель	5 995	5 628	6 000	5 100	6 000
Овощи	1 686	1 605	1 900	1 100	1 700
<u>Плоды и ягоды</u>	<u>553</u>	<u>550</u>	<u>580</u>	<u>700</u>	<u>1 100</u>
Масло растительное	260	300	350	130	220
Сахар	491	631	631	310	640
Мясо (убойный вес)	1 149	1 300	1 517	900	1 500
Молоко	7 047	9 200	10 500	4 500	7 500
Рыба	18	28	33	28	33
Яйца, млн. шт.	3 746	3 914	4 200	2 000	2 900

По данным таблицы 1 видно, что в настоящее время в Республике Беларусь имеется критический уровень продовольственной безопасности в обеспечении населения плодово-ягодной продукцией. В большей степени это выражено на загрязненных радионуклидами территориях Гомельской и Могилевской областей, в ситуации ограниченности возделывания ягодных культур на загрязненных радионуклидами землях. Как правило, она завозится из-за рубежа и имеет высокую стоимость. В то же время, в нашей республике имеется значительный опыт в ее выращивании и хранении [2, 3].

Учитывая благоприятные климатические условия Белорусского Полесья, возможно производство аналогичной продукции на территории Республики Беларусь, что может значительно удешевить себестоимость продукции и частично решить проблему импортозамещения.

Современная тенденция культурного пловодства в Беларуси и формирование рынка направлена на все более широкое вовлечение в пищевой оборот нетрадиционных ягодных культур, таких как голубика, клюква, брусника, облепиха, шиповник, жимолость и другие.

Голубика – источник ценных пищевых и биологически активных веществ различного фармакологического действия. Содержащиеся в плодах витамины А, С, Е, антоцианы, флавоноиды, а также микроэлементы (цинк, медь, селен, марганец) оказывают антиоксидантное действие. Растительные гормоны фитостерогены предохраняют организм от атеросклероза и болезней сердца, снижая уровень «плохого» холестерина. Элаговая и фолиевая кислоты

задерживают развитие новообразований. Растительные волокна голубики связывают канцерогены, способствуя их быстрому выведению из организма. Сок обладает противовирусным и антибактериальным действием. В ягодах жимолости и голубики содержится множество биологически активных соединений, обладающих защитными свойствами по отношению к радионуклидам и тяжелым металлам, что особенно важно для населения Гомельской и Могилевской областей, наиболее пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС [4].

Жимолость является перспективной культурой для возделывания в РБ в силу трех очень веских причин. Во-первых, жимолость – самая зимостойкая (кустарник выдерживает морозы до минус 50, а цветки – до минус 5-7 °С. Во-вторых, в рекордно ранние сроки созревают ягоды. В-третьих, плоды по вкусу напоминают голубику. После зимы кисло-сладкий вкус фиолетово-сизых с синим налетом плодов является наиболее вкусным. Они наиболее устойчивы к различным группам вредителей и болезней, отлично растут и плодоносят на одном месте 15-20 и более лет. Дефицит ягод на мировом рынке обуславливает потребность в большом количестве плантаций данных культур.

Жимолость выдерживает и весенние утренние заморозки до минус 8 °С, что актуально и для Беларуси с возвратными морозами. Всего лишь месяц проходит от цветения до зрелых плодов. Расчеты потенциальной продуктивности, сделанные селекционерами, показывают, что в зависимости от сорта можно получать до 12 кг ягод с куста [3].

Ведение растениеводства на радиационно загрязненных землях сопряжено с поступлением радионуклидов в части сельскохозяйственных растений, используемых в дальнейшем на пищевые, кормовые или технические цели. В отдаленный после аварии на Чернобыльской АЭС период, несмотря на процессы естественного распада радиоактивных элементов, Беларусь все еще имеет значительные территории, находящиеся в зоне радиоактивного загрязнения. Наибольшие площади страны загрязнены цезием-137. По состоянию на 01.01.2022 г. загрязнены радиоцезием (более 1 Ки/км²) были 864,4 тыс. га сельскохозяйственных земель республики (или 11,7 % от их общего количества). Наибольшая площадь таких земель находится на территории Могилевской и Гомельской областей – 249,2 и 513,4 тыс. га, соответственно [5].

На данном этапе развития в Беларуси разработаны научно обоснованные рекомендации по возделыванию большинства сельскохозяйственных культур на радиационно загрязненных почвах. Соблюдение данных рекомендаций позволяет получить продукцию растениеводства с содержанием радионуклидов в пределах допустимых уровней. Тем не менее имеются сельскохозяйственные растения, радиэкологические особенности которых остались неизученными в силу их недавнего включения в промышленное производство. Одним из таких растений является голубика высокорослая.

За последние десятилетия площади под голубикой высокорослой в республике значительно

выросли, появились первые полупромышленные посадки культуры и в зоне радиоактивного загрязнения. Вместе с тем были установлены параметры накопления ¹³⁷Cs плодами голубики высокорослой и оценены возможности их производства на территории районов Могилевской и Гомельской областей, загрязненных радионуклидом. По итогам исследований Ермоленко А.В. [и др.] было установлено, что возделывание голубики высокорослой в разрезе загрязненных цезием-147 районов юго-востока Беларуси имеет значительный потенциал к промышленному возделыванию. Были выявлены ограничения к выращиванию, определяемые плотностью загрязнения земель, особенностями почвенного покрова. Выявлено только 5 наиболее подходящих районов для выращивания данной культуры. В оставшихся районах производство нормативно чистых по содержанию ¹³⁷Cs ягод голубики высокорослой не исключается, однако организовать их масштабное производство по стандартным методикам будет проблематично [6].

Следовательно, ввиду риска превышения нормативов содержания цезия-137 в плодах ягод требуется рассмотреть инновационные подходы к выращиванию данной культуры.

На современном этапе развития производства ягодных культур на землях, загрязненных радионуклидами, наиболее перспективным методом является контейнерное выращивание, представленное на рисунке 1.



Рисунок 1. Способы выращивания в контейнерах

С учетом требований, предъявляемых к земледелию на загрязненных радионуклидами землях, контейнерный способ выращивания дает ряд неоспоримых преимуществ:

1. Субстратом для выращивания является верховой торф, на котором не выращивались никакие сельскохозяйственные культуры. Он имеет кислотность 3,5-4,5 рН, не требует подкисления и идеально подходит для голубики уже с первого года.

2. Контейнер позволяет при первых признаках инфекции или болезни незамедлительно удалять (вынести) из общего массива в изолятор болеющее растение, тем самым, не подвергая риску заболевания других растений.

3. Контейнер не позволяет допустить повреждения корневой системы вредителями (мыши, личинки майского жука).

4. За счет меньшей площади произрастания и практически отсутствия семян сорняков в грунте облегчаются работы по прополкам.

5. Контейнер позволяет равномерно и дозированно осуществлять полив и подкормки, что будет способствовать увеличению урожая и качества продукции.

6. Выращивание в контейнере позволяет увеличить плотность выращивания из расчета 9 тыс. кустов на 1 га, при этом за счет усиленной обрезки добиться получения более товарных ягод (крупные плоды) без потери в весовом отношении.

7. Подготовка массива под посадку голубики не в контейнерах (копка посадочных ям, устройство гребней, заполнение посадочных ям субстратом) и последующий уход за посадками (пахота и подкашивание междурядий, прополки в рядках и др.) является более затратным способом, чем выращивание в контейнерах [7].

Самым главным плюсом данной технологии выращивания является исключение из системы «почва-растение» загрязненных радионуклидами земель, так как растение напрямую не связано с грунтом и произрастает в подготовленном субстрате.

В перспективе в технологию выращивания голубики контейнерным способом экономически целесообразно добавлять условия закрытого грунта (тепличные условия).

В условиях закрытого грунта представляется возможным создать оптимальный микроклимат без резких колебаний температур как в ранневесенний период (период цветения), так и среднесуточных колебаний, что позволит в значительной степени уберечь растения от болезней, а следовательно, получить качественную продукцию.

При условии организации предлагаемым способом выращивания хотя бы одного гектара голубичных насаждений при средней урожайности 7 т. с 1 га планируется обеспечить население загрязненных радионуклидами территорий качественной ягодной продукцией по отечественным ценам. Это позволит предотвратить заготовку населением ягод с территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, что определенно снизит дозовые нагрузки и улучшит качество питания.

Таким образом, возделывание голубики и жимолости контейнерным способом позволит получить экологически чистую и качественную продукцию, снизить дозовые нагрузки населения, вовлечь в хозяйственный оборот земли, которые ранее были непригодны для сельскохозяйственного

использования, а также расширить период получения и поставок ягодной продукции.

Список литературы

1. Доктрина национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь до 2030 года: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 15.12.2017 № 962. 2017.

2. Павловский Н.Б. Возделывание голубики высокорослой // Организационно-технологические нормативы возделывания овощных, плодовых, ягодных культур и выращивания посадочного материала: сборник отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси; рук. разработ.: В.Г. Гусаков [и др.]. Минск: Белорусская наука, 2010. С. 375-393.

3. Выращивание органических ягодных культур: монография / Л.Е. Совик [и др.]. Пинск: ПолесГУ, 2019. 276 с.

4. Титок В., Веевник А., Павловский Н. Голубика высокорослая - инновационная культура премиум-класса // Наука и инновации. 2012. № 6 (112). С. 25-27.

5. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь: стат. буклет / Под ред. И.В. Менделеевой [и др.]. Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2022. 40 с.

6. Радиоэкологическая оценка загрязненных ¹³⁷Cs районов юго-востока Беларуси по степени пригодности земель к возделыванию голубики высокорослой / А.В. Ермоленко, Н.Н. Цыбулько, И.И. Жукова, Н.Б. Тупицына // Мелиорация. 2020. № 3. С. 71-77.

7. Выращивание голубики в контейнерах [электронный ресурс] // Крестьянское (фермерское) хозяйство «Ягодка». URL: https://yagodka.by/our_technology/tehnologiya-2/ (дата обращения: 22.06.2023).

CULTIVATION OF BERRY CROPS (TALL BLUEBERRIES AND HONEYSUCKLE) AS A PROMISING DIRECTION FOR THE USE OF RADIONUCLIDE-CONTAMINATED LANDS

Yevseyev E.B.

State environmental research institution «Polesky State Radiation-Ecological Reserve»,
Tereshkova st. 7, Khoyniki, Republic of Belarus, 247618

e-mail: info@zapovednik.by

The article considers a promising container option for growing Blueberries and Honeysuckle on lands contaminated with radionuclides in order to provide the population with high-quality berry products and reduce dose loads.

Keywords: blueberries, honeysuckle, radionuclide-contaminated lands, container method of cultivation, reduction of dose loads of the population

Due to the high density of soil pollution in most areas of the Gomel and Mogilev regions, there is a high risk of exceeding the standards for the content of cesium-137 in the fruits of berries grown in the open ground, therefore it is necessary to consider innovative approaches to the cultivation of these crops. Cultivation of blueberries and honeysuckle in a container way will allow to obtain environmentally friendly and high-

quality products, reduce the dose loads of the population, involve in economic turnover lands that were previously unsuitable for agricultural use. The proposed method of cultivation makes it possible to extend the period of receipt and supply of berry products both to the domestic market and abroad, and accordingly increase tax revenues to the budget.

УДК 556.3:539.16 (574.41)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА ТЕРРИТОРИИ СИП

Ермакова Р.Г.^а, Тлеуканова Ж.Е., Айдарханова А.К., Мамырбаева А.С.

*Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Министерства энергетики Республики Казахстан, 071100, область Абай, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 2Б, Республика Казахстан
e-mail: ^аlavrikova@nnc.kz*

В работе представлены данные по вертикальному распределению радионуклидов в донных отложениях статических и динамических водных объектов Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Для исследования характера вертикального распределения радионуклидного загрязнения донных отложений пробы были отобраны по методу датирования. Рассмотрено распределение техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^3H , ^{90}Sr , и $^{239+240}\text{Pu}$, содержание которых варьирует в широком диапазоне значений удельных активностей в донных отложениях. Полученные результаты показали различия в распределении радионуклидов по вертикали в зависимости от типа исследуемого объекта.

Ключевые слова: СИП, озеро, ручей, техногенные радионуклиды, радиоактивное загрязнение, вертикальное распределение

Одной из важнейших дисциплин, входящих в состав радиозоологии, является радиозоология водных экосистем [1]. На протяжении нескольких десятилетий в Казахстане ведется целый комплекс исследований, направленных на изучение последствий проведения испытаний на территории СИП, в том числе, исследования поверхностных водных объектов. Согласно ранее полученным результатам, численные значения содержания техногенных радионуклидов фиксируются как в воде, так и в донных отложениях большинства водоемов и водотоков, расположенных на территории полигона. Донные отложения играют роль информативных показателей современного состояния водных экосистем [2]. Исследование вертикального распределения радионуклидного загрязнения донных отложений позволяет изучать не только динамику изменения окружающей среды за долгий период времени, но и выделять временные интервалы интенсивного поступления радиоактивных элементов в водную среду [3].

На территории СИП расположены водные объекты, представленные водоемами природного и техногенного происхождения, а также водотоки.

Водоемы природного происхождения – это различные по площади природные соленые озера, часть которых пересыхает к середине лета [4, 5]. Цель работы заключалась в исследовании характера вертикального распределения радионуклидного загрязнения в донных отложениях водных объектов СИП.

Объектами исследования данной работы являлись природные водные объекты различного типа: статические – озера Шубран и Кишкенсор, и динамические – ручьи Байтлес и Узынбулак.

В донных отложениях исследовалось распределение техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^3H , ^{90}Sr , и $^{239+240}\text{Pu}$ по вертикали. Отбор проб произведен точно, по 1 ненарушенной колонке донных отложений с каждого объекта исследования. Высота отобранных колонок достигала до 19 см. В работе применялись методы гамма-спектрометрических измерений для определения содержания в анализируемых пробах ^{137}Cs , методы бета-спектрометрических измерений для определения содержания ^3H (в прочносвязанной форме) и ^{90}Sr , а также методы альфа-спектрометрических измерений для определения содержания $^{239+240}\text{Pu}$.

В колонках донных отложений, отобранных с озер Шубран и Кишкенсор, численные значения удельной активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ отмечаются по всей глубине, максимальные значения радионуклидов получены на глубине 5-7 см. Диапазон концентраций составляет для ^{137}Cs от 3 до 11 Бк/кг, для ^{90}Sr – от 5 до 1000 Бк/кг и $^{239+240}\text{Pu}$ – от 5 до 110 Бк/кг. Распределение ^3H также наблюдается по всей глубине, максимумы зафиксированы на глубине 2-3 см, за исключением озера Шубран, в профиле которого численное значение сосредоточено только на глубине 13 см. Полученные значения для ^3H варьируют от 130 до 13000 Бк/кг.

Исследование вертикального распределения техногенных радионуклидов в донных отложениях ручьев показало, что содержание ^{137}Cs зафиксировано в слоях 1-6 см, полученные численные значения удельной активности варьируют от 5 до 180 Бк/кг, при этом максимальные значения приходится на глубину до 3 см. Распределение ^3H и ^{90}Sr наблюдается по всей глубине, численные значения для ^3H изменяются в диапазоне от 70 до 5000 Бк/кг, для ^{90}Sr – от 10 до 13000 Бк/кг. В вертикальных профилях выраженные пики активности приходятся на глубину до 3 см. Численные значения для $^{239+240}\text{Pu}$ получены в слоях 1-4 см, которые изменяются от 3 до 15 Бк/кг.

Таким образом, полученные результаты показали различия в распределении радионуклидов по вертикали для статических и динамических водных объектов. Так, для озер характерно основное накопление техногенных радионуклидов на глубине, что противоположно распределению в донных отложениях ручьев, в которых содержание техногенных

радионуклидов сосредоточено, преимущественно, в поверхностных слоях. Присутствие некоторых отличий в вертикальном распределении радионуклидов можно объяснить различным типом сравниваемых объектов. Большое влияние на такое распределение оказывает движение водных масс, так как для озер характерно вертикальное распределение на более глубокие слои.

Список литературы

1. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. Екатеринбург: Изд-во «Академ Наука», 2014. Том I. 496 с.
2. Осмелкин Е.В., Суин М.В., Подшивалина В.Н. Оценка влияния особенностей водосбора на процессы старения малых карстовых // Вода: химия и экология. 2013. № 1. С. 9-14.
3. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Томск: Изд-во ТПУ, 1997. 384 с.
4. Radionuclide transport in the «sediments – water – plants» system of the water bodies at the Semipalatinsk test site / A.K. Aidarkhanova, S.N. Lukashenko, N.V. Larionova, V.V. Polevik // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 184-185. PP. 122-126.
5. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот] / Под рук. С.Н. Лукашенко. Павлодар: Дом печати, 2015. Вып. 5. 356 с.

INVESTIGATION OF THE CHARACTER OF THE VERTICAL DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES IN BOTTOM SEDIMENTS OF WATER BODIES OF DIFFERENT TYPES OF THE STS

Yermakova R.G.^a, Tleukanova Zh.Ye., Aidarkhanova A.K., Mamyrbayeva A.S.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK,
Beibyt atom st. 2, Kurchatov, Abai region, Republic of Kazakhstan, 071100
e-mail: ^alavrikova@nnc.kz

The paper presents data on vertical distribution of radionuclides in bottom sediments of static and dynamic water bodies. The objects of this work are lakes Shubran and Kishkenzor, streams Baitles and Uzynbulak. The purpose of the work is to investigate the character of vertical distribution of radionuclides in bottom sediments of water bodies of Semipalatinsk test site (STS). To investigate the character of vertical distribution of radionuclide contamination of bottom sediments the distribution of anthropogenic radionuclides ^{137}Cs , ^3H , ^{90}Sr , and $^{239+240}\text{Pu}$ was studied. The results obtained showed differences in the distribution of radionuclides vertically.

Keywords: STS, lakes, streams, anthropogenic radionuclides, radioactive contamination, vertical distribution

САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ВЕДЕНИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЛЯХ: ПЕРЕХОД Cs-137 В КАРТОФЕЛЬ И ПРОДУКТЫ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

Жерненко А.О.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Факультет почвоведения), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

e-mail: zhiernienkov99@mail.ru

Ключевые слова: Cs 137, картофель, миграция радионуклидов, сельскохозяйственные территории, радиоактивное загрязнение

Радиационное загрязнение окружающей среды влечет за собой серьезные последствия как на уровне «здоровья» экосистемы, так и для санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Особенно актуальным является санитарно-гигиеническая оценка экологических рисков ведения сельского хозяйства на подобных территориях. В частности, это касается и территории Плавского радиоактивного пятна (ПРП) в Тульской области, на которой с устойчивым постоянством выращивают картофель [1].

В центральной части ПРП, несмотря на прошедшие 37 лет с момента чернобыльской аварии, плотность поверхностного радиоактивного загрязнения почвы агросистемы картофеля до сих пор остается высокой и превышает допустимый уровень накопления Cs-137 в почвах в среднем 6 раз (226 кБк/м² при допустимой норме 37 кБк/м²). При этом величина удельной активности Cs-137 в мякоти клубня составляют 9,2 Бк/кг, что в 8,7 раз ниже допустимого уровня накопления радионуклида в сырой массе [2]. Несколько выше величина удельной активности Cs-137 в кожуре картофеля – 32,6 Бк/кг, чем подчеркивается ее защитная функции по отношению к мякоти.

Особый интерес вызывает влияние кулинарной обработки на содержание Cs-137 в блюдах, идущих непосредственно в пищу человека. Установлено, что после приготовления картофеля к непосредственному употреблению, а именно после варки в мундире (7,2 Бк/кг), и после варки очищенных клубней (6,6 Бк/кг) в отвар выносятся 0,5 Бк/л и 0,3 Бк/л, соответственно. Однако при этом нужно отметить, что различия между величинами удельной активности Cs-137 в клубнях картофеля до варки и после нее не столь существенны. Это свидетельствует о прочной связи большей части инкорпорированного в растения радионуклида с компонентами клеточной стенки и оргanelл.

Список литературы

1. О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС: Закон РФ от 15.05.1991 N 1244-1ю
2. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (Минздрав РФ, 2002 г.).

SANITARY AND HYGIENIC ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISKS OF FARMING ON RADIOACTIVELY CONTAMINATED LANDS: Cs-137 TRANSFER TO POTATOES AND THEIR PROCESSED PRODUCTS

Zhernenkov A.O.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Soil Science), Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow, Russian Federation, 119991

e-mail: zhiernienkov99@mail.ru

Keywords: Cs 137, potatoes, migration of radionuclides, agricultural lands, radioactive contamination

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗВЕНЕ «ПОЧВА-ВОДА-РАСТЕНИЕ»

Журавлева Ю.С.^а, Гречкина В.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет», 460014, Оренбургская обл., г. Оренбург, ул. Челюскинцев, д. 18, Российская Федерация
e-mail: ^а589587@mail.ru

В данной работе представлены данные об особенностях миграции техногенных, природных радионуклидов и тяжелых металлов в системе «почва-вода-растение».

Ключевые слова: радионуклиды, тяжелые металлы, цезий-137, стронций-90, типы почв, профильная миграция, среда

Радиоэкологическая обстановка в Оренбургской области и в ряде районов весьма неблагоприятна. Это неблагоприятно вызвано как естественной геологической средой, так и аварийными ситуациями. Естественный радиоактивный фон отличается высокой мозаичностью, обусловленной включением в геологические комплексы пород природных радионуклидов: калия-40, тория-232, урана-238, радия-226, радона-222, радона-220 [1].

Интенсификация промышленности, химизация сельского хозяйства, применение радионуклидов для народнохозяйственных нужд приводят к проникновению радиоактивных веществ в трофическую цепь, при этом наносится непоправимый вред здоровью человека в виде канцерогенного и мутагенного воздействия [2, 3].

В настоящее время интерес к загрязнению радиоактивными веществами вырос в связи с факторами появления острых токсических эффектов, вызванных загрязнением техногенными радионуклидами. Экологические последствия радиоактивного загрязнения почв состоит в том, что, включаясь в биологический круговорот, радионуклиды через растительную и животную пищу попадают в организм человека, депонируются и вызывают радиоактивное внутреннее облучение [4].

Радионуклиды, подобно многим загрязняющим веществам постепенно концентрируются в пищевых цепях. В экологическом отношении наибольшую опасность представляют изотопы ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Это обусловлено длительным периодом полураспада, высокой энергией излучения и способностью легко вступать в биологический круговорот в цепи питания [5].

Материалы и методы

Исследования осуществлялись в 2021-2022 году в АПК «Ильинка» Октябрьского района Оренбургской области.

Пробы почв отбирались методом конверта. Растительные образцы отбирались на тех же участках, что и почвы. Отбор трав пастбищ производили на месте отбора индивидуальной пробы почвы на участке 1 м². Масса образца составляла не менее 1 кг.

Отбор проб воды для анализа радиологических показателей производили в соответствии с общими требованиями ГОСТ Р 51592-2000.

Для измерения активности альфа, бета и гамма-излучающих нуклидов в счетных образцах был использован спектрометрический комплекс «Прогресс-5» в аналитической лаборатории ФГБОУ ВО «Оренбургского ГАУ». Определяли радиоактивные вещества ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K, ²²²Rn, ⁹⁰Sr. В воде определяли суммарную альфа и бета-активность.

Активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в счетных образцах измерялась по гамма-излучению дочернего рН барий-137m на радиометрических установках на основе сцинтилляционных гамма спектрометров. Счетные образцы в виде прессованных таблеток равномерной толщины объемом до 20 см³ помещаются для измерения в специальные кюветы диаметром 73 мм. Значение удельной активности рН в счетном образце определяется путем программной математической обработки спектрограмм по алгоритмам, специфичных для счетных образцов различного радионуклидного состава.

Для определения концентрации микро- и макроэлементов Pb, Co, Cr, Mn, Cd, Ca, K использовали атомно-абсорбционный анализатор «Спектр-5».

Статистический анализ выполняли с использованием методик ANOVA (программный пакет Statistica 10.0, «StatSoft Inc.», США) и Microsoft Excel. Статистическая обработка включала расчет среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего (±SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на p<0,05.

Результаты исследований

Миграцию радионуклидов вниз по профилю почвы можно оценить как отрицательный факт, который приводит к попаданию радионуклидов в подземные воды, следовательно и в источники питьевого и технического водоснабжения. Основная особенность грунтовых вод заключается в том, что они имеют непосредственное питание от атмосферных осадков и поверхностных вод. В свою очередь, грунтовые воды по условиям питания подразделяются на воды,

приуроченные к участкам, удаленным от открытых водоемов, и на воды, находящиеся на участках, расположенных вблизи рек и других водоемов. Данный факт указывает на необходимость исследования уровня α и β -активности подземных водоисточников.

Суммарная активность – это условная активность счетного образца, численно равная активности регламентированного образца сравнения при одинаковых показаниях радиометра. Активность радионуклидов в воде представлена в таблице 1.

Таблица 1

Суммарная активность радионуклидов в воде АПК «Ильинка» Октябрьского района, Бк/л

Объект исследования	Показатель	Активность радионуклида
Вода с подземного централизованного водоисточника	α -активность	0,0564±0,0025
	β -активность	0,4739±0,0743
Поверхностные воды пруда АПК «Ильинка»	α -активность	0,0654±0,0036
	β -активность	0,578±0,0475
Артезианская вода (напорные подземные воды)	α -активность	0,0154±0,0012
	β -активность	0,189±0,0123

Лабораторные исследования показали, что α и β -суммарная активность вод с подземного централизованного водоисточника Октябрьского района Оренбургской области АПК «Ильинка» находится в пределах ПДК, который составляет 0,2 и 1,0 Бк/л. Проведенные исследования позволяют считать, что миграция искусственных радиоактивных веществ в подземных водах по сравнению с водами открытых водоемов в значительной мере ограничена.

При анализе почвы и травы с пастбища активность радионуклида ^{232}Th составила 39,5421 и 9,0854 при ПДК данного показателя 30 Бк/кг. Активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в траве луговых пастбищ не выходит за пределы ПДК.

При анализе рН показателя было выявлено, что почва с луговых пастбищ имеет кислую среду рН=5,45, а почва (чернозем обыкновенный) рН =7,01.

При исследовании активности ^{40}K в исследуемых образцах обнаружили, что активность находилась на верхней границе ПДК, которая составляет 500 Бк/кг. В почве хозяйства АПК «Ильинка» этот уровень был выше на 110 Бк/кг. С физико-химических позиций сорбционная способность почвы тем выше, чем больше в ней соединений, которые могут химически реагировать с радионуклидами. Относительно большей сорбционной способностью обладают черноземные почвы, что связано с наличием в их составе гумуса, который содержит высокомолекулярные вещества, находящиеся в коллоидном состоянии и

отличающиеся хорошей обменной емкостью поглощения.

Проведенный анализ на содержание кальция в почве показал, что поглощение растениями ^{90}Sr напрямую зависит от содержания данного химического элемента. С увеличением содержания обменного кальция в почве пастбища до 17,9 мг/кг, накопление ^{90}Sr в траве (надземная часть разнотравья) снижалась до 21,85±2,12 Бк/кг (рис. 1).

Перемещающийся в почве ^{90}Sr распределяется между обменным кальцием и кальцием, находящимся в почвенном растворе. В обоих случаях кальций выполняет функцию неизотопного носителя.

В почве валовое содержание тяжелых металлов в верхнем слое (0-20 см) на исследуемой пробной площадке и точечных участков находятся в пределах величин, рекомендованных ГОСТ 30692-2000 (рис. 2).

Высокий уровень накопления в почве на территории АПК «Ильинка» составил у таких элементов, как Mn в 1,14 раза и Pb в 1,22 раза относительно ПДК. При исследовании почвы с луговых пастбищ содержание Cd было в 3,02 раза, Pb в 2,15 раз ниже относительно почвы хозяйства (0,3 мг/кг).

Следует отметить, что содержание тяжелых металлов в зеленых частях растений не превышает ПДК, которые составляют Pb (5,0 мг/кг), Co (1,0 мг/кг), Cr (0,5 мг/кг), Mn (70 мг/кг), Cd (0,3 мг/кг). Тяжелые металлы по интенсивности их поглощения травянистой растительностью можно расположить в возрастающей последовательности: Cd>Cr>Pb>Co>Mn.

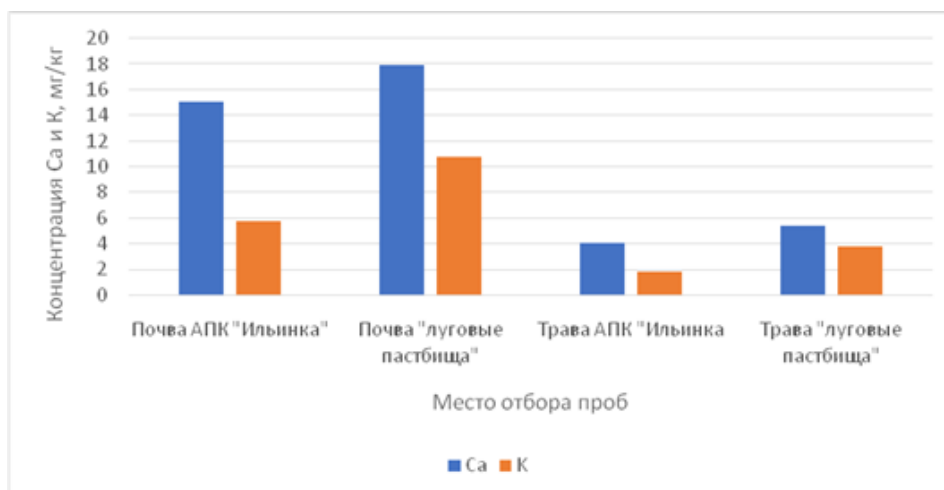


Рисунок 1. Уровень концентрации Ca²⁺ и K⁺ в почве и траве хозяйства АПК «Ильинка» Октябрьского района

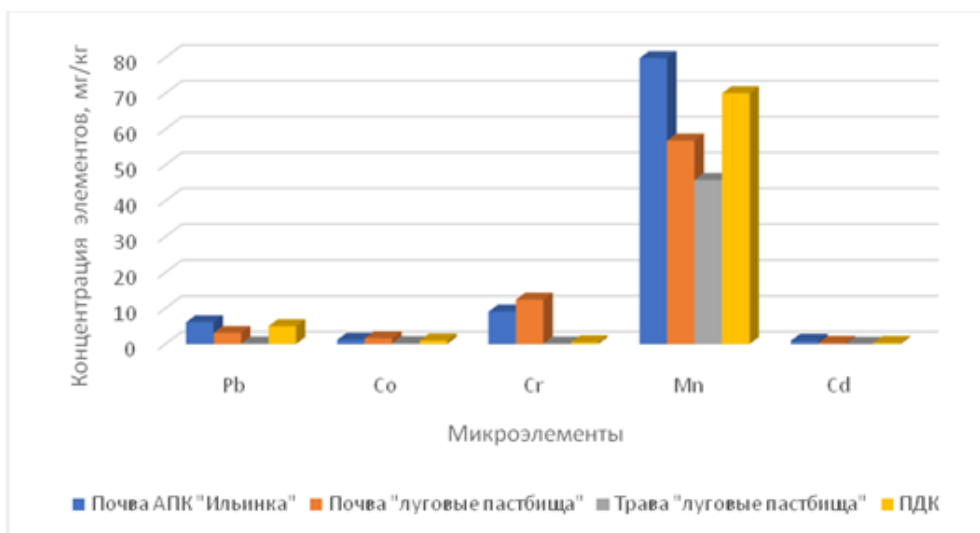


Рисунок 2. Содержание микроэлементов в почве и траве хозяйства АПК «Ильинка» Октябрьского района, мг/кг

Выводы

По результатам исследований установлено, что уровень накопления искусственных радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr на территории Октябрьского района находятся в пределах допустимой концентрации, при этом содержание природного радиоактивного изотопа ⁴⁰K в почве выше в 1,03 раза, концентрация ²³²Th выше в 1,31 раза относительно ПДК.

Аккумуляция тяжелых металлов растениями напрямую зависит от типа почв и содержания в них запасов этих элементов. Концентрация в почве на луговых пастбищах по результатам исследований была меньше по Pb в 2,15 раз, Cd в 3,02 раза относительно территории хозяйства АПК «Ильинка». Основное поступление обусловлено техногенным влиянием транспорта и их выбросами в окружающую среду.

Список литературы

1. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Исследование нахождения подвижных форм тяжелых металлов и радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в почвенно-растительных комплексах степной зоны: в 3 т. // Актуальные проблемы экологии.: сб. науч. работ. Томск, 2004. № 3. С. 455-456.

2. Гречкина В.В., Иркимбаева А.С., Блажко И.С. Накопление тяжелых металлов, бензапирена в воде и их влияние на живые организмы // Современные тенденции развития биологической и ветеринарной науки посвященной памяти доктора ветеринарных наук, профессора Ю.В. Храмова (1956-2010). Оренбург, 2016. С. 249-252.

3. Биодоступность химических элементов из рационов с разным уровнем ОЭ / С. Лебедев, А. Гречушкин, Ш. Рахматуллин, Г. Дускаев // Птицеводство. 2008. № 10. С. 50-51.

4. Рахимова Н.Н. Восстановление почв, загрязненных радионуклидами методом фитомелиорации

// Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сб. материалов Всероссийской научно-методической конференции с международным участием. Оренбург: ОГУ, 2014. С. 997-1002.

5. Эколого-генетический анализ отдаленных последствий Тоцкого ядерного взрыва в Оренбургской области в 1954 году (факты, модели, гипотезы) / А.Г. Васильев, В.М. Боев, Э.А. Гилева [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. С. 45-47.

SYSTEMATIZATION OF RESEARCH RESULTS ON THE MIGRATION OF RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS IN THE LINK «SOIL-WATER-PLANT»

Zhuravleva Yu.S.^a, Grechkina V.V.

Federal State Budgetary Educational University of Higher Education «Orenburg state agrarian university», Chelyuskintsev st. 18, Orenburg, Orenburg region, Russian Federation, 460014
e-mail: ^a589587@mail.ru

This paper presents data on the migration features of man-made, natural radionuclides and heavy metals in the «soil-water-plant» system.

Keywords: radionuclides, heavy metals, cesium-137, strontium-90, soil types, profile migration, environment

From the results of the study, it was found that the intake of radionuclides and heavy metals from soils into plants is the first link in the transition to food, including into the human body. Getting from the soil into the plant, radioactive substances and heavy metals, depending on their chemical properties, penetrate into the ground parts or linger in the root system. The level of accumulation of artificial radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr on the territory of the Oktyabrsky district are within the permissible norm, while the level of natural radioactive

isotopes ⁴⁰K and ²³²Th in the soil is 1.03 and 1.31 times higher relative to the maximum permissible concentration. According to the intensity of their absorption by herbaceous vegetation, heavy metals were distributed in an increasing sequence: Cd>Cr>Pb>Co>Mn.

Analysis of water, soil and plant samples showed that radiological indicators were within the normal range, therefore this area is favorable for the cultivation of agricultural products and the development of animal husbandry.

УДК 57.042

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИНДУЦИРОВАННУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ УСТОЙЧИВОСТЬ ФОТОСИНТЕЗА К ЗАСУХЕ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ

Иванова А.В.^a, Немцова Ю.А., Воденев В.А., Гринберг М.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, Российская Федерация
e-mail: ^azelenkaeee@gmail.com

Растения, произрастающие на загрязненных радионуклидами территориях, могут подвергаться действию различных стрессовых факторов, включая засуху. Устойчивость к стрессорам, формируемая за счет стрессовых сигналов, может быть модифицирована за счет влияния ионизирующего излучения. В настоящей работе исследовалось влияние хронически действующего ионизирующего излучения на индуцированную электрическими сигналами устойчивость к засухе у растений пшеницы. Показано, что у контрольных и облученных растений засуха вызывает снижение параметров фотосинтеза, однако сроки наступления таких эффектов в разных группах отличаются. Обнаружено, что электрические сигналы способствуют формированию устойчивости к засухе. Облучение этот эффект усиливает.

Ключевые слова: облучение, электрические сигналы, фотосинтез, засуха, *Triticum aestivum L.*

Все живые организмы, в том числе растения, во время роста и развития подвергаются воздействию факторов среды. Ионизирующее излучение (ИИ) является как неотъемлемой составляющей среды обитания всего живого, так и хронически действующим стрессором, в случае превышения фоновых значений. На загрязненных радионуклидами территориях помимо влияния ИИ растения могут подвергаться действию ряда других стрессоров таких как засуха, переувлажнение, неблагоприятные температуры и т.д. За повышение устойчивости к таким изменениям отвечают сигнальные системы, которые у растений представлены электрическими, гидравлическими и различными химическими сигналами. В условиях комбинированного действия стрессоров параметры сигналов и формируемой ими устойчивости могут меняться. Ранее в работах кафедры было показано, что ИИ усиливает электрические сигналы и вызываемые ими ответы фотосинтеза.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния хронически действующего ИИ на индуцированную электрическими сигналами устойчивость к засухе у растений пшеницы.

Исследования проводились на проростках пшеницы мягкой (*Triticum aestivum L.*) сорта «Дарья». Семена замачивались в подставках с водой в течение 3 дней, затем проростки пересаживали в емкость с песком массой 65 г по 4 ростка в каждом. Полив осуществлялся ежедневно в объеме 4 мл отстоянной водопроводной водой. Световой период составлял 16-часовой период при температуре 24 °С.

Измерения мембранного потенциала производились при помощи электрофизиологической установки Мультигест ИПЛ-113 (ООО НПП «Семико», Россия). Электрические сигналы регистрировались внеклеточно с помощью макроэлектрода. Полученные данные обрабатывались на ПК в программе *param2*.

Для регистрации параметров фотосинтеза использовался инфракрасный газоанализатор GFS-3000 и PAM-флуориметр Dual-PAM-100 с измерительной головкой Dual-PAM gas-exchange Cuvette 3010-Dual (Heinz Walz GmbH, Германия). Для регистрации динамики показателей световой стадии фотосинтеза использовался PAM-флуориметр PlantExplorerPro+ (PhenoVation, Нидерланды). Расчет параметров квантового выхода фотохимических реакций фотосистемы I (Fv/Fm), фотосистемы II (YII) и нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ) производился встроенным программным обеспечением прибора. Уровень фотосинтетических показателей регистрировался на уровне целого растения. Измерениям предшествовала темновая и световая адаптация. Степень устойчивости к стрессовым факторам оценивалась по времени возникновения достоверных различий между контрольной и облученной группой, а также по величине остаточного фотосинтеза.

С 14-го дня у половины растений прекращался полив, что моделировало наступление засухи. Также на 14-й день у половины растений нагревом кончика листа в кювете с водой вызывался электрический сигнал переменный потенциал (ВП). Таким образом, на 14-й день эксперимента емкости с растениями разделялись на следующие группы: контроль (К), контроль с засухой (К_З), контроль с ВП (К_ВП), контроль с засухой и ВП (К_З_ВП); аналогично для ИИ. Измерения фотосинтеза проводились с 11 до последнего дня эксперимента.

В ходе эксперимента был выполнен анализ влияния ИИ на все этапы развития устойчивости к засухе: исходное состояние растений, параметры их ответа на засуху и специфику развития индуцированной ЭС устойчивости. На начальных этапах до наступления засухи заметная разница наблюдается в показателях ассимиляции, у облученных растений значения выше. Параметры световой стадии фотосинтеза у растений, выращенных в условиях естественного радиационного фона и облученных растений, практически не различаются.

Засуха вызывает подавление активности фотосинтеза, которое проявляется в снижении квантового выхода фотосистемы 2 (YII) и увеличении нефотохимического тушения флуоресценции (NPQ). Общая динамика ответа на засуху у облученных растений не отличается от растений, выращенных при фоновых значениях ИИ. Имеет место сдвиг во времени наступления ответов на засуху. Спад показателей у контрольных растений наступает позже, в отличие от группы облученных растений.

Для изучения роли переменного потенциала (ВП) в формировании устойчивости к засухе на протяжении нескольких дней после локального воздействия изучалась динамика фотосинтеза. У растений, которые после прохождения ВП не подвергались стрессу, выраженных ответов фотосинтеза в последующие после ВП сутки обнаружено не было. Статистически значимые различия малой амплитуды наблюдались у показателя YII и показателя NPQ как у растений пшеницы, выращенных в условиях естественного так и повышенного радиационного фона.

После прохождения ВП снижение активности фотосинтеза, вызванное засухой, имеет меньшую амплитуду, чем растений без ВП. В последний день эксперимента у группы К_З_ВП остаточный уровень YII был выше, чем у группы К_З. Таким образом, обнаружено, что растения, у которых имел место ВП, обладают способностью к поддержанию высокого уровня фотосинтеза в условиях засухи на протяжении более долгого периода, чем контрольные.

У облученных растений ВП, также, как и у контрольных, обладает протекторной функцией и замедляет начало спада показателей фотосинтеза. Группы с индуцированным ВП обладают меньшей амплитудой реакции и поздним началом спада показателей YII и роста NPQ, чем группы, у которых не вызывался

ВП. Обнаружено, что протекторная функция ВП в отношении засухи у облученных растений более выражена.

Таким образом, в условиях хронического облучения малыми дозами происходит стимуляция активности фотосинтеза у растений пшеницы, что ведет к более быстрому снижению этих показателей при водном дефиците. ВП практически не оказывают влияние на уровень фотосинтеза в условиях достаточного полива, но повышают устойчивость растений

пшеницы к действию засухи как при естественном, так и при повышенном уровне радиационного фона. Обнаружено, что облучение усиливает вызванную электрическими сигналами устойчивость к засухе у растений пшеницы.

Работа выполнена в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика».

EFFECT OF IONIZING RADIATION ON THE DROUGHT RESISTANCE OF PLANTS INDUCED BY ELECTRIC SIGNALS

Ivanova A.V.^a, Nemtsova Y.A., Vodeneev V.A., Grinberg M.A.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin st. 23, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603022
e-mail: ^azelenkaeee@gmail.com

Plants growing in areas contaminated with radionuclides may be exposed to various stress factors, including drought. Resistance to stressors, formed due to stress signals, can be modified due to the influence of ionizing radiation. In this paper, the effect of chronically active ionizing radiation on the drought resistance induced by electrical signals (ES) in wheat plants was investigated. It has been shown that in control and irradiated plants, drought causes a decrease in photosynthesis parameters and suppression of transpiration intensity, but the timing of the onset of such effects differs in different groups. In conditions of chronic irradiation with small doses, photosynthesis activity and transpiration intensity are stimulated in wheat plants, which leads to a faster decrease in these indicators with water deficiency. ES practically have no effect on the level of photosynthesis and transpiration in conditions of sufficient watering, but increase the resistance of wheat plants to the effects of drought both at natural and at elevated levels of background radiation. It was found that irradiation enhances the ES-induced drought resistance in wheat plants.

Keywords: *irradiation, electrical signals, photosynthesis, drought, Triticum aestivum L.*

All living organisms, in particular plants, are exposed to adverse conditions during growth and development. In order for the plant not to die, it needs to withstand such stressors. Various stress signaling systems are largely responsible for the development of resistance. In the natural environment, plants can be exposed to several types of influences at once, such as radiation, drought, waterlogging, adverse temperatures, etc. The mechanisms of formation of resistance to a combination of stresses of different nature in plants are currently insufficiently studied. A promising approach is to study the modification of stress signaling systems under the influence of low-intensity stressors of a chronic nature. Thus, in our previous works, it was shown that chronic environmental factors (ionizing radiation, UV, drought) can affect the parameters of stress electrical signals caused by short-term stressors (temperature increase).

The aim of this work was to study the effect of chronically acting ionizing radiation on the resistance to drought induced by electrical signals in wheat plants.

The studies were carried out on seedlings of common wheat (*Triticum aestivum* L.). As a source of ionizing radiation, a ⁹⁰Sr-⁹⁰Y β-emitter with an activity of 0.1 MBq and a dose rate of approximately 31.3 μGy/hour was used. To analyze the effect of ionizing radiation on signal-induced drought tolerance, plants were divided into the following groups: control, control_ES, control_drought, control_drought_ES; similarly for irradiated plants. Drought was set by stopping watering plants at the age of 14 days. On the first day of drought, an electrical signal was induced in half of the plants by heating the leaf tip in a cuvette with water. The activity of photosynthesis processes was assessed using PAM fluorometry and IR-thermography. electrical signals were recorded using macroelectrode technology. The level of photosynthesis was measured twice a day until the 9th day of the drought.

It has been shown that drought causes a decrease in photosynthesis parameters in all plants, however, the timing of the onset of such effects in different groups differs. The results demonstrate that ionizing radiation can influence electrical signal-induced drought tolerance.

АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ СОРТА ФАСОЛИ ОВОЩНОЙ ПАМЯТИ РЫЖКОВОЙ

Казыдуб Н.Г.^а, Коцюбинская О.А.^б, Коваленко А.Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина», 644008, Омская область, г. Омск, Институтская пл., д. 1, Российская Федерация
e-mail: ^а ng.kazydub@omgau.org, ^б oa.kotsyubinskaya@omgau.org

В итоге длительной работы научным коллективом агротехнологического факультета Омского ГАУ создан новый сорт фасоли овощной Памяти Рыжковой, который включен в государственный реестр селекционных достижений. В среднем за 7 лет (2015-2022 гг.) сорт Памяти Рыжковой сформировал урожайность зеленых бобов 4,9 т/га, семян 2,3 т/га, превысив по этому показателю сорт стандарт иностранной селекции – Польку (Польша) на 1,5 т/га. Основная окраска семян – черные с бежевых рисунков. Масса 1000 семян 250-280 гр. Сорт устойчив к антракнозу [7]. Зеленый боб – прямой, тонкий [13, 15]. Конкурентоспособность сорта обеспечивается стабильной урожайностью, высокими вкусовыми качествами, способностью зеленых бобов длительное время сохранять хозяйственную годность [11]. Сорт хорошо переносит засуху и пониженные температуры.

Ключевые слова: овощная фасоль, сорт, урожайность, технологичность, микроэлементы, экологическая пластичность

Сорт фасоли овощной Памяти Рыжковой создан путем межсортовой гибридизации с последующим индивидуальным отбором в F3 из гибридной популяции Niver x Maxion Faden. В 2012 году сорт включен

в государственный реестр селекционных достижений [7]. Фото растения и семян сорта фасоли овощной Памяти Рыжковой представлено рисунке 1.



а б

Рисунок 1. Сорт фасоли овощной Памяти Рыжковой: а – растение, б – семена (Учебно-опытное хозяйство Омского ГАУ, 2017 г.)

Морфологические признаки сорта

Характер роста растений детерминантный, облиственность средняя, листья темно-зеленой окраски. Высота растений в среднем 43-50 см, кустовой тип, форма прямостоячая. Створки бобов при созревании не растрескиваются. Масса 1000 семян средняя от 250 до 280 грамм. Основная окраска семян – черные с бежевых рисунков. По вегетационному периоду относится к сортам среднеспелой группы. Достоинство сорта в том, что растения в

начальный период их роста значительно опережают сорняки. Сорт обладает высокими вкусовыми и питательными качествами. Бобы округлой ультратонкой формы, зеленого цвета в технической спелости, длиной 12-15 см. Его выращивают для потребления в свежем, консервированном и замороженном виде. Ценится за обильное, длительное плодоношение. Сорт устойчив к антракнозу [7, 11].

Биологические свойства сорта

По вегетационному периоду сорт относится к среднеспелой группе. Продолжительность периода от всходов до цветения 45-47 сут, от всходов до технической спелости составляет 51-53 сут, а созревание семян 90 сут [11]. Семена хорошо прорастают при температуре +8...+10 °С., оптимальная – 18-22 °С, для полноценной вегетации – 20-25 °С. Сорта фасоли для своего развития требует от 1500 до 2500 °С биологически активной температуры. Снабжение влагой из почвенных запасов в вегетационном периоде для нее более эффективно, чем из осадков [13]. Для сорта лучшие почвы – мягкие суглинистые почвы с глубоким пахотным слоем, хорошо обеспеченным известью (показатель рН в зависимости от вида почвы – 5,5...7,5), который рано и быстро прогревается. Не пригодны для выращивания тяжелые, илестые неструктурные холодные почвы [13].

Лучшая температура вовремя бутонизации и цветения – 20-25 °С. При длительной температуре воздуха свыше + 37 °С наблюдается массовое опадание генеративных органов [13].

Сорт реагирует на интенсивность освещения и продолжительность дня – нейтральная. Растения фасоли требовательны к влаге, особенно в период набухания и прорастания семян. Оптимальная влажность почвы должна быть 65-70 % ППВ [13]. Полевой опыт с овощной фасолью сорта Памяти Рыжковой показал, что при хорошей влагообеспеченности и температурном режиме, при сравнительно высоком уровне обменного калия в почве (градации для хлебных злаков) фасоль положительно реагировала на внесение калийных удобрений на фоне NP [6].

Болезни сорта

Болезни резко снижают урожай фасоли, так как поражают не только растения, но и семена. Наиболее распространенные заболевания – мозаика, корневая гниль, бактериоз, ржавчина листьев, белая гниль, мучнистая роса. Из грибных болезней фасоли в условиях Западной Сибири наиболее вредоносен антракноз (возбудитель – *Colletotrichum lindemuthianum Br.etCav.*), особенно сильно поражаются бобы. По результатам полевой оценки в 2015-2022 гг. поражение антракнозом было слабое (10-20 %) [13].

Технологическая оценка сорт

Для удовлетворения требований перерабатывающих предприятий к качеству сырья фасоли овощной зеленые бобы должны иметь характеристики: быть без пергаментного слоя и волокна, с яркой окраской, толщиной 0,5-0,9 см, с нежной и сочной мякотью, пригодные к заморозке, с хорошим вкусовым качеством и высокой товарностью. Признак «товарность бобов» характеризует выход товарных бобов от общего урожая с учетом площади и является важным компонентом продуктивности, дополняющим достоинства сорта, так как высокая продуктивность не всегда сочетается с высокой товарностью. В

среднем по сорту Памяти Рыжковой товарность бобов составила 96 %, у сортов стандартов – 82 % [13].

Требования к бобам фасоли для консервирования: гладкая нечетковидная поверхность; стенки боба должны быть мясистыми, нежными, без пергаменты и волокна (нитей) в его швах; при стерилизации бобы фасоли не должны развариваться.

Кроме переработки на консервных заводах важна и потребительская заготовка впрок зеленых бобов. Значительных масштабов достигло замораживание фасоли. Морозильные цеха дают ценную консервную продукцию фасоли, у этого способа консервирования большие перспективы. С целью установления потребительских достоинств нами проведена работа по оценке пригодности к заморозке. Для этого отбирали зеленые бобы, после бобы нарезали на кусочки (2-3 см), затем бланшировали с последующим быстрым охлаждением ледяной водой. Это помогает сохранить первоначальный цвет, вкус и структуру. По показателям технологичности сорт фасоли овощной Памяти Рыжковой оценивали в фазе технической спелости. Представленный сорт фасоли овощной селекции Омского ГАУ рекомендуем использовать для переработки (консервирование и заморозка), а также как источник высокого качества зеленых бобов в селекционном процессе по выделенным показателям.

При оценке содержания суммы сахаров, моносахаров и сухого вещества в семенах фасоли овощной сорта Памяти Рыжковой в ФГБНУ ФНЦО в лабораторно-аналитическом центре [13]. Следует отметить, что в семенах фасоли овощной Памяти Рыжковой содержание сухого вещества – 39,84 %, максимальное содержание моносахаров – 0,68 %, содержание суммы сахаров – 1,71 % [13].

Симбиотическая активность сорта

Биологическая фиксация азота может быть главным рычагом, которым следует воспользоваться при решении проблемы органического земледелия [15]. Выращивая фасоль обыкновенную, активно фиксирующую азот из воздуха, можно решить проблему сохранения и воспроизводства естественного плодородия почв, а также без дополнительных затрат повысить урожайность последующей культуры [15]. В связи с этим число и масса клубеньков на корнях растений является одним из показателей азотфиксирующей способности растений.

Масса клубеньков у сортов: стандарта Золушка – 0,53 гр. с растения, Памяти Рыжковой в значительной степени превысил данный показатель и составил 1,28 гр. Представленные результаты по урожайности подтверждают, что сорта с высокой азотофиксирующей способностью формируют больший урожай с единицы площади. Так, урожайность сорта Памяти Рыжковой составила 656 г/м². Наибольшее количество клубеньков и их масса с растения может служить косвенным показателем для отбора образцов с высокой урожайностью и наоборот [9].

Экологическая пластичность сорта

Экологическую пластичность сортов оценивали по методике: S.A. Eberhart, W.A. Russell (1966) в изложении В.А. Зыкина (1984), где дана возможность определения как пластичности, так и стабильности генотипов Памяти Рыжковой ($b_i = 0,8$), характеризуется высокой урожайностью и относится к наиболее пластичному сорту с коэффициентом регрессии (пластичность) b_i ближе к единице, т.е. сорт хорошо адаптирован к разным условиям среды.

Химическая оценка зеленых бобов

Питательность зеленых бобов фасоли определяется, кроме высокого содержания белков, наличием сахаров и витаминов. В 100 г вареной фасоли 123 ккал., в зеленых бобах – 25 ккал [13]. Зеленые бобы сорта фасоли овощной Памяти Рыжковой были отправлены для определения биохимического состава на белок, железо, цинк и йод в ФГБУ «Федеральный центр оценки безопасности и качества зерна и продуктов его переработки (Омский филиал)» (табл. 1) [13].

Таблица 1

Характеристика сортов фасоли овощной по биохимическому составу, зеленые бобы

№ п/п	Сорт	Год	Определяемый показатель			
			массовая доля белка, %	массовая доля йода, мг/кг	массовая доля железа, мг/кг	массовая доля цинка, мг/кг
1	Полька, стандарт	2016	15,63	0,49	0,18	15,88
		2019	16,14	0,45	0,21	18,80
2	Золушка, стандарт	2016	15,63	0,49	0,18	15,88
		2019	15,69	0,45	0,18	18,50
3	Памяти Рыжковой	2016	17,32	0,46	5,14	18,35
		2019	18,15	0,49	5,25	17,73

Содержание белка в зеленых бобах фасоли овощной Памяти Рыжковой зависит от сорта и условий года, данный показатель варьировал от 17,32 до 18,15 % [13]. Содержание йода в зеленых бобах сорта – 0,46-0,49 мг/кг. Высокое содержание железа – 5,25 мг/кг. Высокое содержание цинка – 18,35 мг/кг [13].

Фасоль – продукт функционального и диетического питания. Содержание на 100 г продукта: белки 22,3 – 25,6 % (суточная норма); жиры: 2 г – 3,1 % (суточная норма); углеводы 54 г – 37,9 % (суточная норма) [8, 13].

Агротехнологические рекомендации

Агротехнологический процесс складывается из: подготовки семян к посеву, разбивки участка и механизированный посев; способы посева: рядовой (с междурядьем 30см (сеялка СЗС-3,6) или широкорядный с междурядьем 45-50см (сеялка СН-16); боронование до всходов и по всходам (стадия 2-3-х настоящих листьев). Сорт подходит для однофазной механизированной уборки (комбайн САМПО), а в период технической спелости зеленых бобов, уборку можно провести методом счесывания. Уборку фасоли на семена проводить в фазе восковой спелости семян, когда бобы подсыхли и пожелтели не менее чем на 80-90 %, семена затвердеют и приобретут типичную для сорта окраску [3].

Заключение

Таким образом, селекционная работа по созданию среднеспелого сорта фасоли овощной Памяти Рыжковой селекции Омского ГАУ – это высокая урожайность семян и зеленых бобов, содержание белка, макро- и микроэлементов; пригодность к консервированию, высокое прикрепление нижнего боба, а также пригодность к механизированной уборке при возделывании в промышленном производстве. Сорт Памяти Рыжковой зарегистрирован в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию и рекомендуемый для возделывания в условиях южной лесостепи Западной Сибири (патент № 7845).

Конкурентоспособность сорта обеспечивается стабильной урожайностью, высокими вкусовыми качествами, способностью зеленых бобов длительное время сохранять хозяйственную годность, устойчивостью к антракнозу. Сорт хорошо переносит засуху и пониженные температуры.

Список литературы

1. Буданова В.И., Колотилов В.В., Колотилова А.С. Содержание белка и развариваемость семян у коллекционных образцов фасоли // Сб. науч. тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. Л., 1985. Т. 91. С. 91-95.

2. Буданова В.И., Буравцева Т.В., Лагутина Л.В. Изучение образцов мировой коллекции фасоли: метод. указания. Л.: ВИР, 1987. 27 с.

3. Голбан Н.М. Фасоль // Зернобобовые культуры. Кишинев, 1982. 52-82 с.
4. Инге-Вечтомов С.Г. Генетика с основами селекции: учебник для студентов высших учебных заведений; 3-е издание, перераб. и доп. СПб.: Изд-во Н-Л, 2015. 720 с.
5. Зернобобовые культуры в структуре функционального питания (фасоль зерновая и овощная, горох овощной, нут) / Н.Г. Казыдуб, С.П. Кузьмина, О.А. Коцюбинская [и др.] // Зернобобовые культуры – развивающееся направление в России: Материалы II Международного форума. Омск: Издательство ОмГАУ. 2018. С. 192-199.
6. Казыдуб Н.Г., Кузьмина С.П. Зернобобовые культуры – развивающееся направление в России // Первый Международный Форум «Зернобобовые культуры – развивающиеся направление в России», 19-22 июля 2016. Омск: ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2016. С. 5-9.
7. Казыдуб Н.Г., Коцюбинская О.А., Весельская В.А. Новый сорт фасоли овощной селекции Омского ГАУ – Маруся // Современные аспекты развития АПК: тр. Всероссийского совета молодых ученых и специалистов аграрных образовательных и научных учреждений. М., 2019. С. 19-23.
8. Основные направления и результаты селекционной работы зернобобовых культур в Омском ГАУ / Н.Г. Казыдуб, С.П. Кузьмина, А.А. Бурлаков, М.М. Плетнева // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 4(67). С. 74-77.
9. Оценка клубенькообразующей способности образцов зернобобовых культур в условиях южной лесостепи западной Сибири / Н.Г. Казыдуб, Т.В. Маракаева, Д.А. Золкин, М.В.Епанчинцев // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2015. № 1(17). С. 23-27.
10. Казыдуб Н.Г. Селекция и семеноводство фасоли в южной лесостепи Западной Сибири: автореф. на соиск. ученой степ. д-ра с.-х наук: 06.01.05. Тюмень, 2013. 296 с.
11. Казыдуб Н.Г., Коцюбинская О.А., Кириш П.В. Сорт фасоли овощной Маруся – новый перспективный сорт селекции Омского ГАУ // Вестник Омского ГАУ. 2018. № 4(32). С. 18-23.
12. Казыдуб Н.Г., Маракаева Т.В., Коцюбинская О.А. Урожайность и химический состав зеленых бобов сортов фасоли овощной селекции Омского ГАУ в условиях южной лесостепи Западной Сибири // Научно-практический журнал «Овощи России». 2017. № 2 (35). С. 50-55.
13. Коцюбинская О.А. Продуктивность, экологическая пластичность сортов фасоли овощной при различных сроках посева и нормах высева в южной лесостепи Западной Сибири: диссертация ... канд. с.-х. наук: 06.01.05. М., 2020. 190 с.
14. Коцюбинская О.А., Казыдуб Н.Г., Антошкин А.А. Продуктивность сортов фасоли овощной селекции Омского ГАУ в южной лесостепи Западной Сибири // Научно-практический журнал «Овощи России». 2020. № 1. С. 68-73.
15. Зернобобовые культуры / Д. Шнаар, Ф. Элмер, А. Постников [и др.]. Мн.: «ФУАинформ», 2000. 264 с.
16. Link W, Ederer W., Kittlitz E. von. Zuchtmethodische Entwicklungen – Nutzung von HetesbaiFababohnen // In Vorträge zur Pflanzenzüchtung: Produktqualität bei Öl – und wipfpflanzen – Forschung für die GFP, Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen, 1994. PP. 201-229.

AGROECOLOGICAL PASSPORT OF VEGETABLE MEMORY BEAN VARIETIES

Kazydub N.G., Kotsyubinskaya O.A., Kovalenko A.N.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin»,
Institutsкая sq. 1, Omsk, Omsk region, Russian Federation, 644008
e-mail: ^a ng.kazydub@omgau.org, ^{oa} kotsyubinskaya@omgau.org*

As a result of long-term work, the scientific team of the Agrotechnological Faculty of the Omsk State Agrarian University created a new variety of vegetable beans Pamyaty Ryzhkova, which is included in the state register of breeding achievements. On average, over 7 years (2015-2022), the variety Pamyaty Ryzhkova formed a yield of green beans 4.9 t/ha, seeds 2.3 t/ha, exceeding the variety standard of foreign selection - Polka (Poland) by 1, 5 t/ha. The main color of the seeds is black with beige patterns. Weight of 1000 seeds 250–280 gr. The variety is resistant to anthracnose [7]. Green bean - straight, thin [13,15]. The competitiveness of the variety is ensured by a stable yield, high palatability, and the ability of green beans to maintain economic suitability for a long time [11]. The variety tolerates drought and low temperatures well.

Keywords: *vegetable bean, variety, yield, manufacturability, microelements, ecological plasticity*

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ВРЕМЕНИ ОБОРОТА ПУЛОВ ПОЧВЫ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА CO₂

Квиткина А.К.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 2, к. 2, Российская Федерация

e-mail: aqvia@mail.ru

Сочетание инкубационного подхода и метода варьирования ¹³C при смене С3-С4 растительности позволяет разделить почвенное органическое вещество на пулы «молодого» и «старого» углерода. Размеры эмиссии углерода этих пулов были вычислены в ходе инкубационного лабораторного эксперимента для образцов почв чернозема после более 40-летнего выращивания кукурузы с использованием удобрений. Проверена гипотеза о неодинаковом характере зависимости разложения лабильного и устойчивого пулов органического углерода почвы (C_{org}) от температуры. Дифференцированный учет потерь CO₂ при разложении лабильного и устойчивого почвенного органического вещества (ПОВ) в длительном инкубационном эксперименте при температуре 2, 12 и 22 °C определяли с помощью метода варьирования содержания изотопа ¹³C при смене С3-С4 растительности. На основании определения констант скоростей разложения пулы ПОВ расположились в ряд с возрастающей устойчивостью: растительные остатки << новое (С4) ПОВ < старое (С3) ПОВ. Проверяемая гипотеза оказалась справедливой лишь для ограниченного интервала температур. Величина температурного коэффициента Q₁₀ в ряду устойчивости возрас- тала от 1,2 до 4,3 в интервале 12-22 °C. При низких температурах (2-12 °C) значения Q₁₀ существенно не различались для пулов ПОВ и составили 2,2-2,8. Наряду с константами скоростей разложения ПОВ соотношение нового и старого углерода в потоке CO₂ из почвы и величина отрицательного затравочного эффекта в отношении старого ПОВ, вызванного поступлением нового органического вещества, зависело от температуры. При внесении удобрений наблюдалось более интенсивное разложение С3-ПОВ по сравнению с неудобренным контролем.

Ключевые слова: *изотопная подпись, дыхание почвы, эмиссия CO₂, температурные зависимости, лабильное и устойчивое органическое вещество почвы*

Почва как резервуар углерода представляет собой совокупность многочисленных пулов углерода различной степени устойчивости (от лабильного пула с периодом обновления в несколько часов и дней, до стабильного пула с периодом оборота углерода в несколько тысяч лет) [1, 2]. Пулы различаются как по степени доступности для микроорганизмов (биохимической устойчивости и физической защищенности), так и по содержанию углерода, азота, отношению углерода к азоту (C/N), возрасту углерода и так далее. Для оценки состояния почвенного органического вещества (ПОВ), расчета и прогноза баланса углерода на территории важно знать не только запасы углерода в экосистеме, но и скорость оборачиваемости разных его пулов и фракций.

Изотопные методы (радиоуглеродное датирование, варьирование естественного обогащения ¹³C при смене С3-С4 растительности, разложение меченых растительных остатков) позволяют разделить почвенное органическое вещество (ПОВ) на более однородные пулы по времени обновления [1-3].

Изотопные отношения ¹³C/¹²C выражают величиной дельта, представляющей собой отклонение изотопного состава образца от изотопного состава стандарта, выраженной в промилле. В качестве стандарта для определения ¹³C используют окаменелость

мелового периода Belemnita Americana формации Пи-Ди (Южная Каролина, США) – PDB (Pee-Dee Belemnite).

Существует три разных типа фотосинтеза у высших растений: С3-фотосинтез (цикл Кальвина), С4-фотосинтез (цикл Хетча-Слэка-Карпилова), продукты которого богаче более тяжелыми изотопами углерода, и САМ-фотосинтез (Crassulaceae acid metabolism – кислотный метаболизм толстянковых). Для растений С3-типа, преобладающих в естественной флоре нашей страны, характерны величины δ¹³C -22...-32 ‰, в среднем -27 ‰. Кукуруза – растение с С4-типом фотосинтеза – накапливает в растительных остатках ¹³C изотоп углерода. Растения С4 (кукуруза, тростник, сорго) богаты тяжелым изотопом углерода, обладая δ¹³C от -10 до -18, со средним значением -13 ‰. Изотопный состав растений САМ-фотосинтеза находится в диапазоне от -10 до -28 ‰.

Метод варьирования естественного обогащения ¹³C при смене С3-С4 растительности дает возможность оценить относительно лабильный пул углерода со средним временем обновления от нескольких десятков до нескольких сотен лет. Устойчивость этого относительно лабильного пула к разложению в условиях меняющейся температуры и влажности почвы имеет большое значение в связи с парниковым

эффектом, поскольку прогнозы изменения климата рассчитывают обычно на 50-100 лет, то есть в интервале времени обновления пула.

Одинаково ли лабильный и стабильный пулы чувствительны к температуре? Целью одного из наших исследований было сравнить зависимости скоростей минерализации лабильных и устойчивых пулов ПОВ от температуры по данным изотопного состава CO_2 , выделяющегося в ходе инкубации почв, в которых наблюдалась смена растительности с С3 на растительность с С4-типом фотосинтеза.

Объект исследования – агрочернозем средне-мощный тяжелосуглинистый на покровном карбонатном суглинке ($C_{\text{орг}} 3,2\%$, $\text{pH}_{\text{KCl}} = 5,3$). Изучали следующие варианты опыта, заложенного еще в 1966 г. на ОПС ВНИИ кукурузы Хохольского района, Воронежская область: многолетний пар, монокультура кукурузы без удобрений, монокультура кукурузы с $\text{N}_{120}\text{P}_{60}\text{K}_{90}$. Проводили 2 параллельные серии экспериментов при температурах 2, 12 и 22 °С. В первой серии опытов определяли общую эмиссию CO_2 из почвы. Концентрацию CO_2 определяли на газовом хроматографе. Вторая серия экспериментов была заложена для определения изотопного состава углерода CO_2 , выделяющегося из почвы. Содержание тяжелого изотопа ^{13}C в почве определяли на масс-спектрометре «МАТ 253». Поглощенный CO_2 осаждали 2 н. раствором BaCl_2 , образовавшийся осадок BaCO_3 отфильтровывали, промывали водой и высушивали при температуре 105 °С до постоянной массы. В высушенном осадке определяли соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ на масс-спектрометре после термического разложения карбоната бария при 850 °С. Содержание тяжелого изотопа ^{13}C в почве определяли на масс-

спектрометре МАТ 253 (Thermo, Finnigan, Германия) с элементным анализатором Euro EA (Eurovector, Италия). Константу разложения (k) и среднее время обновления (MRT) молодого С4 и старого С3 углерода рассчитывали, полагая, что разложение лабильного С4-ПОВ и стабильного С3-ПОВ происходит по экспоненциальному закону.

Данные по изотопному составу углерода использовали для расчета доли С4- CO_2 в общей эмиссии CO_2 из почвы и доли С4-ПОВ в $C_{\text{орг}}$ в почве.

$$f = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{ii}} - \delta^{13}\text{C}_3}{\delta^{13}\text{C}_{\text{C4}} - \delta^{13}\text{C}_3}$$

Температурный коэффициент Q_{10} рассчитывали, как отношение констант скорости выделения CO_2 .

Величины среднего времени обновления растительных остатков (рис. 1, рис. 2) изменялись от 2 до 5 лет, «молодого» пула С4-ПОВ – от 5 до 35 лет, а «старого» пула С3-ПОВ – от 35 до 500 лет в зависимости от температуры.

Результаты демонстрируют не только среднее время обновления различных пулов углерода, но и их температурную чувствительность – Q_{10} . Величина Q_{10} в ряду устойчивости кукуруза < новое С4 ПОВ < старое С3 ПОВ возрастала от 1,2 до 4,3 в интервале 12-22 °С. При низких температурах 2-12 °С значения Q_{10} для всех пулов существенно не отличались и составили 2,2-2,8.

Эксперимент показал, что даже при ежегодном поступлении свежего органического вещества в почву виде растительного опада, доля старого углерода в дыхании почвы составляет более 50 %. При этом с увеличением температуры доля участия устойчивого пула в дыхании почв также увеличивается.

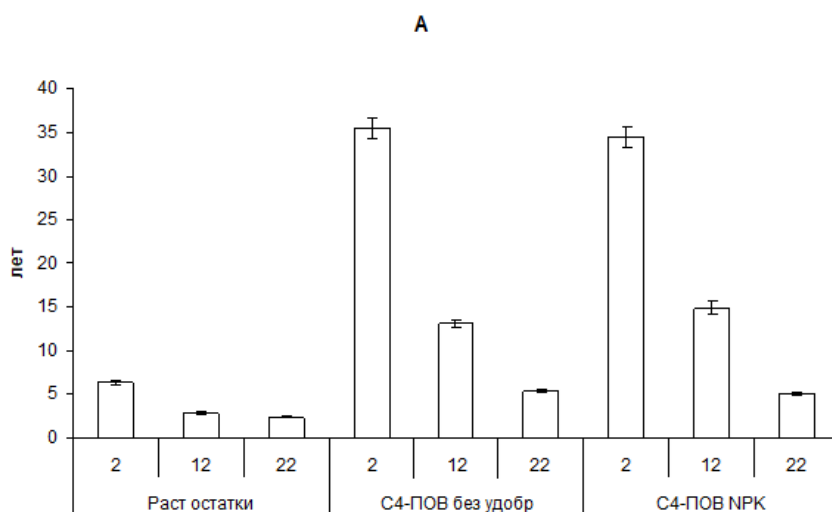


Рисунок 1. Время оборота пулов нового почвенного органического вещества при температуре 2, 12 и 22 °С

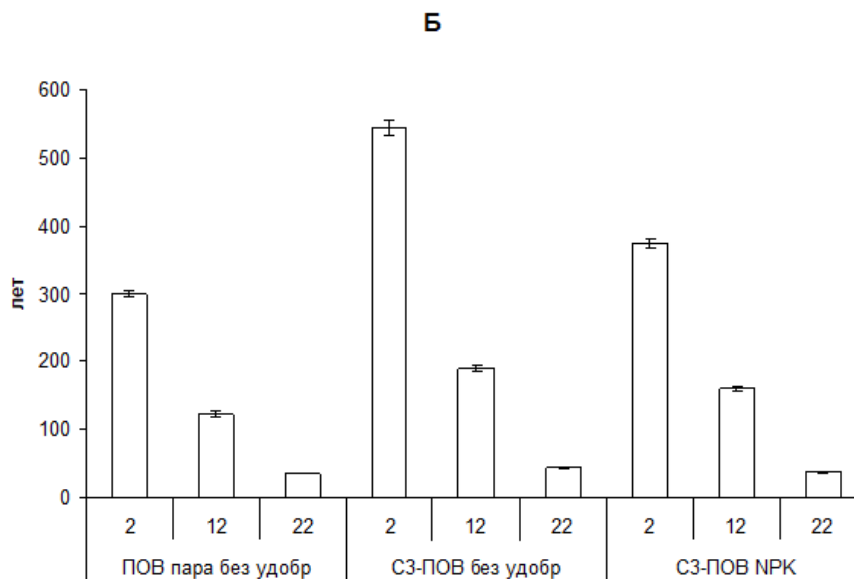


Рисунок 2. Время оборота пулов старого почвенного органического вещества при температуре 2, 12 и 22 °С

В диапазоне низких температур (2-12 °С) пул старого и молодого углерода проявляют примерно одинаковую температурную чувствительность. Но в диапазоне высоких температур (12-22 °С) пул старого С3-углерода оказывается гораздо более чувствителен к повышению температуры Q_{10} 12-22 °С = 3,74, чем пул молодого С4-углерода Q_{10} 12-22 °С = 2,66.

Обнаружено, что режим «черного пара» на черноземе в течение 40 лет не может служить эталонным для накопления устойчивого органического вещества, поскольку без пополнения пула ПОВ пожнивными остатками происходила дестабилизация и снижение в 1,5 раза времени существования пула «среднеустойчивого» органического вещества.

Выращивание кукурузы, внесение пожнивных остатков и азотных удобрений приводит к увеличению MRT среднеустойчивого пула С3-ПОВ по сравнению с режимом долговременного «черного пара». Однако внесение азотных удобрений ускоряет круговорот С3-ПОВ по сравнению с контролем,

способствуя дестабилизации органического вещества как при высоких, так и при низких температурах.

Список литературы

1. Влияние температуры на интенсивность разложения лабильного и устойчивого пулов органического вещества агрочернозема / А.А. Ларионова, А.К. Квиткина, И.В. Евдокимов [и др.] // Почвоведение. 2013. № 7. С. 803.
2. Тиунов А.В. Стабильные изотопы углерода и азота в почвенно-экологических исследованиях // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2007. № 4. С. 475-489.
3. Возможности и проблемы использования методов геохимии стабильных изотопов углерода в почвенных исследованиях / Е.Г. Моргун, И.В. Ковда, Я.Г. Рысков, С.А. Олейник // Почвоведение. 2008. № 3. С. 299-310.

EVALUATION OF THE TEMPERATURE SENSITIVITY AND MEAN RESIDENCE TIME TIME OF SOIL POOLS FROM CO₂ ISOTOPE COMPOSITION

Kvitkina A.K.

*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences,
Institutskaya st. 2, bld. 2, Pushchino, Moscow region, Russian Federation, 142290
e-mail: aqvia@mail.ru*

The issues of definition mean residence time of soil organic carbon (SOC) and the SOC pools separation by means of physical, chemical and biological fractionation are discussed. The special attention is given to allocation of labile and stable SOC pools by isotope and biokinetic methods. MRT "young" pool C4-SOC changed from 5 till 35 years, and "old" pool C3-SOC - from 35 till 500 years depending on temperature.

Keywords: *isotope signature, soil respiration, CO2 emission, temperature dependences, labile and stable soil organic matter*

УДК 004.658.2

БАЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ГЕОДАНЫХ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: rirae70@yandex.ru

С использованием геоинформационной среды ArcGis создана база пространственно-временных геоданных радиоактивно загрязненных территорий Брянской, Орловской, Калужской и Тульской областей. Разработанная база данных позволяет обращаться к ней напрямую из программной среды ArcGis и использовать сохраненную в ней информацию для создания электронных карт и анализа картографической информации.

Ключевые слова: база данных, ArcGis, атрибутивная информация, радиоактивное загрязнение

В результате многолетних наблюдений за состоянием радиоактивно загрязненных территорий Брянской, Орловской, Калужской и Тульской областей накопился большой массив данных, послуживших источником исходной информации для создания геоинформационной системы, на основе которой, после соответствующей обработки, могут приниматься управленческие решения по использованию радиоактивно загрязненных земель.

С использованием геоинформационной среды ArcGis создана база пространственно-временных геоданных радиоактивно загрязненных территорий.

Оцифрованные объекты с атрибутивными таблицами сохранены в персональной базе данных.

Персональная база геоданных представляет из себя базу данных Microsoft Access, которая может хранить, выполнять запросы и управлять как пространственными, так и непространственными данными. Данная база позволяет обращаться к ней напрямую из программной среды ArcGis и использовать сохраненную в ней информацию для создания электронных карт и анализа картографической информации.

Вся собранная в таблицах пользовательских данных информация хранится в виде готовых к экспорту объектов в каталоге, которые после экспортирования в ArcMap отображаются в рабочей области программы для дальнейшей работы по редактированию и анализу данных (рис. 1).

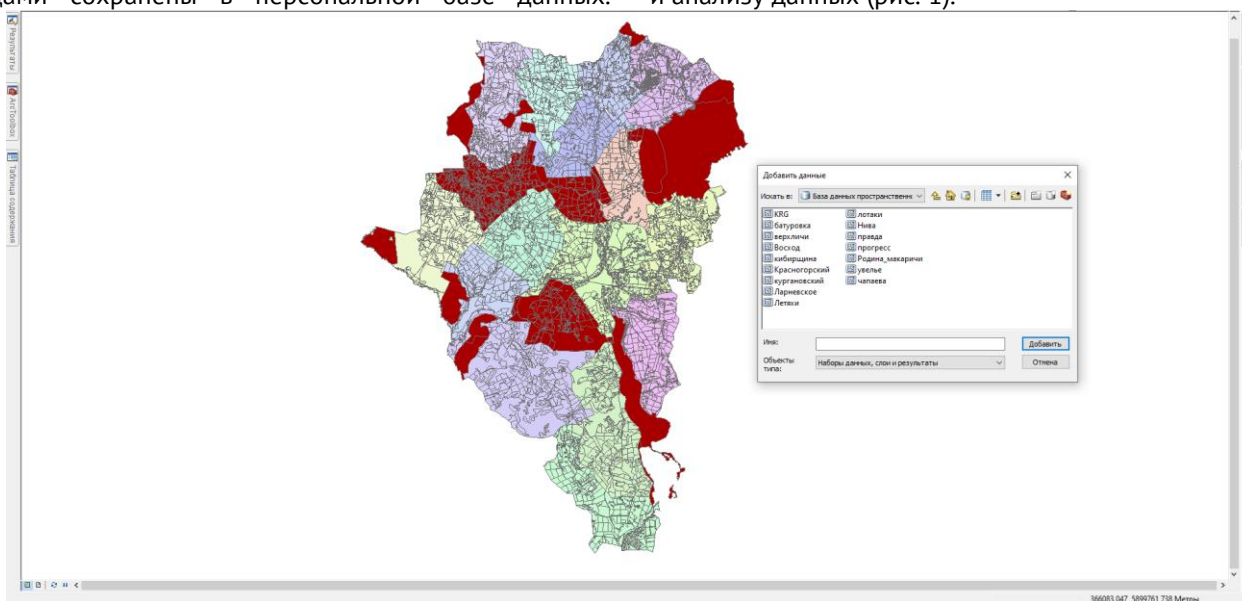


Рисунок 1 – Добавление пользовательских таблиц базы геоданных в рабочую область ArcMap

Пилотная версия базы была реализована для Красногорского района Брянской области. На сегодняшний момент в основные таблицы базы данных внесено более 22057 записей.

DATABASE OF SPATIAL AND TEMPORAL GEODATA OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED TERRITORIES

Krechetnikov V.V., Titov I.E., Shubina O.A., Krechetnikova E.O.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: rirae70@yandex.ru*

Using the ArcGIS a database of spatial and temporal geodata of radioactively contaminated territories of the Bryansk, Orel, Kaluga and Tula regions has been created. The database allows to access it directly from the ArcGIS software environment and use the information stored in it to create electronic maps and analyze cartographic information.

Keywords: *database, ArcGIS, attribute information, radioactive contamination*

УДК 579.64

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ШТАММОВ CHLORELLA-ПОДОБНЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ, ИЗОЛИРОВАННЫХ ИЗ КОММЕРЧЕСКИХ БИОПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ «ЖИВОЙ ХЛОРЕЛЛЫ»

Кривина Е.С.^а, Темралева А.Д.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр
«Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук»,
142290, Московская обл., г. Пущино, просп. Науки, д. 3, Российская Федерация
e-mail: ^а pepelisa@yandex.ru*

В данной работе представлены результаты первого исследования *Chlorella*-подобных штаммов зеленых микроводорослей из коммерческих биопрепаратов различного назначения, выполненного с помощью методов морфологического и молекулярно-генетического анализов. Установлено, что во всех анализируемых образцах присутствовали представители *Chlorella*-клады или сестринской *Parachlorella*-клады. Также были обнаружены микроводоросли из родов *Edaphochlorella*, *Chloroidium*, *Edaphochloris* и *Muriella* (класс Trebouxiophyceae), а также *Coelastrella* и *Chromochloris* (класс Chlorophyceae). По данным прямой световой микроскопии ни один из препаратов не являлся альгологически чистой культурой. Во всех препаратах наблюдали нитчатые цианобактерии, а в биопрепарате «Гера» было отмечено наличие диатомовых водорослей. Поскольку правильная идентификация зеленых микроводорослей только на основе морфологических характеристик весьма затруднительна вследствие их скудности и пластичности, то контроль за составом микроводорослей в биопрепаратах следует осуществлять, используя современные молекулярно-генетические методы.

Ключевые слова: *биопрепараты, Chlorella-подобные микроводоросли, морфология, филогения, ДНК-баркодинг*

Род *Chlorella* с типовым видом *C. vulgaris* был описан более 130 лет назад М.В. Бейеринком. Изначально к нему относили все мелкие (<10 мкм) кокковидные одноклеточные зеленые микроводоросли из водных местообитаний. Несмотря на длительную историю изучения, систематика *Chlorella*-подобных микроводорослей содержит немало «белых пятен», которые нуждаются в интенсивном изучении. С одной стороны, это связано с ограниченным набором морфологических свойств, с одной стороны, с

высокой пластичностью фенотипа, когда в зависимости от условий культивирования ряд важных морфологических признаков (например, формирование колоний, продуцирование щетинок, образование слизи) может не проявляться. Все это существенно затрудняет идентификацию *Chlorella*-подобных микроводорослей на основе данных световой микроскопии [1]. В настоящее время биотехнологический потенциал *Chlorella*-подобных микроводорослей вызывает все больший интерес: их активно используют

для производства биотоплива и очистки сточных вод [2-5]. Кроме того, было установлено, что ряд микроводорослей способны накапливать липиды или другие ценные метаболиты, что позволяет применять их в качестве источника сырья для производства кормов для животных, биодобавок и косметологических препаратов. Также на основе суспензий *Chorella*-подобных микроводорослей активно разрабатываются биопрепараты, используемые в качестве биопестицидов и подкормки в растениеводстве [3, 4, 6, 7]. Независимо от сферы применения точная идентификация микроводорослей является актуальной задачей, поскольку биотехнологически значимые характеристики у представителей различных видов, несмотря на сходную морфологию, могут существенно варьировать. В данной работе представлены результаты таксономической идентификации штаммов *Chlorella*-подобных микроводорослей, выделенных из коммерческих биопрепаратов на основе «живой хлореллы», с помощью морфологического и молекулярно-генетического анализов.

Объектами данного исследования стали 19 штаммов зеленых микроводорослей, выделенные из 6 биопрепаратов: 1) напиток «Зеленое солнце» (ООО «Зеленое Солнце», Пермский край: штаммы ZS1, ZS3,

ZS4, ZS9; 2) удобрение «Гера» (ООО «Гера», Московская область: штаммы G1, G4, G5, G6, G7; 3) удобрение «Биоабсолют» (ООО НПО «БиоТехнология», Московская область: штаммы Ab4, Ab5); 4) органический напиток «Живая хлорелла» (ООО «Дело», Пензенская область: ChloN2, ChloN3, ChloN4; 5) удобрение «Живая хлорелла»: S2, S3, S8; 6) удобрение «StimGarden» (ООО «Дело», Пензенская область: St1, St6). Изоляция и культивирование штаммов, морфологический и молекулярно-генетический анализ осуществляли по стандартным методикам, подробно описанным в статье Кривиной, Темралеевой (2022) [8].

Состав каждого из исследуемых биопрепаратов был предварительно изучен с помощью световой микроскопии (рис. 1). На этом этапе исследования было установлено, что ни один из препаратов не являлся альгологически чистой культурой. Наибольшим разнообразием отличался биопрепарат «Гера», в составе которого помимо зеленых микроводорослей были встречены диатомовые водоросли и цианобактерии. Отметим, что единичные клетки цианобактерий встречались абсолютно во всех биопрепаратах все зависимости от их назначения. Также суспензии содержали гифы и цисты грибов и клетки бактерий.

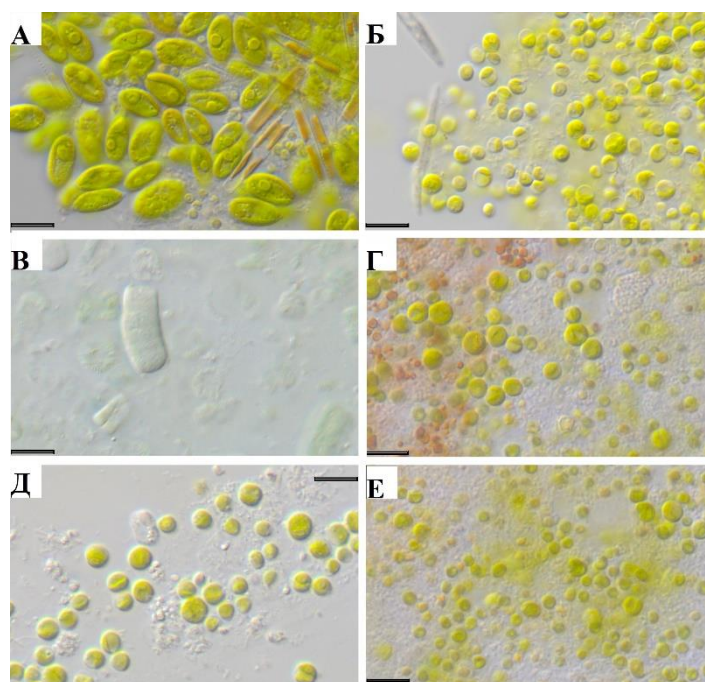


Рисунок 1. Биопрепараты: А – «Гера», Б – «Зеленое солнце», В – «Биоабсолют», Г – «Живая хлорелла» (удобрение), Д – «StimGarden», Е – «Живая хлорелла» (напиток). Шкала: 10 мкм

Далее из биопрепаратов было получено 56 культур микроводорослей и 8 культур цианобактерий. Для дальнейшего анализа было отобрано 19 наиболее типичных штаммов, как, собственно, *Chlorella*-подобных водорослей, так и наиболее часто встречающихся видов, чей морфотип при световой микроскопии был хотя бы отдаленно схож с представителями

рода *Chlorella*: представители клады *Nannochloris*, родов *Muriella*, *Coelastrella*, *Chloroidium*, *Chromochloris*.

В результате молекулярно-генетического анализа фрагмента 18S-ITS1-5.8S-ITS2 было установлено, что в составе каждого из исследуемых биопрепаратов действительно были обнаружены микроводоросли либо из *Chlorella*-клады, либо из

сестринской к ней *Parachlorella*-клады (табл. 1). Собственно, *C. vulgaris* были обнаружены в 4 препаратах – напитках «Зеленое солнце» и «Живая хлорелла», удобрениях «Биоабсолют» и «Живая хлорелла». В 2 препаратах (удобрения «Гера» и «StimGarden») она не была обнаружена. Из наиболее близких к ней видов была встречена *C. sorokiniana* в напитке «Зеленое солнце» и в удобрение «Гера», *Planktochlorella nurekis* – в удобрении «StimGarden» и в напитке «Живая хлорелла». Среди выделенных штаммов, которые хотя

бы на одной из стадий жизненного цикла обладают *Chlorella*-подобным морфотипом, были обнаружены представители видов *Edaphochlorella mirabilis*, *Chloroidium saccharophilum*, *Coelastrella aeroterrestica*, *Edaphochloris andrejevae*, *Muriella terrestris*, *Chromochloris zofingiensis*. Наиболее богатым видовой состав *Chlorella*-подобных микроводорослей был в удобрении «Гера» и напитке «Зеленое солнце», наиболее бедным – в удобрении «Биоабсолют».

Таблица 1

Видовой состав зеленых микроводорослей, выделенных из коммерческих биопрепаратов на основе «живой хлореллы»

Вид	Zs	G	Ab	ChloN	S	St
<i>Chlorella vulgaris</i>	ZS1	–	Ab5	ChloN4	S3	–
<i>C. sorokiniana</i>	ZS9	G1	–	–	–	–
<i>Parachlorella kessleri</i>	–	–	–	ChloN3	–	–
<i>Planktochlorella nurekis</i>	–	–	–	ChloN2	–	St1
<i>Chloroidium saccharophilum</i>	–	–	–	–	–	St6
<i>Edaphochlorella mirabilis</i>	ZS3	G4	–	–	S2	–
<i>Edaphochloris andrejevii</i>	ZS4	G6	–	–	–	–
<i>Muriella terrestris</i>	–	G7	–	–	–	–
<i>Coelastrella aeroterrestica</i>	–	–	Ab4	–	S8	–
<i>Chromochloris zofingiensis</i>	–	G5	–	–	–	–

Примечание. ZS – напиток «Зеленое солнце», G – удобрение «Гера», Ab – удобрение «Биоабсолют», ChloN – органический напиток «Живая хлорелла», S – удобрение «Живая хлорелла», St – удобрение «StimGarden».

Таким образом, контроль качественного состава микроводорослей биопрепаратов необходимо осуществлять с помощью современных молекулярно-генетических методов. При наличии альгологически чистой культуры наиболее надежным и эффективным методом идентификации может стать амплификация в качестве ДНК-баркода ITS2 с последующим секвенированием по Сэнгеру. В случае смешанных культур, которыми оказались изученные биопрепараты, чтобы избежать длительного этапа очистки и получения отдельных монокультур, необходимо использовать амплификацию того же ДНК-баркода с последующим высокопроизводительным секвенированием.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-34-60002. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

1. Generic concept in *Chlorella*-related coccoid green algae (Chlorophyta, Trebouxiophyceae) / W. Luo, T. Pröschold, C. Bock, L. Krienitz // Plant Biology. 2010. Vol. 12. PP. 545-553.

2. Lipstein B., Hurwitz S. The nutritional value of sewage-grown samples of *Chlorella* and *Micractinium* in broiler diets // Poultry Science. 1983. Vol. 62. № 7. PP. 1254-1260.

3. Thermo-resistant green microalgae for effective biodiesel production: Isolation and characterization of unialgal species from geothermal flora of Central Anatolia / M. Onay, C.A. Sonmez, H. Oktem, M. Yücel // Biore-sour. Technol. 2014. Vol. 169. PP. 62-71.

4. Adar O., Kaplan-Levy R.N., Banet G. High temperature *Chlorellaceae* (Chlorophyta) strains from the Syrian-African Rift Valley: the effect of salinity and temperature on growth, morphology and sporulation mode // Eur. J. Phycol. 2016. Vol. 51. № 4. PP. 387-400.

5. Mehrabadi A., Farid M.M., Craggs R. Potential of five different isolated colonial algal species for wastewater treatment and biomass energy production // Algal Res. 2017. Vol. 21. PP. 1-8.

6. Antarctic Freshwater Microalga, *Micractinium simplicissimum*, Suppresses Inflammation / H. Chae, J.B. Seo, S. Kim, E.J. Youn // J. Nanosci. Nanotechnol. 2021. Vol. 21. № 7. PP. 4098-4103(6).

7. Вайшля О.Б., Кулятов Д.В. Перспективные виды микроводорослей для биodeградации поллютантов водных экосистем юга Западной Сибири // Известия СамНЦ РАН. 2011. Вып. 1. № 4. С. 787-789.

8. Кривина Е.С., Темралеева А.Д. Морфологический и молекулярно-генетический анализ штаммов зеленых микроводорослей, выделенных из коммерческих биопрепаратов на основе «живой хлореллы» // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. 2022. Т. 77. № 3. С. 160-165.

IDENTIFICATION OF CHLORELLA-LIKE MICROALGAE STRAINS ISOLATED FROM COMMERCIAL BIOLOGICAL PRODUCTS BASED ON "LIVE CHLORELLA"

Krivina E.S.^a, Temraleeva A.D.

Federal Research Center «Pushchino Scientific Center for Biological Research of the Russian Academy of Sciences, prospect Nauki 3, Pushchino, Moscow region, Russian Federation, 142290
e-mail: ^a pepelisa@yandex.ru

This paper presents the results of the first study of *Chlorella*-like strains of green microalgae from commercial biological products for various purposes, performed using morphological and molecular genetic analysis methods. It was found that representatives of the *Chlorella*-clade or sister *Parachlorella*-clade were present in all analyzed samples. Microalgae from the genera *Edaphochlorella*, *Chloroidium*, *Edaphochloris* and *Muriella* (class Trebouxiophyceae), as well as *Coelastrella* and *Chromochloris* (class Chlorophyceae) were also found. According to direct light microscopy, none of the preparations was an algologically pure culture. Filamentous cyanobacteria were observed in all preparations, and the presence of diatoms was noted in the biological preparation "Gera". Since the correct identification of green microalgae only on the basis of morphological characteristics is very difficult due to their scarcity and plasticity, the control of the composition of microalgae in biological products should be carried out using modern molecular genetic methods.

Keywords: *biological products, Chlorella-like microalgae, morphology, phylogeny, DNA barcoding*

УДК 574:637.54:546.798.22:539.16 (574.41)

ПЕРЕХОД $^{239+240}\text{Pu}$ В МЯСО ДОМАШНЕЙ ПТИЦЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИЕМЕ С ПОЧВОЙ, ВОДОЙ И ТРАВЯНОЙ МУКОЙ

Мамырбаева А.С.^a, Паницкий А.В., Базарбаева А.Б., Лещенко Н.А., Байгазы С.А.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Министерства энергетики Республики Казахстан, 071100, область Абай, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 2Б, Республика Казахстан
e-mail: ^a mamyrbaeva@nnc.kz

В работе представлены результаты натурных исследований по изучению особенностей перехода трансуранового радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в ткани домашней птицы при длительном приеме с загрязненными почвой, водой и травяной мукой. Изучена динамика перехода и динамика выведения радионуклида, определены максимальные концентрации. Полученные результаты показали различия в распределении радионуклидов в тканях при различных источниках поступления.

Ключевые слова: СИП, трансурановый радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$, радиоактивное загрязнение

Одним из возможных и основных видов деятельности населения на территориях бывшего Семипалатинского полигона является животноводство, в частности, овцеводство, коневодство, скотоводство и птицеводство. Для полной оценки безопасности использования земель необходимы знания о

параметрах перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию. К настоящему времени имеются обобщающие литературные источники, в которых собраны результаты исследований многих работ. К ним можно отнести обобщение С. Фесенко [1], документы МАГАТЭ [2] и др., которые

показывают, что переходу трансураниевых радионуклидов в животноводческую продукцию, посвящены единичные работы.

В данных исследованиях в качестве объекта исследования были использованы бройлеры, которые были разделены на три группы. Все условия содержания, во всех 3-х группах были идентичны за исключением источника поступления радионуклида в организм кур, который добавляли в суточный рацион: 1-й группе добавляли загрязненную почву, 2-й группе – загрязненный растительный корм, 3-й группе спаивали загрязненную воду/раствор. Длительность кормления составила 70 суток [3].

Результаты исследования показали, что основным органом депонирования $^{239+240}\text{Pu}$ является печень. По содержанию радионуклида в печени от различных источников поступления наблюдается их следующий порядок «почва > вода > корм», т.е. максимальное содержание радионуклида в печени составляет 150 ± 10 Бк/кг при поступлении с почвой, 12 ± 1 Бк/кг при поступлении с водой и $2 \pm 0,4$ Бк/кг при поступлении с растительным кормом. В мышечной ткани содержание более равномерное с аналогичным порядком распределения, где максимальные концентрации составляют $2,5 \pm 0,4$ Бк/кг при поступлении с почвой, $1,1 \pm 0,2$ Бк/кг при поступлении с водой и $0,04 \pm 0,02$ Бк/кг при поступлении с растительным кормом.

В результате проведенного исследования и полученных данных установлено, что динамика

накопления $^{239+240}\text{Pu}$ различна в зависимости от источника поступления, физико-химической формы (почва, вода, корм), вида тканей. Доступность $^{239+240}\text{Pu}$, поступившего с почвой, значительно выше, чем при поступлении с водой и кормом. Полученный объем данных может быть применим для расчетов дозовых нагрузок от продукции птицеводства, для расчета предельно допустимых уровней поступления радионуклида в организм человека, а также при разработке рекомендаций о получении продукции в условия загрязнения.

Список литературы

1. Review of Russian language studies on radionuclide behavior in agricultural animals: 3. Transfer to muscle / S. Fesenko, N. Isamov, B.J. Howard [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. Vol. 100. PP. 215-231.

2. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments / Technical Reports Series. – Vienna: IAEA, 2010. № 472.

3. The transfer of ^{241}Am and ^{137}Cs to the tissues of broilers' organs / A.S. Mamyrbayeva, Zh.A. Baigazinov, S.N. Lukashenko [et al.] // PLOS ONE. 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235109>.

TRANSITION OF $^{239+240}\text{Pu}$ INTO POULTRY MEAT WITH LONG-TERM INTAKE WITH SOIL, WATER AND GRASS MEAL

Mamyrbayeva A.S.^a, Panitsky A.V., Baigazy S.A., Bazarbaeva A.B., Leshenko N.A.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK,
Beibyt atom st. 2, Kurchatov, Abai region, Republic of Kazakhstan, 071100
e-mail: ^a mamyrbayeva@nnc.kz

The paper presents the results of field studies on the study of the characteristics of the transition of the transuranium radionuclide $^{239+240}\text{Pu}$ in the tissues of poultry during long-term intake with contaminated soil, water and grass meal. The dynamics of the transition and the dynamics of the removal of the radionuclide were studied, and the maximum concentrations were determined. The results obtained showed differences in the distribution of radionuclides in organs and tissues for different sources of intake.

Keywords: STS, transuranium radionuclide $^{239+240}\text{Pu}$, radioactive contamination

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕАКТОРОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Микаилова Р.А.^а, Спиридонов С.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^а mik_r_a@rira.ru

В данной работе представлен метод, который позволяет оценить и сравнить влияние аварийных выбросов АЭС и других радиационно-опасных объектов на окружающую среду. В ходе работы рассчитан радиозоологический риск с учетом вероятности аварий, объема выбрасываемых радиоактивных веществ и их воздействия на окружающую среду. В качестве референтной экосистемы для оценки использовался древесный ярус хвойного леса. Выполнено ранжирование радиозоологического риска для различных реакторных установок (ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, PWR-890, BWR-1412, EPR-1600). В результате анализа было установлено, что реактор нового поколения ВВЭР-1200 обладает наиболее низким потенциальным радиационным воздействием на окружающую среду.

Ключевые слова: радиационная авария, реакторная установка, природная среда, аварийные сценарии, радиозоологическая оценка, дозы облучения, древесный ярус леса

Обеспечение безопасности АЭС является приоритетной задачей, требующей комплексной оценки их радиозоологических характеристик [1]. Несмотря на строгий контроль радиационных норм в нормальных условиях эксплуатации, возможность радиоактивных выбросов в чрезвычайных ситуациях сохраняется. Этот аспект играет решающую роль в обеспечении экологической безопасности и обязывает внимательно анализировать потенциальное воздействие аварийных сценариев как на человека, так и на окружающую среду [0].

Цель данной работы заключается в представлении метода, который позволит сравнивать ядерно-

энергетические объекты с точки зрения их потенциального воздействия на природную среду в случае аварийных радиоактивных выбросов.

На этапе планирования АЭС и других объектов ядерной энергетики, являющихся потенциальными источниками радиоактивных выбросов, разрабатываются сценарии проектных и запроектных аварий. В рамках данной работы были рассмотрены сценарии, предполагающие возможные аварийные выбросы радиоактивных веществ на АЭС с реакторами ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, PWR-890, BWR-1412 и EPR-1600 [0-0], наиболее тяжелые из которых представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики наиболее тяжелых аварийных сценариев

Реактор	Суммарная активность выброса, Тбк	Высота выброса	Вероятность, год ⁻¹
PWR-890	$7,51 \cdot 10^6$	8,4	$1,0 \cdot 10^{-5} - 2,0 \cdot 10^{-5}$
BWR-1412	$2,38 \cdot 10^7$	39,6	$3,0 \cdot 10^{-7}$
EPR-1600	$1,04 \cdot 10^8$	10	$3,83 \cdot 10^{-9}$
VVER-1200	$1,49 \cdot 10^4$	30	$1,0 \cdot 10^{-7}$
VVER-1000	$4,50 \cdot 10^5$	25	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Оценка проводилась для первого года после гипотетической аварии, поскольку острое радиационное воздействие может вызвать серьезное повреждение природных сообществ.

В качестве референтного природного объекта для оценки радиационного воздействия был использован древесный ярус соснового леса по следующим причинам:

- сосна включена в список референтных животных и растений МКРЗ;
- кроны хвойных деревьев эффективно улавливают значительную часть радионуклидов в воздухе;
- хвойные древесные растения обладают высокой радиочувствительностью, по сравнению с другими растительными организмами (лиственными деревьями и травянистыми растениями) [0];

- использование древесного яруса предпочтительнее для оценок в острый период, по сравнению с радиочувствительными млекопитающими, перемещающимися по территории радиоактивного следа и за его пределы;

- повреждение деревьев нарушает общую структуру и функционирование экосистемы;

- имеются доступные данные для параметризации миграционно-дозиметрических моделей, собранные в результате обширных исследований в области лесной радиоэкологии после Кыштымской и Чернобыльской аварий.

Для проведения скрининговой сравнительной оценки ядерных энергетических объектов как потенциальных источников радиационного воздействия на биоту был использован консервативный подход. В качестве характеристики последствий реализации аварийного сценария служил индекс радиационного воздействия (RIF). RIF представляет собой отношение максимальной дозы, полученной референтным природным сообществом, к предельной дозе.

Для расчета RIF необходим дозовый порог для референтного природного объекта. Учитывая, что при сильных аварийных сценариях может произойти гибель сосновых деревьев от радиационного воздействия, целесообразным представляется установить летальную дозу в качестве такого порога. После анализа данных, полученных в ходе эксперимента «Экос», проведенного в условиях острого облучения соснового леса, а также на территории, подвергшейся выбросам в результате чернобыльской катастрофы [8, 0-0], было принято решение установить значение этого порога на уровне 100 Гр.

Дозовые нагрузки на древесные растения оценивали с использованием совокупности миграционных и дозиметрических моделей [13]. Перенос радионуклидов в атмосфере рассчитывали на основе гауссовой модели. При этом учтены метеорологические параметры, такие как категория устойчивости атмосферы (F) и скорость ветра (0,5 м/с). При моделировании перераспределения радионуклидов в лесной экосистеме учитывались основные процессы: их первоначальное задерживание кронами деревьев (с коэффициентом задерживания 0,9), экологическое очищение полога леса (с константой экологического очищения $7,7 \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹) и радиоактивный распад.

Для каждого сценария аварии был рассчитан RIF, но сравнительная радиоэкологическая оценка реакторных установок по данным единичного аварийного сценария не является полновесной, поскольку имеется существенная вариабельность характеристик отдельных сценариев. Поэтому для ранжирования реакторов с точки зрения потенциального радиационного воздействия на природную среду были рассмотрены совокупности всех постулированных аварий.

На рисунке 1 приведены результаты сравнительной радиоэкологической оценки ядерных реакторов в виде значений аварийных рисков (R). Эти риски получены на основании RIF и вероятностей возникновения аварий. Согласно этой оценке, реактор PWR-890 является наиболее потенциально опасным для биоты. Это связано с тем, что в расчетах для этого реактора были использованы наиболее высокие значения вероятности аварийных сценариев, выбранные из диапазона доступных вероятностей (табл.1).

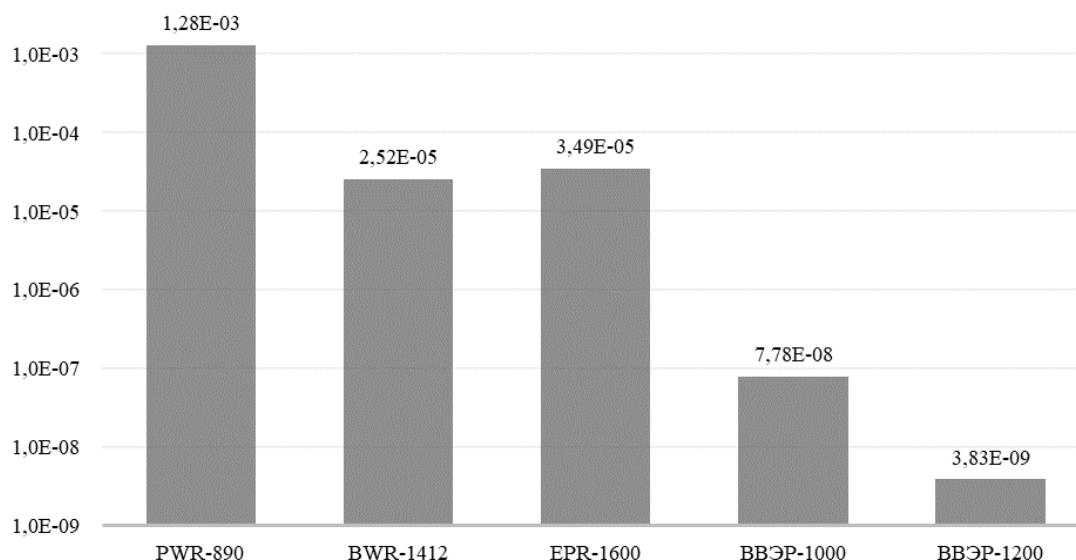


Рисунок 1. Аварийные риски воздействия реакторных установок на референтное природное сообщество

Несмотря на то, что в перечне аварийных сценариев реактора EPR-1600 есть сценарий с наибольшей суммарной активностью выбрасываемых радионуклидов, вклад этого сценария в общий показатель

(R) оценки компенсируется его низкой вероятностью возникновения. Вероятности возникновения аварийных ситуаций на реакторных установках ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 (10^{-6} - 10^{-7} в год) сопоставимы с

аналогичными вероятностями для реакторов PWR-890, BWR-1412 и двух сценариев реактора EPR-1600. Тем не менее, из-за относительно низких активностей радионуклидов, выбрасываемых российскими реакторами в аварийных ситуациях, радиэкологические риски для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 остаются невысокими. Следует отметить, что значение R для реактора нового поколения ВВЭР-1200 в 20 раз меньше, чем для ВВЭР-1000.

В связи с постоянным развитием атомной энергетики, разработкой инновационных реакторов и ядерных топливных циклов, возрастает необходимость в проведении радиэкологических оценок. Такие исследования нужны для сравнения различных типов реакторов и определения их потенциального воздействия на окружающую среду. Предложенная методика упрощает данный процесс, позволяя оценивать риски радиационного воздействия на представительную природную систему – например, хвойные леса – используя информацию о сценариях аварий для реакторных установок. Этот всеобъемлющий подход применим не только для оценки отдельных блоков атомных электростанций, но также распространяется на другие аспекты ядерного топливного цикла, что делает его мощным инструментом для оценки потенциальной радиационной опасности.

Список литературы

1. Спиридонов С.И. Перспективы системной радиэкологии в решении инновационных задач ядерной энергетики // Радиационная биология. Радиэкология. 2014. Т. 54. № 4. С. 415-422.

2. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики. // Атомная энергия. 2013. Т. 114. Вып. 5. С. 243-249.

3. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Этап 4. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588 – ПЗ – ОИ4. КНИГА 4. Раздел 9. Характеристика окружающей среды и оценка воздействий на нее БелАЭС. 2009. 209 с.

4. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции

в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчет об ОВОС. Часть 8.3. Оценка воздействия АЭС на окружающую среду. 2010. 137 с.

5. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 2, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research, 2013.

6. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 1, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research, 2013.

7. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. 2012. Chapter 15. Sub-chapter 15-4. UKEPR-0002-154 Issue 06.

8. The Effects of Acute Irradiation on a Forest Biogeocenosis (Experimental Data, Model and Practical Applications to Accidental Cases) / R.M. Alexakhin, R.T. Karaban, B.S. Prister [et al.] // The Science of the Total Environment. 1994. Vol. 157. № 4. PP. 357-369.

9. IAEA safety glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. Vienna: IAEA, 2019. 278 p.

10. Радиэкологический сдвиг в фитоценозах и возможный критерий его прогнозирования / Д.А. Спирин, Г.Н. Романов, Е.А. Федоров, Р.М. Алексахин // Экология. 1988. № 4. С. 25-29.

11. Acute and long-term effects of irradiation on pine (*Pinus silvestris*) stands post-Chernobyl / N.P. Arkhipov, N.D. Kuchma, S. Askbrant [et al.] // The Science of the Total Environment. 1994. Vol. 157. № 4. PP. 383-386

12. Влияние ионизирующего излучения на сосновые леса в ближней зоне Чернобыльской АЭС / Ю.Д. Абатуров, А.В. Абатуров, А.В. Быков [и др.]. М.: Наука, 1996. 240 с.

13. Микаилова Р.А., Спиридонов С.И. Доза облучения древесного яруса хвойного леса, обусловленная аварийным выбросом АЭС // Атомная энергия. 2017. Т. 123. Вып. 63. С. 165-170.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE POTENTIAL RADIATION IMPACT OF VARIOUS REACTORS ON THE ENVIRONMENT

Mikhailova R.A.^a, Spiridonov S.I.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^a mik_r_a@rirae.ru

The research presents a method for the evaluation and comparison of the impact of accidental releases from nuclear reactors and similar facilities on the environment. The radioecological risk was calculated, taking into account the probability of accidents, the quantity of released radioactive substances, and their impact on the environment. The pine forest

was employed as a reference ecosystem for assessment due to its high sensitivity as an indicator. A ranking of radioecological risk for various reactor facilities (VVER-1000, VVER-1200, PWR-890, BWR-1412, EPR-1600), was performed. The analysis revealed that the next-generation VVER-1200 reactor exhibits the lowest potential environmental impact.

Keywords: radiation accident, reactor facility, natural environment, accident scenarios, radioecological assessment, radiation doses, forest tree canopy

УДК 582.29:581.14:633.174

ВЛИЯНИЕ ЛИХЕНОМАССЫ НА ПЕРВИЧНЫЙ РОСТ *SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH

Милейко А.А.

Государственное научное учреждение «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»,
246007, г. Гомель, ул. Федюнинского, д. 4, Республика Беларусь
e-mail: mileyko98@mail.ru

В работе изложены результаты исследования *in vitro* влияния биомассы лишайников кладонии лесной и эвернии сливовой на всхожесть семян и первичный рост проростков одного из видов сорго семейства мятликовые – сорго зернового. Показана зависимость величины стимулирующего и/или ингибирующего действия от количества внесенной биомассы лишайников на сорговое растение.

Ключевые слова: лишайник, сорговая культура, биомасса, прорастание семян, первичный рост, стимуляция роста

Лишайниками называют уникальные самоподдерживающиеся многолетние сложные экосистемы, состоящие из ассоциации фотобионта и микобионта [1]. Образование вторичных метаболитов лишайников или «лишайниковых веществ», является одной из функций микобионта. Известно около 1 100 соединений лишайников, относящихся к различным химическим классам [2-5]. В настоящее время ведется поиск по обнаружению альтернативы синтетическим регуляторам роста растений, вносимых при возделывании и выращивании культур в сельском хозяйстве. Предполагаемой заменой могут служить уникальные химические соединения лишайников, обуславливающие ростостимулирующие свойства в отношении растений.

Целью настоящей работы было изучение влияния лихеномассы на прорастание семян сорговых культур. Для этого мы выбрали часто встречающиеся на территории Республики Беларусь два вида кустистых лишайников с хорошо описанным составом вторичных метаболитов и перспективную для выращивания культуру сорго.

Кладония лесная – *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. – распространенный вид кустистых лишайников семейства Cladoniaceae порядка Lecanorales класса Lecanogomycetes отдела Ascomycota (рисунок 1). Встречается на почве в сухих борах, на верховых болотах и гниющих пнях [6]. В химическом составе преобладает усниновая кислота [7].



Рисунок 1. *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.

Эверния сливовая – *Evernia prunastri* (L.) Ach. – распространенный вид кустистых лишайников семейства Parmeliaceae порядка Lecanorales класса Lecanogomycetes отдела Ascomycota (рисунок 2). Произрастает на хвойных и лиственных деревьях, реже – на почве, камнях [6, 8]. В составе преобладают атранорин, фталевая, эверновая кислоты и их производные [1,7].

Сорго зерновое – *Sorghum bicolor* (L.) Moench. – представитель семейства Poaceae, порядка Poales, класса Liliopsida, отдела Magnoliophyta (рисунок 3). Встречается как кормовая, продовольственная и техническая культура.



Рисунок 2 – *Evernia prunastri* (L.) Ach.



Рисунок 3 – *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

Семена проращивали на свету в пластиковых контейнерах при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$. На дно контейнера укладывали три слоя фильтровальной бумаги, где на поверхности верхнего слоя равномерно распределяли 0,01, 0,03 и 0,05 г на 1 см^2 измельченной биомассы лишайника, в которую выкладывали семена изучаемого вида растения. Для

контрольных опытов использовали аналогичные подложки из фильтровальной бумаги без внесения биомассы лишайника. Для увлажнения среды проращивания использовали смесь Кнопа. Энергию прорастания и всхожесть семян оценивали на 5-е сутки, всхожесть – на 10-е сутки. Измерения длины корней, длины побегов и массы проростков производили на 3, 5, 7, 10, 15 и 30-е сутки.

Установлено, что при проращивании семян сорго зернового в условиях непосредственного контакта с измельченной биомассой лишайников в количестве $0,01 \text{ г/см}^2$, $0,03 \text{ г/см}^2$ и $0,05 \text{ г/см}^2$ наблюдалось замедление прорастания на 5-е сутки от контрольных значений при содержании биомассы эвернии на $23 \div 75 \%$, тогда как в присутствии кладонии прорастание семян не отставало. К 10-м суткам (время учета всхожести семян) количество проростков увеличилось в среде влияния эвернии (с отставанием от контроля на $9 \div 71 \%$), в среде кладонии оставалось сравнительно неизменным. В отношении роста длины корней всходов было характерно разнонаправленное влияние со стороны биомасс лишайников, где наблюдалось отставание на $\frac{2}{5}$ – $\frac{3}{5}$ от контроля в биомассе эвернии, а в среде биомассы кладонии степень стимулирования достигала $\frac{1}{5}$ – $\frac{2}{5}$. На протяжении всего периода проращивания семян в своем большинстве имел место прирост длины побегов проростков к тридцатым суткам опыта, где составил $4 \div 33 \%$ от контроля, за исключением случая снижения роста побегов в среде биомассы эвернии $0,05 \text{ г/см}^2$ с отставанием от значений контроля на 12% . Масса проростков стимулировалась и составила в среде кладонии – $\frac{1}{5}$, в среде эвернии – $\frac{2}{5}$ от контрольных значений.

Основные показатели прорастания семян сорго зернового изменялись в зависимости от концентрации измельченной биомассы лишайника – рисунок 4, где приняты следующие обозначения: Cl.arb_0,01 – 0,05 – условия проращивания семян в присутствии $0,01$ – $0,05 \text{ г/см}^2$ биомассы кладонии лесной; Ev.pr_0,01 – 0,05 – условия проращивания семян в присутствии $0,01$ – $0,05 \text{ г/см}^2$ биомассы эвернии сливовой.

Таким образом, вышеуказанное свидетельствует о зависимости силы стимулирующего / ингибирующего воздействия измельченной биомассы лишайника от концентрации в отношении прорастания семян и первичного роста проростков сорго зернового.

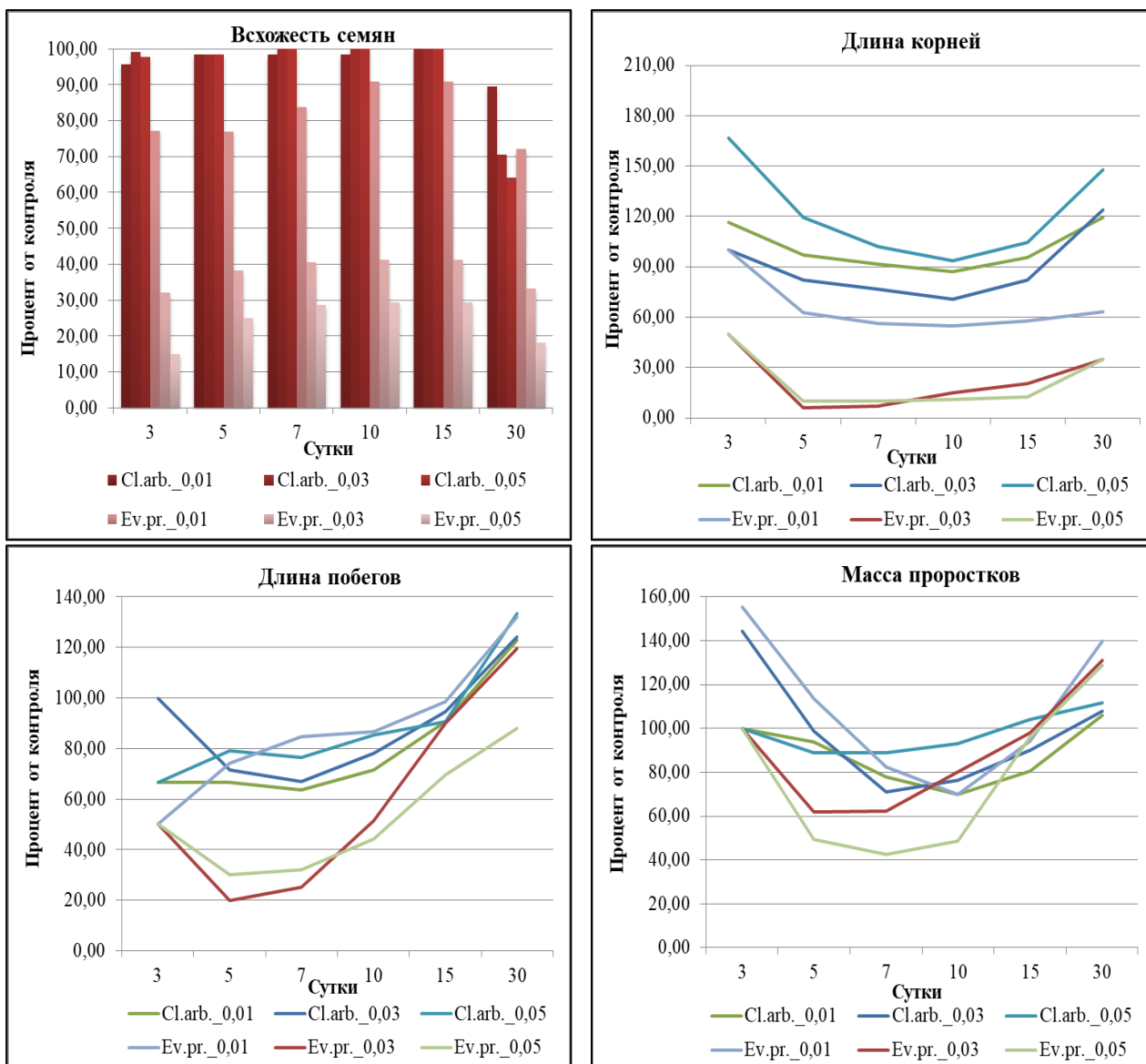


Рисунок 4 – Показатели роста *Sorghum bicolor* (L.) Moench. в присутствии биомасс *Cladonia arbuscula* и *Evernia prunastri* на протяжении тридцати суток наблюдений

Список литературы

1. Lichen Metabolites: An Overview of Some Secondary Metabolites and Their Biological Potential / Goga M. [et al.] // Springer Nature Switzerland. – 2018. – Vol. 57. – P. 1–36.
2. Ranković, Br. Lichen secondary metabolites Bioactive Properties and Pharmaceutical Potential / Br. Ranković, M. Kosanić– Springer Nature Switzerland, 2019. – 260 с.
3. Boustie J., Grube M. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites // Plant Genet. Resour. 2005. V. 3. P. 273 – 287.
4. Molnar K., Farkas E. Current results on biological activities of lichen secondary metabolites: a review // Z. Naturforsch. 2010. V. 65 C. P. 157 – 173.

5. Huneck, S. Identification of lichen substances / S. Huneck, I. Yoshimura. – Springer, Berlin, 1996. – 493 P.
6. Tsurukau, A. Lichens from Gomel region: a provisional checklist / A. Tsurukau, V. Khranchankova // Bot. Lith. – 2011. – Vol. 17, № 4. – P. 157–163.
7. Справочное пособие по хемотаксономии лишайников (методическое пособие) / Е.А. Вайнштейн [и др.]; под ред. Н. С. Голубковой. – Л.: БИН АН СССР, 1990. – 152 с.
8. Цуриков, А.Г. Листоватые и кустистые городские лишайники: атлас – определитель / А.Г. Цуриков, О.М. Храменкова. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 123 с.

INFLUENCE OF LICHENOMASS ON THE PRIMARY GROWTH OF *SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH.

Mileiko A.A.

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Fedyuninskogo st. 4, Gomel, Republic of Belarus, 246007
mileyko98@mail.ru

The results of an *in vitro* study of the lichen *Cladonia arbuscula* and *Evernia prunastri* biomass influence on seed germination and seedlings initial growth of one of the sorghum species from the Poaceae family – *Sorghum bicolor* are presented in the paper. The dependence of the stimulating or inhibitory effect of lichen on sorghum on the amount of biomass introduced is shown.

Keywords: lichen, sorghum culture, biomass, germination energy, primary growth, growth stimulation

The purpose of this work was to study the effect of biomass on the germination of sorghum seeds. To do this, we selected two types of bushy lichens that are often found on the territory of the Republic of Belarus with a well-described composition of secondary metabolites – *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach. and a promising sorghum culture – *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

It has been established that during the germination of grain sorghum seeds in direct contact with crushed lichen biomass in the amount of 0.01 g/cm², 0.03 g/cm² and 0.05 g/cm², germination slowed down on the 5th day from the control values at the content *Evernia prunastri* biomass by 23÷75 %, while in the presence of *Cladonia arbuscula*, seed germination did not lag behind. By the 10th day (the time of seed germination), the number of seedlings increased in the environment under the influence of *Evernia prunastri* (with a lag of 9÷71 % from the control), and remained relatively unchanged in the environment of *Cladonia arbuscula*. With

regard to the growth of the length of the roots of seedlings, a multidirectional influence was characteristic of lichen biomasses, where there was a lag of 2/5 – 3/5 from the control in *Evernia prunastri* biomass, and in the environment of *Cladonia arbuscula* biomass, the degree of stimulation reached 1/5 – 2/5. Throughout the entire period of seed germination, for the most part, there was an increase in the length of shoots of seedlings by the thirtieth day of the experiment, where it amounted to 4÷33 % of the control, except for the case of a decrease in shoot growth in an *Evernia prunastri* biomass medium of 0.05 g/cm² lagging behind control values by 12 %. The mass of seedlings was stimulated and amounted to 1/5 in the *Cladonia arbuscula* medium and 2/5 in the *Evernia prunastri* medium of the control values.

Thus, the above indicates the dependence of the strength of the stimulating / inhibitory effect of crushed lichen biomass on the concentration in relation to seed germination and the primary growth of *Sorghum bicolor*.

УДК 57.043

ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКЦИЙ ФОТОСИНТЕЗА, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ У РАСТЕНИЙ ТАБАКА

Немцова Ю.А.^а, Гринберг М.А., Воденев В.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, Российская Федерация
e-mail: ^а julnemtsova@yandex.ru

В данной работе исследовались пространственно-временные характеристики влияния ионизирующего излучения на индуцированные нагревом электрические сигналы (ЭС) и вызываемые ими фотосинтетические ответы (ФС). Для этого производили регистрацию ЭС и ответов ФС в трех листьях растений табака *Nicotiana tabacum* L. В ответ на локальный нагрев распространялся стрессовый ЭС, что приводило к подавлению активности фотосинтеза.

Наиболее выраженные изменения регистрировались в день нагрева, однако на примере одного из ключевых показателей фотосинтеза (NPQ) было показано, что эффект сохранялся и через 24, 48 и 72 часа после распространения ЭС, индуцированного нагревом. Показано, что облучение усиливает вызываемые ЭС фотосинтетические ответы у растений табака.

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

Формирование адаптации к быстронарастающим стрессовым факторам среды у растений осуществляется посредством дистанционного стрессового сигнала, включая электрический. Распространяясь по растению, электрические сигналы регулируют физиологические процессы, и как следствие, вызывают функциональные изменения на уровне целого организма [1]. На растения в естественной среде, помимо быстронарастающих стрессоров, могут влиять и хронически действующие факторы, например, радиационный фон в зоне произрастания. Как известно, повышенный уровень ионизирующего излучения (ИИ) может модифицировать статус сигнальных систем, что влияет на формирование адаптации и устойчивости растений [2]. В предыдущих наших работах было показано, что ИИ увеличивает амплитуду индуцированных нагревом электрических сигналов и вызываемых ими фотосинтетических ответов в стимулируемой листе. Целью настоящей работы являлось изучение пространственно-временных характеристик и механизмов такого влияния на уровне целого растения.

В работе использовались растения табака *Nicotiana tabacum* L. сорта Samsun. Для облучения использовался закрытый источник ^{90}Sr - ^{90}Y , являющийся чистым β -излучателем. Источник ИИ располагался над растениями, расстояние от радиоактивного источника до листьев – 22 см. Активность источника составляла 0,1 МБк, мощность дозы – примерно 31,3 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 31,55 мГр. Контрольные растения выращивались в аналогичных условиях в отсутствие источника ИИ.

Измерение параметров электрических сигналов осуществляли при помощи макроэлектродной техники. Разность поверхностных потенциалов регистрировалась многоканальной системой для измерения биопотенциалов и ионных токов Мультипест ИПЛ-113 (Semico, Россия). Дистанционный ЭС индуцировался нагревом участка листа при помощи нагревательного столика, нагревался самый молодой хорошо развитый лист. Время нагрева составляло около 4,5 минут, температура нагревательного столика достигала около 70 °С. Регистрация осуществлялась на трех листьях: нагреваемом, втором и третьем по счету от нагреваемого. Электрод сравнения располагался во влажной почве. Адаптация фиксированного к измерениям растения длилась 1 час 15 минут.

Параметры световой стадии фотосинтеза регистрировались при помощи ПАМ-флуориметра PlantExplorer^{Pro+} (PhenoVation, Нидерланды). Расчет фотосинтетических параметров (Fv/Fm – максимальная эффективность фотосинтеза, Y(II) – квантовый выход фотосистемы II, NPQ – нефотохимическое тушение флуоресценции) производился встроенным программным обеспечением прибора. В ходе эксперимента регистрировали величину фотосинтетических параметров после распространения ЭС. Уровень фотосинтетических показателей регистрировался на уровне целого растения. Измерения пространственно-временных характеристик ответа фотосинтеза на распространение ЭС осуществлялась перед нагревом и через 30 минут, 24, 48 и 72 часа после генерации ЭС. Измерениям предшествовала темновая адаптация длительностью 30 минут и световая адаптация длительностью 15 минут.

Как у контрольных, так и у облученных растений локальный нагрев вызывает распространение стрессового электрического сигнала. Реакция распространялась по всему растению и охватывала все три изучаемых листа. В ответ на распространение ЭС во всех трех изучаемых листьях подавлялась активность фотосинтеза, проявляющаяся в угнетении Fv/Fm и Y(II) и увеличении NPQ. Наиболее выраженные изменения регистрировались в день нагрева, однако на примере одного из ключевых показателей фотосинтеза – NPQ – было показано, что эффект сохранялся через 24, 48 и 72 часа после распространения ЭС, индуцированного нагревом. В ходе эксперимента было показано, что облучение усиливает вызываемые ЭС фотосинтетические ответы у растений табака.

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

Список литературы

1. *Воденев В.А., Катичева Л.А., Сухов В.С.* Электрические сигналы у высших растений: механизмы генерации и распространения // *Биофизика*. 2015. Т. 61. №3. С. 598-606.
2. *Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants / S.V. Gudkov, M.A. Grinberg, V.S. Sukhov [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 202. PP. 8-24.

INFLUENCE OF CHRONIC RADIATION ON SPATIOTEMPORAL PARAMETERS OF PHOTOSYNTHESIS RESPONSES INDUCED BY ELECTRIC SIGNALS IN TOBACCO PLANTS

Nemtsova Y.A.^a, Grinberg M.A., Vodeneev V.A.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin st. 23, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603022
e-mail: ^ajulnemtsova@yandex.ru

In this work, spatiotemporal characteristics of the effect of ionizing radiation on heat-induced electrical signals (ES) and the photosynthetic responses (PS) caused by them were studied. For this, ES and PS responses were recorded in three leaves of *Nicotiana tabacum* L. tobacco plants. Stress ES propagated in response to local heating, which led to the suppression of photosynthesis activity. The most pronounced changes were recorded on the day of heating, however, using one of the key indicators of photosynthesis (NPQ) as an example, it was shown that the effect persisted 24, 48, and 72 hours after the spread of ES induced by heating. It has been shown that irradiation enhances the photosynthetic responses induced by ES in tobacco plants.

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

An increased level of ionizing radiation (IR) can modify the status of signaling systems, which affects the formation of plant adaptation and resistance [2]. In our previous work, it was shown that IR increases the amplitude of heat-induced electrical signals and the photosynthetic responses they cause in the stimulated leaf. The purpose of this work was to study the spatiotemporal characteristics and mechanisms of such influence at the level of the whole plant.

We used tobacco plants *Nicotiana tabacum* L. cv. Samsun. For irradiation, a sealed ⁹⁰Sr-⁹⁰Y source was used, which is a pure β -emitter. The IR source was located above the plants, the distance from the radioactive source to the leaves was 22 cm. The source activity was 0.1 MBq, the dose rate was approximately 31.3 μ Gy/hour. Irradiation began from the day of planting and continued throughout the entire period of plant growth, the total exposure time was 6 weeks. The total accumulated dose was about 31.55 mGy. Control plants were grown under similar conditions in the absence of an IR source.

Measurement of the parameters of electrical signals was carried out using macroelectrode technology. The difference in surface potentials was recorded by a multichannel system for measuring biopotentials and ionic currents Multitest IPL-113 (Semico, Russia). Remote ES was induced by heating a section of the leaf using a heating table; the youngest well-developed leaf was heated. The heating time was about 4.5 minutes, the temperature of the heating table reached about 70 °C. Registration was carried out on three leaves: heated, second and third in a row from the heated one. The reference electrode was placed in

moist soil. The adaptation of the plant fixed to the measurements lasted 1 hour and 15 minutes.

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 device. During the experiment, the value of photosynthetic parameters was recorded after the propagation of ES. The level of photosynthetic parameters was recorded at the level of the whole plant. Measurements of spatiotemporal characteristics of the photosynthesis response to ES propagation were carried out before heating and 30 minutes, 24, 48, and 72 hours after ES generation. The measurements were preceded by a dark adaptation of 30 minutes and a light adaptation of 15 minutes.

In both control and irradiated plants, local heating causes the propagation of a stress electrical signal. The reaction spread throughout the plant and covered all three studied leaves. In response to the spread of ES, photosynthesis activity was suppressed in all three studied leaves, which manifested itself in the inhibition of Fv/Fm and Y(II) and an increase in NPQ. The most pronounced changes were recorded on the day of heating; however, using the example of one of the key indicators of photosynthesis, NPQ, it was shown that the effect persisted through and 24, 48, and 72 hours after the propagation of ES induced by heating. During the experiment, it was shown that irradiation enhances the photosynthetic responses induced by ES in tobacco plants.

ДОЗЫ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ РАСПЫЛЕННЫМИ НЕЙТРОН-АКТИВИРОВАННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ МИКРОЧАСТИЦАМИ

Петухов А.Д.^а, Богачева В.В., Степаненко В.Ф.

Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 4, Российская Федерация

e-mail: ^а alexman6568@gmail.com

Исследования проводились в рамках двусторонних международных соглашений между ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России и: Хиросимским Университетом (Япония); Евразийским национальным Университетом им. Л.Н. Гумилева; Государственным медицинским университетом г. Семей (Республика Казахстан). Цели международного многоцентрового научного сотрудничества включали в себя исследования особенностей радиобиологических эффектов при воздействии на экспериментальных животных нейтрон-активированными микрочастицами $^{56}\text{MnO}_2$ [1, 2]. Задачей специалистов МРНЦ им. А.Ф. Цыба являлась оценка доз внутреннего облучения экспериментальных животных в результате воздействия распыленным нейтрон-активированным порошком $^{56}\text{MnO}_2$ [1-3]. Интерес к этой проблематике обусловлен наблюдениями японских специалистов последствий радиационного воздействия на лиц, оказавшихся в Хиросиме и Нагасаки в ближние сроки после атомной бомбардировки этих городов силами ВВС США [4]. Американско-японские системы дозиметрических оценок бомбардировок Хиросимы и Нагасаки (DS86 и DS02) предназначены, в основном, для определения поглощенных доз от гамма-нейтронного облучения, возникшего в момент взрыва. Как отмечается в специальном выпуске Journal of Radiation Research (2022) [5], дозиметрические характеристики и биологические эффекты внутреннего облучения бета-излучающими нейтрон-активированными радионуклидами после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки изучены недостаточно. Особенности внутреннего облучения радиоактивными микрочастицами в настоящее время являются предметом научных дискуссий на международном уровне [6, 7]. Радионуклид ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2,58$ час) является одним из нейтрон-активированных бета- и гамма-излучателей в составе частиц почвенной пыли, вносящих вклад в формирование доз облучения в первые часы после атомной бомбардировки [6, 8]. В настоящем докладе представлена информация об особенностях распределения доз внутреннего облучения органов и тканей экспериментальных животных (мыши и крысы) после воздействия распыленными нейтрон-активированными микрочастицами $^{56}\text{MnO}_2$. Приведены характеристики пространственного микрораспределения дозы облучения в биологической ткани, окружающей микрочастицы $^{56}\text{MnO}_2$. Полученные данные необходимы для понимания и интерпретации наблюдаемых радиобиологических эффектов внутреннего облучения экспериментальных животных микрочастицами $^{56}\text{MnO}_2$ [5].

Ключевые слова: дозы внутреннего облучения, экспериментальные животные, радиоактивные микрочастицы, нейтронная активация

Радиоактивные микрочастицы $^{56}\text{MnO}_2$ были получены на исследовательском реакторе IVG.1M Национального ядерного центра Министерства энергетики Республики Казахстан [9] путем нейтронной активации мелкодисперсного порошка двуокиси марганца (Rare Metallic Co., Ltd) со средним размером микрочастиц MnO_2 около 3 мкм. Спектр излучений ^{56}Mn ($T_{1/2} = 2,58$ ч) состоит из бета-частиц и гамма-квантов. Средняя и максимальная энергии бета-частиц ^{56}Mn (интенсивность 100 %) равны 829,21 кэВ и 2848 кэВ, соответственно; основные линии гамма-излучения: 846.8 кэВ (98,9 %), 1811 кэВ (27,2 %), 2113 кэВ (14,3 %) и 2598 кэВ (17,3 %). После нейтронной активации порции радиоактивного порошка массой 100 мг и с активностями 8×10^7 Бк, $2,74 \times 10^8$ Бк, $5,5 \times 10^8$ Бк и 8×10^8 Бк были распылены с помощью пневматической системы над экспериментальными животными (мыши C57BL, CD-1, BALB и крысы Wistar в возрасте

10-11 недель), содержащимися в специальных изолированных боксах [9]. После экспозиции длительностью 1 час животные были подвергнуты эвтаназии. Измерения активности ^{56}Mn в выделенных образцах органов и тканей проведены с использованием гамма-спектрометрической системы (AMPTC Inc., Gamma-Rad5, сцинтилляционный детектор NaI(Tl) 76 mm×76 mm), откалиброванной по источнику ^{56}Mn с активностью $3,6 \times 10^8$ Вк $\pm 0,10 \times 10^8$ Бк [10]. Оценки доз внутреннего облучения экспериментальных животных выполнены с использованием информации о величинах измеренных удельных активностей ^{56}Mn в органах и тканях и в соответствии с общей схемой Medical Internal Radiation Dose (MIRD) Committee [11]. Расчеты «поглощенных долей» энергии для спектров корпускулярного и фотонного излучений ^{56}Mn проведены методом Монте-Карло с

применением математических фантомов лабораторных мышей и крыс [12].

Помимо оценок средних по объемам органов и тканей доз внутреннего облучения, были проведены расчеты микрораспределения поглощенной дозы в биологической ткани вокруг инкорпорированных микрочастиц $^{56}\text{MnO}_2$ с учетом вклада в дозу низкоэнергетичной части спектра бета-частиц, излучаемых ^{56}Mn . Расчеты проведены методом Монте-Карло [12, 13] для сферических концентрических слоев биологической ткани, окружающих микрочастицы $^{56}\text{MnO}_2$. Пространственное распределение мощности поглощенной дозы вокруг микрочастиц ^{56}Mn было рассчитано для радиальных расстояний в биологической ткани от поверхности частицы в диапазоне от ~10-2 мкм до 1000 мкм, что перекрывает характерные размеры различных микроструктур легочной ткани, начиная от толщины плоскоклеточного эпителия альвеол легких (эти клетки имеют разную толщину – 0,05-0,3 мкм) до диаметра альвеолярных протоков (~100 мкм) и размеров альвеолярных мешочков (~500 мкм). Это важно для применения результатов расчетов к сценарию возможного респираторного попадания микрочастиц $^{56}\text{MnO}_2$ в легкие.

Результаты и обсуждение

В результате оценок доз внутреннего облучения органов и тканей экспериментальных животных установлено следующее.

- Имеется три группы органов экспериментальных мышей и крыс, дозы внутреннего облучения которых различаются приблизительно на порядок величины: группа с наибольшими поглощенными дозами (толстый кишечник, тонкий кишечник, желудок, кожа, легкие – диапазон поглощенных доз от десятых долей Гр до единиц Гр), группа с пониженными дозами облучения (глаза, пищевод, трахея – от сотых долей Гр до десятых долей Гр) и группа с наименьшими дозами облучения (сердце, печень, почки – менее сотых долей Гр). Большие поглощенные дозы в ЖКТ и повышенное облучение пищевода связаны с особенностями поведения животных: экспериментальные животные заглатывают радиоактивный порошок в процессе чистки волосяного покрова [10]. Повышенные дозы облучения трахеи и легких экспериментальных животных достаточно очевидны. Это объясняется вдыханием распыленного порошка $^{56}\text{MnO}_2$. Повышенное облучение кожи связано с оседанием радиоактивных микрочастиц в шерсти животных.

- Поглощенные дозы внутреннего облучения органов пропорциональны величинам активности распыленного порошка $^{56}\text{MnO}_2$, однако для одной и той же активности диспергированного $^{56}\text{MnO}_2$ дозы облучения органов мышей различных линий, но одного возраста, были практически одинаковыми.

- При воздействии равными активностями распыленного $^{56}\text{MnO}_2$ дозы внутреннего облучения лабораторных мышей от 4 до 7 раз превосходят дозы

облучения экспериментальных крыс. Это объясняется тем, что для спектров бета- и гамма-излучений ^{56}Mn величины удельных «поглощенных долей» энергии в органах мышей существенно превышают таковые для органов крыс [10].

- Оценки пространственного микрораспределения дозы облучения в биологической ткани, окружающей микрочастицы $^{56}\text{MnO}_2$, показали, что величина мощности поглощенной дозы имеет очень существенный пространственный градиент на расстояниях, характерных, в частности, для размеров плоскоклеточного эпителия легочных альвеол. При попадании микрочастиц $^{56}\text{MnO}_2$ в альвеолу мощность дозы составляет 60 мГр/распад в прилегающих к частице клетках эпителия толщиной 0,05 мкм, а для клеток эпителия с толщиной 0,3 мкм мощность дозы от прилегающей микрочастицы равна 0,15 мГр/распад. Указанные величины доз облучения обусловлены низкоэнергетичной частью спектра бета-частиц ^{56}Mn . Это позволяет заключить, что при ингаляционном поступлении радиоактивных микрочастиц в альвеолы легких происходит избирательное облучение альвеолярных микроструктур.

Полученные данные необходимы для понимания и интерпретации наблюдаемых радиобиологических эффектов внутреннего облучения экспериментальных животных микрочастицами $^{56}\text{MnO}_2$ [5].

Список литературы

1. Облучение экспериментальных животных активированной нейтронами радиоактивной пылью: разработка и реализация метода – первые результаты международного многоцентрового исследования / В.Ф. Степаненко, Т.К. Рахыпбеков, А.Д. Каприн [и др.] // Радиация и Риск. 2016. Т/ 25. № 4. С. 111-125.
2. Internal doses in experimental mice and rats following exposure to neutron-activated $^{56}\text{MnO}_2$ powder: results of an international, multicenter study / V. Stepanenko, A. Kaprin, S. Ivanov [et al.] // Radiat Environ Biophys. 2020. Vol. 59. PP. 683-692.
3. Internal exposure to neutron-activated ^{56}Mn dioxide powder in Wistar rats – part 1: dosimetry / V. Stepanenko, T. Rakhypbekov, K. Otani [et al.] // Radiat Environ Biophys. 2017. Vol. 56. PP. 47-54.
4. Otani K, Ohtaki M, Yasuda H. Solid cancer mortality risk among a cohort of Hiroshima early entrants after the atomic bombing, 1970-2010: implications regarding health effects of residual radiation // J Radiat Res. 2022. Vol. 63. Supplement_1. PP. i45-i53.
5. Dosimetry and biological effects of ^{56}Mn dioxide radioactive microparticles / M. Hoshi, S. Endo, V. Stepanenko, K. Zhumadilov // Journal of Radiation Research. 2022. Vol. 63. Supplement 1.
6. Workshop report on atomic bomb dosimetry – a review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki / G.D. Kerr, M. Hoshi, V.F. Stepanenko [et al.] // Health Phys. 2015. Vol. 10. № 6. PP. 582-600.

7. Salbu B., Ulanowski A., Fesenko S. IAEA: coordinated research on radioactive particles // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 216. PP. 56-57.

8. Weitz R. Reconstruction of beta-particle and gamma-ray doses from neutron activated soil at Hiroshima and Nagasaki // Health Phys. 2014. Vol. 107. № 1. P. S43. 9. Radiobiological experiments at the complex of research reactors "Baikal-1" / T.K. Rakhimbekov, M. Hoshi, V.F. Stepanenko [et al.] // Human.Energy.Atom. NNC RK. 2015. № 2. PP. 43-45.

10. Overview and analysis of internal radiation dose estimates in experimental animals in a framework of international studies of the sprayed neutron-induced ^{56}Mn radioactive microparticles effects / V. Stepanenko, A. Kaprin, S. Ivanov [et al.] // Journal of Radiation Research. 2022. Vol. 63. № S1. PP. i8-i15.

11. MIRD Pamphlet No. 21: a generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry-standardization of

nomenclature / W.E. Bolch, K.F. Eckerman, G. Sgouros [et al.] // J Nucl Med. 2009. Vol. 50. № 3. PP. 477-484.

12. Программа для расчетов нормированных на накопленную активность поглощенных доз внутреннего облучения в органах, тканях и очагах организма человека и экспериментальных животных при доклинических или клинических испытаниях радиофармпрепаратов (РФП-Доза): Программа для ЭВМ: свидетельство № 2023662903. / Степаненко В.Ф., Богачева В.В., Дорохов А.В., Шегай П.В., Иванов С.А., Каприн А.Д.; Правообладатель: ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России (RU); заявл. 05.06.2023; опубл. 16.06.2023, Бюл. № 6. 2023. 45,3 МБ.

13. Microdistribution of internal radiation dose in biological tissues exposed to ^{56}Mn dioxide microparticles / V. Stepanenko, A. Kaprin, S. Ivanov [et al.] // Journal of Radiation Research. 2022. Vol. 63. № S1. PP. i21-i25.

DOSES OF INTERNAL EXPOSURE OF EXPERIMENTAL ANIMALS BY SPRAYED NEUTRON-ACTIVATED RADIOACTIVE MICROPARTICLES

Petukhov A.D.^a, Bogacheva V.V., Stepanenko V.F.

A. Cyb Scientific Research Centre of Radiology of the Hertsen Federal Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Koroleva st. 4, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, 2490036

e-mail: ^a alexman6568@gmail.com

The study was carried out within the framework of bilateral international agreements between the National Medical Research Radiological Centre of the Russian Ministry of Health and: Hiroshima University (Japan); L.N. Gumilyov Eurasian National University; Semey State Medical University (Republic of Kazakhstan). The goals of international multicenter scientific cooperation included the studies of the features of radiobiological effects among experimental animals exposed to neutron-activated $^{56}\text{MnO}_2$ microparticles. The task of the specialists of A.Tsyb MRRC was an assessment of the doses of internal irradiation of experimental animals as a result of exposure to sprayed neutron-activated powder $^{56}\text{MnO}_2$. The interest to this issue is due to the observations of Japanese specialists of the consequences of radiation exposure among people ("early entrants") who arrived to Hiroshima and Nagasaki soon after the atomic bombing of these cities. The radionuclide ^{56}Mn ($T_{1/2}=2.58$ h) is one of the neutron-activated beta- and gamma-emitters in the composition of soil dust that contribute to the formation of radiation doses during the first hours after the atomic bombing. The Hiroshima and Nagasaki Dosimetry Systems (DS86 and DS02) are designed primarily to determine absorbed doses from gamma-neutron exposure that occurred at the time of the explosion. As noted in a special issue of the Journal of Radiation Research (2022), the dosimetric features and biological effects of internal exposure to beta-emitting neutron-activated radionuclides are not well investigated, which is the subject of scientific discussions at the international level. The report provides information on the distribution of doses of internal irradiation of organs and tissues of experimental mice and rats after exposure to sprayed neutron-activated $^{56}\text{MnO}_2$ microparticles. The characteristics of the spatial microdistribution of the radiation dose in the biological tissue surrounding $^{56}\text{MnO}_2$ microparticles are presented as well. The data obtained are necessary for understanding and interpreting the observed radiobiological effects of internal irradiation of experimental animals with $^{56}\text{MnO}_2$ microparticles.

Keywords: *doses of internal exposure, experimental animals, radioactive microparticles, neutron activation*

АНАЛИЗ ВКЛАДА КАЛИЕВЫХ КАНАЛОВ В ЭФФЕКТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ РАСТЕНИЙ

Пирогова П.А.^а, Здобнова Т.А., Гринберг М.А., Воденеев В.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, Российская Федерация
e-mail: ^аpoly.h@mail.ru

Влияние ионизирующего излучения (ИИ) на растения реализуются во многом за счет изменения статуса сигнальных систем и модификации стрессовых сигналов. Один из типов стрессовых сигналов растений – электрические сигналы (ЭС). При действии ИИ на ЭС, индуцированные другими раздражителями, происходит увеличение амплитуды и скорости распространения ЭС. Однако мишени такого влияния не выявлены. Возможный путь реализации возникающих при действии ИИ изменений – регуляция экспрессии генов. При действии хронического облучения нами ранее было выявлено уменьшение экспрессии гена калиевых каналов SKOR на проростках пшеницы. В настоящей работе объектом исследования также выступали проростки пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) 15-дневного возраста. Вклад калиевых каналов в эффект ИИ на ЭС оценивали по параметрам ЭС с использованием ингибиторного анализа. Блокатор калиевых каналов – тетраэтиламмония – вызывал увеличение амплитуды реакции, что коррелирует с увеличением амплитуды у облученных растений. Следовательно, уменьшение экспрессии K⁺-канала SKOR может быть одним из механизмов влияния ИИ на параметры ЭС.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, малые дозы, электрические сигналы, *Triticum aestivum* L., ионные каналы, H⁺-АТФаза, SKOR

Растения могут быть подвержены влиянию повышенного уровня ионизирующего излучения (ИИ), произрастая на загрязненных радионуклидами территориях или в условиях космического полета. Реализация влияния ИИ возможна путем изменения стрессовых сигналов, способствующих формированию адаптаций к неблагоприятным факторам окружающей среды. Особый интерес среди прочих стрессовых сигналов вызывают электрические сигналы (ЭС), представляющие собой распространяющиеся изменения мембранного потенциала. В генерации и распространении ЭС ключевую роль играют следующие системы: ионные каналы различных типов, протонная АТФаза и системы генерации активных форм кислорода (АФК). Распространение ЭС приводит к модификации активности ряда физиологических процессов (фотосинтез, транспирация, дыхание).

На сегодняшний день при хроническом облучении показаны изменения параметров, вызванных локальным стрессовым воздействием ЭС: увеличение амплитуды и скорости распространения. Наблюдаемые изменения могут быть объяснены регуляцией на физиологическом и генетическом уровне, в большей степени за счет АФК. Физиологическая регуляция заключается в изменении активности компонентов генерации ЭС, одной из причин которой может быть повышенный вследствие облучения уровень АФК, а генетическая – основывается на изменении уровня экспрессии генов, что обусловлено прямым (деструктивное действие ИИ) и косвенным (изменение активности транскрипционных факторов) влиянием ИИ. В предшествующих экспериментах был проведен

анализ вклада генетической регуляции: показано уменьшение экспрессии гена калиевого канала SKOR. Цель настоящей работы – анализ роли калиевых каналов в эффекте ИИ на ЭС.

Исследования проводили на 15-дневных проростках пшеницы мягкой (*Triticum aestivum* L.) сорта «Дарья». Условия хронического облучения моделировали путем облучения экспериментальной группы с помощью β-излучателя ⁹⁰Sr-⁹⁰Y (активность – 0,1 МБк, мощностью дозы – 31,3 мГр/час, продолжительность облучения – 15 дней, максимальная накопленная доза – 11,3 мГр).

Регистрацию ЭС проводили в трех экспериментальных группах: облученные растения, контрольные растения и контрольные растения, подвергнутые действию ингибитора K⁺-каналов. ЭС регистрировали экстраклеточно с помощью AgCl макроэлектродов на предварительно отрезанных вторых листьях проростков пшеницы. Измерительный электрод располагался на расстоянии 2,5 см от зоны раздражения, электрод сравнения контактировал со срезанным кончиком листа в водном растворе. Раздражение наносили путем нагрева до 65 °С кончика листа в заполненной водой ячейке в течение 7 минут. Для ингибиторного анализа использовали 1 мМ тетраэтиламмония хлорид (ТЭА), подавляющий работу калиевых каналов. ТЭА закачивали в лист с помощью вакуумной установки при давлении 0,2 атм. Действие ингибитора оценивали по амплитуде ЭС. Эксперимент повторяли в 15 биологических повторностях.

У облученных растений показано увеличение амплитуды ЭС по сравнению с контролем. Блокировка

K⁺-каналов ТЭА у контрольных растений приводит к росту амплитуды ЭС, что коррелирует с подобным увеличением у облученных растений. Следовательно, ранее показанное уменьшение экспрессии

гена K⁺-канала SKOR может быть одним из механизмов изменения параметров ЭС при действии ИИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № 075-15-2021-1068.

ANALYSIS OF THE CONTRIBUTION OF POTASSIUM CHANNELS TO THE EFFECT OF IONIZING RADIATION ON ELECTRICAL SIGNALS OF PLANTS

Pirogova P.A.^a, Zdobnova T.A., Grinberg M.A., Vodeneev V.A.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin st. 23, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603022

e-mail: ^apoly.h@mail.ru

The effect of ionizing radiation (IR) on plants is realized, in many respects, by changing the status of signaling systems and modifying stress signals. One of the types of stress signals of plants is electrical signals (ES). When IR acts on ES induced by other stimuli, there is an increase in the amplitude and speed of propagation of ES. However, the targets of such influence have not been identified. A possible way to implement changes arising from the action of IR is the regulation of gene expression. Under the action of chronic irradiation, we previously detected a decrease in the expression of the SKOR potassium channel gene on wheat seedlings. In this work, the object of the study was also the seedlings of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) of 15-day age. The contribution of potassium channels to the effect of IR on ES was assessed by ES parameters using inhibitory analysis. The potassium channel blocker, tetraethylammonium, caused an increase in the amplitude of the reaction, which correlates with an increase in the amplitude in irradiated plants. Consequently, a decrease in the expression of the SKOR K⁺ channel may be one of the mechanisms of IR influence on ES parameters.

Keywords: *ionizing radiation, small doses, electrical signals, Triticum aestivum L., ion channels, H⁺-ATPase, SKOR*

The effect of ionizing radiation (IR) on plants is realized, in many respects, 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). Under the action of IR, there is an increase in the amplitude of ES induced by other stimuli. A possible way to implement changes arising from the action of IR is the regulation of gene expression. To date, changes in parameters caused by local stress exposure to ES have been shown with chronic irradiation. The observed changes can be explained by regulation at the physiological and genetic level, mostly due to ROS. In previous experiments, the contribution of genetic regulation was analyzed: a decrease in the expression of the SKOR potassium channel gene was shown. The purpose of this work is to analyze the participation of potassium channels in the effect of IR on ES.

The studies were carried out on 15-day seedlings of soft wheat (*Triticum aestivum* L.) of the "Daria" variety. The conditions of chronic irradiation were modeled by irradiating the experimental group with a ⁹⁰Sr-⁹⁰Y β-emitter (activity – 0.1 MBq, dose rate – 31.3 mcGy/h, duration of irradiation – 15 days, maximum accumulated dose – 11.3 mGy). ES registration was carried out

in three experimental groups: irradiated plants, control plants and control plants exposed to a K⁺-channel inhibitor. ES was recorded extracellularly using AgCl macroelectrodes on pre-cut second leaves of wheat seedlings. The ES was called by heating the tip of the leaf to 65 °C in a water-filled cell for 7 minutes. For inhibitory analysis, 1 mM tetraethylammonium chloride (TEA) was used, suppressing the work of potassium channels. The effect of the inhibitor was evaluated by the amplitude of the ES. The experiment was repeated in 15 biological repetitions.

The irradiated plants showed an increase in the amplitude of the ES compared to the control. Blocking of K⁺-channels of TEA in control plants leads to an increase in the amplitude of ES, which correlates with a similar increase in irradiated plants. Consequently, the previously shown decrease in the expression of the SKOR potassium channel gene may be one of the mechanisms for changing ES parameters under the action of IR.

The work was carried out with the financial support of project No. 075-15-2021-1068.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЗДАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ К АНТРАКНОЗУ ФОРМ ЛЬНА

Пролётова Н.В.^а, Зотова В.С.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр лубяных культур»,
170041, г. Тверь, Комсомольский пр-кт, д. 17/5, Российская Федерация

e-mail: ^а nataljaprljotva@rambler.ru

Разработана селективная система *in vitro* «гриб *Colletotrichum lini Manns et Bolley* – лен», позволяющая отбирать клетки льна-долгунца *in vitro*, устойчивые к культуральному фильтрату, из которых с большей эффективностью можно получать растения-регенеранты, устойчивые к патогену. Определена зависимость отзвучивости клеток льна на присутствие в среде продуктов жизнедеятельности гриба – возбудителя антракноза от величины экспланта. Выявлено влияние генотипа льна на потенции клеток к морфогенезу в селективных условиях. При разработке схемы селекции льна *in vitro* на устойчивость к антракнозу получены растения-регенеранты, проверка которых на искусственном инфекционно-провокационном фоне показала, что генотипы различались по устойчивости.

Ключевые слова: лен, антракноз, устойчивость, селективные условия, культуральный фильтрат, незрелый зародыш, каллус

Лен – ценнейшая техническая культура с расширенным ареалом произрастания. Однако почвенная патогенная микрофлора создает барьеры для выращивания льна с высококачественными параметрами льнопродукции. Селекция на устойчивость могла бы снизить уровень заражения семян и сделать технологии возделывания льна более экологически чистыми. Задача повышения устойчивости может быть успешно решена лишь на основе интегрированного подхода к системе хозяин-паразит-среда [1-3].

Созданные в наших исследованиях селективные условия *in vitro* были эффективны при селекции льна-долгунца на устойчивость к антракнозу и позволили получить формы более устойчивые к болезни, чем исходные.

При использовании различных эксплантов на первом этапе селекции *in vitro* установлено, что клетки пыльников в селективных условиях более уязвимы, чем клетки незрелых зародышей. Морфогенные очаги на основе каллуса пыльников формировались на селективной среде Sh-2 с частотой 1-2 %, тогда как при использовании незрелых зародышей – с частотой 35-40 %. Стимулирование пролиферации каллуса, сформированного на основе незрелых зародышей, отмечено при использовании концентраций культурального фильтрата 28, 32 и 36 мл/л. Установлено, что клетки генотипов Л 957-8-7, Алексим,

Пенджаб, Зарянка обладали высокой морфогенетической активностью. В результате исследований получены растения-регенеранты, которые на инфекционно-провокационном фоне показали различную устойчивость к антракнозу. Наряду с устойчивыми и среднеустойчивыми линиями (на уровне 50-75 %) отмечены формы, восприимчивые к болезни.

Список литературы

1. Source material for flax selection for horizontal resistance to septoria (pasmo) / L.P. Kudryavtseva [et al.] // Innovative developments for flax production: materials of the correspondence International scientific and practical conference, VNIIML (May 19-20, Tver). Tver, 2016. С. 15-23.
2. Screening of flax gene pool samples for resistance to adverse factors / T.A. Rozhmina [et al.] // Achievements of science and technology of the agro-industrial complex. 2018. Vol. 32. № 10. PP. 11-14.
3. Proletova N.V. Increasing the resistance of fiber flax to anthracnose (*Colletotrichum lini Manns et Bolley*) using *in vitro* methods // Oilseeds. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Research Institute of Oilseeds. 2018. № 3(175). PP. 128-131.

EFFECTIVENESS OF CREATION OF ANTHRACNOSE-RESISTANT FORMS OF FLAX

Proletova N.V.^a, Zotova V.S.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops»,
Komsomolsky prospect 17/56, Tver, Russian Federation, 170041
e-mail: ^a nataljaprljotva@rambler.ru

An in vitro selective system “fungus *Colletotrichum lini* Manns et Bolley – flax” has been developed, which makes it possible to select fiber flax cells in vitro that are resistant to the cultural filtrate, from which regenerated plants resistant to the pathogen can be obtained with greater efficiency. The dependence of the responsiveness of flax cells to the presence in the environment of waste products of the fungus, the causative agent of anthracnose, on the size of the explant was determined. The influence of flax genotype on the potential of cells for morphogenesis under selective conditions was revealed. When developing a scheme for in vitro selection of flax for resistance to anthracnose, regenerant plants were obtained, testing of which against an artificial infectious-provocative background showed that the genotypes differed in resistance.

Keywords: *flax, anthracnose, resistance, selective conditions, cultural filtrate, immature embryo, callus*

Flax is a highly valuable industrial crop with an extended growing area. However, soil pathogenic microflora creates barriers to the cultivation of flax with high-quality flax product parameters. Breeding for resistance could reduce the level of seed contamination and make flax cultivation technologies more environmentally friendly. The problem of increasing resistance can be successfully solved only on the basis of an integrated approach to the host-parasite-environment system [1-3].

The in vitro selective conditions created in our studies were effective in selecting fiber flax for resistance to anthracnose and made it possible to obtain forms that are more resistant to the disease than the original ones.

When using various explants at the first stage of in vitro selection, it was found that anther cells under

selective conditions are more vulnerable than cells of immature embryos. Morphogenic foci based on anther callus were formed on the Sh-2 selective medium with a frequency of 1-2 %, whereas when immature embryos were used, with a frequency of 35-40 %. Stimulation of proliferation of callus formed on the basis of immature embryos was noted when using concentrations of culture filtrate 28, 32 and 36 ml/L. It was established that cells of genotypes L 957-8-7, Alexim, Punjab, Zaryanka had high morphogenetic activity. As a result of the research, regenerant plants were obtained, which, against an infectious and provocative background, showed varying resistance to anthracnose. Along with resistant and moderately resistant lines (at the level of 50-75 %), forms susceptible to the disease were noted.

УДК 614.876 (470.333)

РАДИАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ АГРОМЕЛИОРАНТОВ И ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА СЕЯННЫХ ТРАВАХ В ЮГО-ЗАПАДНЫХ РАЙОНАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Прудников П.В., Пашковский А.А., Лелянова Е.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский»,
241524, Брянская обл., Брянский р-он, п. Мичуринский, ул. Спортивная, д. 1, Российская Федерация
e-mail: agroh32@mail.ru

В результате аварии на Чернобыльской АЭС на территории Брянской области произошло выпадение радиоактивных веществ, приведшее к значительному загрязнению земель сельскохозяйственных угодий. Выпадение радионуклидов на местности носило неравномерный, «пятнистый» характер, обусловленный разнообразием

метеоусловий, условий рельефа и других факторов. Загрязнению подверглась практически вся территория Брянской области, но наиболее сильно оказались загрязнены семь юго-западных районов [2].

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, авария на Чернобыльской АЭС, ^{137}Cs , Брянская область, плодородие, мониторинг радиационной обстановки, сельскохозяйственная продукция

Специалисты ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» продолжают проводить мониторинг по уточнению радиационной обстановки, динамике ^{137}Cs в почвах и сельскохозяйственной продукции с момента аварии и по настоящее время. На сегодняшний день мониторинг радиационной обстановки на почвах сельскохозяйственных угодий, проводимый специалистами ФГБУ «Брянскагрохимрадиология», показывает, что 348,1 тыс. га относится к разряду загрязненных (свыше 37 кБк/м²), в том числе 229,4 тыс. га составляет пашня и 118,7 тыс. га естественные кормовые угодья. Практически все угодья свыше 185 кБк/м² находятся в юго-западных районах области, которые с 1986 года значатся как наиболее пострадавшие в результате аварии на ЧАЭС. Анализ полученных результатов радиологического обследования показывает, что очищение почв (переход) из разряда загрязненных (свыше 37 кБк/м²) в «чистые» (до 37 кБк/м²)

составляет всего 253,7 тыс. га, в том числе по юго-западным районам 108,6 тыс. га [4].

Изменение средневзвешенного показателя плотности загрязнения почв говорит о том, что радиационная ситуация в целом стабилизируется, то есть наблюдается снижение уровня радиоактивного загрязнения в основном за счет естественного распада и в малой мере за счет вертикальной и горизонтальной миграции. В настоящее время средневзвешенный показатель плотности загрязнения почв ^{137}Cs по области составляет на сельскохозяйственных угодьях в целом 56,6 кБк/м² (1,52 Ки/км²), в том числе на пашне – 43,1 кБк/м² (1,16 Ки/км²), естественных кормовых угодьях 100,4 кБк/м² (2,71 Ки/км²). Снижение к уровню 1986-1988 г. составило на сельскохозяйственных угодьях 42,8 %, в том числе на пашне – 38,7 % и сенокосно-пастбищных угодьях – 54,1 % [6] (табл. 1).

Таблица 1

Динамика плотности загрязнения ^{137}Cs почв сельскохозяйственных угодий Брянской области (1986-2022 гг.)

Угодья	Годы обследования	Обследованная площадь, тыс.га %	в т. ч. по группам загрязнения, $\frac{\text{кБк} / \text{м}^2}{\text{Ки} / \text{км}^2}$					Средневзвешенная плотность загрязнения, $\frac{\text{кБк} / \text{м}^2}{\text{Ки} / \text{км}^2}$
			до 37 до 1	37-185 1-5	185-555 5-15	555-1480 15-40	св. 1480 св. 40	
Всего с/х угодий	1986-1988	1756,7 100	1054,0 60,0	401,5 22,9	186,6 10,6	97,6 5,6	17,0 1,0	132,1 3,57
	на 01.01. 2023 г.	1655,8 100	1307,7 79,0	234,5 14,2	87,4 5,3	23,0 1,4	3,2 0,2	56,6 1,50
вт.ч. пашни	1986-1988	1267,4 100	787,3 62,1	286,8 22,6	131,0 10,3	55,1 4,4	7,2 0,6	111,4 3,01
	на 01.01. 2023г.	1249,0 100	1019,7 81,6	173,8 13,9	46,5 3,7	8,2 0,7	0,9 0,1	43,1 1,20
сенокосы + пастбища	1986-1988	489,3 100	267,7 54,5	114,7 23,4	55,6 11,4	42,5 8,7	9,8 2,0	185,7 5,02
	на 01.01. 2023 г.	406,8 100	288,0 70,8	60,7 14,9	40,9 10,1	14,8 3,6	2,3 0,6	100,4 2,70
в том числе по 7-ми юго-западным районам								
Всего с/х угодий	1986-1988	523,4 100	39,1 7,5	186,9 35,7	183,0 35,0	97,4 18,6	17,0 3,2	388,5 10,50
	на 01.01. 2023 г.	481,5 100	147,7 30,7	220,3 45,8	87,2 18,1	23,0 4,8	3,2 0,7	156,8 4,20
вт.ч. пашни	1986-1988	359,7 100	26,4 7,3	140,7 39,1	130,3 36,2	55,0 15,3	7,3 2,1	325,6 8,80
	на 01.01. 2023 г.	349,8 100	124,1 35,5	170,3 48,7	46,5 13,3	8,2 2,3	0,9 0,2	116,6 3,10
сенокосы + пастбища	1986-1988	163,7 100	12,7 7,8	46,2 28,2	52,7 32,2	42,4 25,9	9,7 5,9	525,4 14,20
	на 01.01. 2023 г.	131,7 100	23,7 18,0	50,1 38,0	40,8 31,0	14,8 11,3	2,3 1,8	269,7 7,30

Изучение радиационной обстановки на территории Брянской области включает измерение мощности дозы гамма-излучения на высоте 1 метра от поверхности земли приборами типа ДРГ-01Т и отбор почвенных и растительных проб на 32 реперных (контрольных) точках. Исследования показали, что плотность загрязнения почвы ^{137}Cs сильно варьирует по районам Брянской области. Наиболее высокий уровень содержания ^{137}Cs в почве (плотность загрязнения) зафиксирован в Новозыбковском районе – 403,4 кБк/м².

Сотрудниками ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» проводится мониторинг содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, кормах и органических удобрениях в юго-западных районах Брянской области [1]. В 2023 г. было отобрано 57 проб кормов в сельхозпредприятиях юго-западных районах Брянской области.

Исследования качества кормов выявили колебания в накоплении ^{137}Cs в зеленой массе (табл. 2).

Таблица 2

Содержание ^{137}Cs в образцах зеленой массы в юго-западных районах Брянской области в 2023 г.

Наименование района	Всего проверено		в том числе выше ВДУ			Содержание ^{137}Cs , Бк/кг		
	образцов	тонн	образцов	тонн	%	Max	Min	среднее
Новозыбковский район	13	95	1	7	8	428	27	145
Красногорский район	22	156	1	7	5	440	10	147
Гордеевский район	22	152	-	-	-	386	24	185
Итого по 3-м районам:	57	403	2	14	4	440	10	159

Также центр ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» в качестве соисполнителя принимала участие в программе совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. Целью работы было определить влияние новых видов агромероприятий и препаратов на снижение накопления ^{137}Cs из почвы в продукцию растениеводства и кормопроизводства [5] (табл. 3). Исследования проводили в 2021-2022 гг. на производственном поле в СПК «Заречье» Новозыбковского района Брянской области. Испытывали органоминеральный препарат Гумитон [7], азотно-фосфорно-калийного удобрения марки NPK 8:20:30 и Боркалимагnezия. Выращивали сеянные травы. Площадь опытного участка 12 га, учетная площадь делянки 4 га.

Схема опыта № 1:

1а. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га;

2а. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га + NPK 8:20:30 в дозе 0,5 т/га.

3а. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га + Боркалимагnezия в дозе 1 т/га. Площадь каждого варианта 4 га.

Схема опыта № 2:

1б. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га + препарат Гумитон в дозе 1,0 л/га. (лиственное внесение препарата);

2б. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га + NPK 8:20:30 в дозе 0,5 т/га + препарат Гумитон в дозе 1,0 л/га (лиственное внесение препарата).

3б. вариант. Фон N34.5 (технология хозяйства) аммиачная селитра 0,1 т/га + Боркалимагnezия в дозе 1 т/га + препарат Гумитон в дозе 1,0 л/га (лиственное внесение препарата). Площадь каждого варианта 4 га.

Обработка вегетирующих растений сеянных трав препаратом Гумитон повышает урожайность сена на всех вариантах опыта. Наибольший эффект от действия Гумитона в 2021 году получен на варианте Фон N34.5 + смесь N8P20K30 (повышение урожая на 16 ц/га), результат по снижению перехода ^{137}Cs в вегетативную массу в эксперименте – 2,2 раза. Эффект от последствия Гумитона в 2022 году получен на варианте Боркалимагnezия (повышение урожая на 24 ц/га). Результат по снижению коэффициента перехода ^{137}Cs в вегетативную массу в эксперименте с применением Боркалимагnezия + Гумитон на следующий год после внесения составил 1,3 раза [3].

Оценка эффективности новых видов агроメリорантов (созданных на базе местных агропудр) для повышения урожайности и снижения накопления ¹³⁷Cs в технологиях возделывания сеяных трав (клевер 3-й год, зеленая масса)

Вариант	Урожайность, 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
2021 год							
1б. Фон N34.5 + Гумитон	58	-	-	29	526,5	0,05	-
2б. Фон N34.5 + N8P20K30 + Гумитон	74	16	21	9	510,4	0,02	2,2
3б. Фон N34.5 + Боркалимагнезия + Гумитон	65	12	23	19	506,5	0,04	1,7
2022 год (последствие)							
1а. Фон N34.5 + Гумитон	78	-	-	26	479,5	0,05	-
3б. Фон N34.5 + Боркалимагнезия + Гумитон	102	24	30	17	513,1	0,03	1,3

Таким образом, по результатам проведенного анализа экспериментальных данных по эффективности препарата Гумитон в технологиях возделывания сеяных трав можно сделать следующие выводы: повышаются основные показатели структуры урожая, снижается переход ¹³⁷Cs из почвы в вегетативную массу, увеличивается урожайность на 20-30 %.

Список литературы

1. Продуктивность и качество сена радиоактивно загрязненного луга в отдаленный период после аварии на ЧАЭС / Н.М. Белоус [и др.] // Агротехнический вестник. 2018. № 5. С. 60-64.

2. Почвенное плодородие и радионуклиды / Г.Т. Воробьев [и др.]. М.: НИА – Природа, 2002. 357 с.

3. Методика определения экономической эффективности технологических приемов, используемых при ведении растениеводства, кормопроизводства и животноводства на техногенно загрязненных территориях. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2009. С. 55.

4. Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС/ А.В. Панов, П.В. Прудников, И.Е. Титов [и др.] // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 1. С. 25-35.

5. Прудников П.В., Леянова Е.Н. Влияние мелиорантов и минеральных удобрений на агрохимические свойства почвы и урожай сои // Агротехнический аспект устойчивого развития АПК: материалы XVII Международной научной конференции. Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2020. 826 с.

6. Прудников П.В., Пашковский А.А. Чернобыль-35 лет спустя: материалы межгосударственной научно-практической конференции. Брянск, 2021. 136 с.

7. Органоминеральное комплексное удобрение и способ его получения: пат. 2490241 RU C1 C05F 11/02 (2006.01). / А.Н. Ратников, Н.И. Санжарова, К.В. Петров [и др.]; заявлено 23.01.12; опублик. 20.08.2013. Бюл. № 23. 9 с.

RADIATION CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL LANDS AND THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF NEW TYPES OF AGROMELIORANTS AND ORGANO-MINERAL FERTILIZERS ON SOWN GRASSES IN THE SOUTH-WESTERN REGIONS OF THE BRYANSK OBLAST

Prudnikov P.V., Pashkovsky A.A., Lelyanova E.N.

Federal State Budget institution «Center for Chemicalization and Agricultural Radiology «Bryansky»,
Sportivnaya st. 1, Michurinsky, Bryansk region, Bryansk district, Russian Federation, 241524
e-mail: agrohim32@mail.ru

As a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the territory of the Bryansk region, radioactive substances fell out, which led to significant contamination of agricultural land. The precipitation of radionuclides on the terrain was uneven, "spotty" in nature, due to a variety of weather conditions, terrain conditions and other factors. Almost the entire territory of the Bryansk region was polluted, but seven south-western districts were most heavily polluted [2].

Keywords: radioactive contamination, accident at the Chernobyl nuclear power plant, ^{137}Cs , Bryansk region, fertility, monitoring of the radiation situation, agricultural products

УДК 631:895:633.13:631.45

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА ГУМИТОН ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОВСА В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Суслов А.А., Петров К.В., Иванкин Н.Г., Баланова О.Ю.^а

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^а animaleco15@rambler.ru

В вегетационном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве, содержащей ^{137}Cs , показано, что внесение в почву комплексного удобрения ФосАгро NPK (8:20:30) способствовало повышению сырой биомассы овса на 168 %, зерна – на 175 % по сравнению с контролем и резко снижало накопление ^{137}Cs в сырой биомассе в 3,7 и в 4,1 раза – в зерне, соответственно. Обработка вегетирующих растений органо-минеральным комплексом Гумитон на почве без удобрений достоверно повысила сырую биомассу овса на 6 %, а на почве с ФосАгро NPK – снизила Кн ^{137}Cs на 8,3 % по сравнению с вариантами без использования препарата. В фазу полной спелости овса применение Гумитона по фону ФосАгро NPK повысило массу соломы на 28 %, общую и продуктивную кустистость растений – в 1,1 и 1,2 раза; на неудобренной почве снизило Кн ^{137}Cs в зерне на 7,4 %, соответственно, по сравнению с вариантами без обработки препаратом.

Ключевые слова: Гумитон, ФосАгро NPK, дерново-подзолистая почва, овес, сырая биомасса, зерно, накопление ^{137}Cs

Введение

В результате техногенной катастрофы на Чернобыльской АЭС более 17 млн. га сельскохозяйственных угодий оказались загрязнены радиоактивными веществами (РВ). Наиболее высокие уровни загрязнения в РФ фиксируются в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях. На основе полученных данных о содержании радионуклидов (РН) в получаемой сельскохозяйственной продукции проводятся реабилитационные работы по восстановлению почв на техногенно загрязненных территориях [1, 2].

Необходимо дать агроэкологическое обоснование применяемым технологическим приемам возделывания сельскохозяйственных культур для выполнение задач по сохранению и повышению плодородия почв, получению экологически безопасной продукции, соответствующей существующим санитарно-гигиеническим нормативам по содержанию в ней РН [2].

Получение высококачественной сельскохозяйственной продукции, в частности овса, с высокой (до 5-6 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.

Органо-минеральный комплекс на основе торфа Гумитон, содержащий микроэлементы, является инновационной разработкой НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ. Имеются: патент на изобретение № 2709737 от 19.12.2019 г.; Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 718667 от 05.07.2019 г. Гумитон – высокоэффективный комплекс на основе биологически активных компонентов торфа. Отличительной составляющей Гумитона от аналогов является высокое содержание гуматов калия (11-14 %). Содержание (%) органического вещества – 18-22; макроэлементов: N – 12, P – 23, K – 30; микроэлементов: B – 0,2, Mo – 0,1, Mn – 0,1. Для производства Гумитона используются низинные торфа со следующими характеристиками: рН \geq 5,0, зольность – 8-15 %, содержание гуминовых веществ более 35 %.

Применение Гумитона повышает иммунитет растений, увеличивает эффективность корневого питания растений, в результате повышается урожайность сельскохозяйственных культур и качество производимой продукции [3, 4].

Гумитон используется для: некорневой обработки вегетирующих растений (концентрат разводится водой в соотношении 1:300 л рабочего раствора на 1 га посевов) и обработки посадочного материала (1:40). Он не имеет запаха, безвреден при использовании, хорошо растворим в воде, совместим с большинством используемых минеральных удобрений и средств защиты растений. По причине четко выраженного антистрессового действия на факторы внешней среды обработку Гумитоном не следует совмещать с применением гербицидов. Оптимальный срок обработки посевов Гумитоном – 7 суток до или после применения гербицидов.

1-2-кратная обработка Гумитоном вегетирующих растений в дозе 1 л/га проводится в фазы наиболее активного роста и потребления питательных веществ [3, 4].

Материалы и методы

В вегетационном опыте на дерново-подзолистой супесчаной почве изучали действие Гумитона и ФосАгро NPK на продуктивность овса (*Avena sativa*) сорт «Яков» и поступление ^{137}Cs в зеленую массу из загрязненной почвы. Выбор культуры обусловлен тем, что овес одна из основных зональных кормовых и зерновых культур, выращиваемых в Нечерноземной зоне РФ.

Комплексное удобрение ФосАгро NPK (8:20:30) – удобрение с высоким содержанием P, K и низким содержанием N, хорошо подходит для основного внесения с осени. Особенно ценно для культур, требующих высокого содержания в почве доступного P и K.

Высокоэффективно на почвах с низким содержанием подвижного K, легких по гранулометрическому составу и с промывным водным режимом [5]. Применяется весной при посеве или вразброс (0,3-0,5 т/га) для любых типов почв; для различных культур (сахарной свеклы, многолетних трав, кукурузы на силос, картофеля, подсолнечника, сои, рапса, пшеницы, ячменя, ржи).

Агрохимические показатели почвы перед закладкой опыта: pH_{KCl} – 4,73; Нг – 4,05 смоль(экв)/1 кг почвы; гумус – 1,42 %; Ca и Mg – 4,12 и 0,88 ммоль(экв)/100 г; P_2O_5 и K_2O – 239 и 89 мг/кг почвы, соответственно; подвижные формы микроэлементов: B – 0,42, Mo – 0,25; Mn – 62,1 мг/кг почвы, соответственно.

Сосуд вмещал 5,5 кг почвы. ФосАгро NPK ($\text{N}_{0,06}\text{P}_{0,15}\text{K}_{0,23}$) в виде удобрения перед посевом и ^{137}Cs (в виде раствора CsCl – 50 кБк/кг почвы) внесены в почву в 2022 г. Посев овса производился из расчета по 25 семян/сосуд (до уборки оставили по 15 растений). Обработка Гумитоном (1 л/га) вегетирующих растений проводилась в фазу выхода в трубку овса. Повторность опыта 3-х кратная. Вегетационный опыт проводили по методикам [6].

Схема опыта:

1. Контроль – почва без удобрений + ^{137}Cs .
2. ^{137}Cs + Гумитон
3. ФосАгро NPK + ^{137}Cs
4. ФосАгро NPK + ^{137}Cs + Гумитон.

Половину растений убирали в фазу цветения на зеленую массу, вторую половину – в фазу полной спелости овса на зерно. После уборки растений проводили определение показателей (высота растений, общая биомасса, масса зерна, масса соломы, общая и продуктивная кустистость).

Определяли содержание ^{137}Cs в почвенных образцах, в вегетативной массе и в зерне овса. Измерения проводили в аккредитованной Испытательной лаборатории радиационного контроля НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (Аттестат аккредитации № RA.RU. 21АД81) на аттестованном оборудовании по аттестованным методикам. Для этого использовали полупроводниковый гамма-спектрометр (Canberra) с программным обеспечением Genie-2000 по количественному анализу спектров. K^{137}Cs считывали как (Бк/кг растений)/(Бк/кг почвы).

Статистическую обработку результатов исследований выполняли с использованием программы Microsoft Excel. Экспериментальные данные представлены в виде средних арифметических и НСР ($p \leq 0,05$).

Результаты и их обсуждение

На основе данных вегетационного опыта 2022 г. на дерново-подзолистой супесчаной почве с внесенным ^{137}Cs показана эффективность применения Гумитона на кормовых культурах. Увеличение зеленой массы горохо-овсяной смеси (1:1) при обработке вегетирующих растений Гумитоном составило 12 %.

Уменьшение накопления ^{137}Cs в зеленой массе составило 1,2 раза.

Ранее по результатам производственных опытов при выращивании ячменя на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых супесчаных почвах Новозыбковского района Брянской области было показано, что внесение в почву ФосАгро NPK (0,3 т/га) повышало урожай зерна на 39 % по сравнению с контролем. Несмотря на высокую плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (17,1 Ки/км²), содержание радионуклида в зерне во всех вариантах опыта оставалось ниже нормативов СанПиН 2.3.2. 2650-10 (70 Бк/кг). Удобрение ФосАгро NPK снижало поступления ^{137}Cs в зерно ячменя в 2,8 раза. Гумитон повышал урожай зерна ячменя на 24-29 % и снижал перехода ^{137}Cs в зерно в 2,3 раза [7].

В данном опыте внесение в почву ФосАгро NPK способствовало увеличению средней высоты растений на 29,7 % и сырой биомассы на 168,4 %, но не повлияло на общую и продуктивную кустистость овса в фазу цветения. Обработка Гумитоном овса не изменила ни средней высоты растений, ни показателей общей и продуктивной кустистости, но вызвало небольшое, но достоверное увеличение сырой биомассы овса 6,0 % в варианте ^{137}Cs + Гумитон и 2,6 % в варианте ФосАгро NPK + ^{137}Cs + Гумитон, по

сравнению с вариантами без применения препарата (табл. 1).

Внесение в почву ФосАгро NPK (в 3,7 раза) снизило накопление ^{137}Cs растениями овса. Высокое содержание K_2O (30 %) в удобрении способствовало интенсивному потреблению К и снижению поступления ^{137}Cs из ППК в растения овса. Применение Гумитона достоверно не изменило накопление ^{137}Cs зеленой массой овса на неудобренной почве и снизило Kn^{137}Cs на 8,3 % в растениях по сравнению с вариантом ФосАгро NPK + ^{137}Cs (табл. 1).

После уборки урожая в фазу полной спелости овса было установлено, что внесение в почву ФосАгро NPK способствовало увеличению средней высоты растений на 35 %, массы зерна и соломы на 175 и 111 %, повысило общую и продуктивную кустистость в 1,3 и 1,1 раза, соответственно. Обработка Гумитоном растений на неудобренной почве достоверно не повлияла ни на среднюю высоту овса, ни на показатели общей и продуктивной кустистости, ни на массу зерна и соломы, по сравнению с вариантом без применения препарата (табл. 2).

На удобренной ФосАгро NPK почве применение Гумитона не повлияло на среднюю высоту растений и массу зерна, но повысило массу соломы на 28 %, общую и продуктивную кустистость в 1,1 и 1,2 раза, соответственно (табл. 2).

Таблица 1

Продуктивность, биометрические показатели зеленой массы овса и накопление ^{137}Cs растениями в фазу цветения

Вариант	Высота растений, см	Сырая биомасса, г/сосуд	Общая кустистость	Продуктивная кустистость	Kn^{137}Cs
Почва б/у+ ^{137}Cs	60,7	33,5	1,0	1,0	0,24
^{137}Cs +Гумитон	57,8	35,5	1,0	1,0	0,23
ФосАгроNPK+ ^{137}Cs	78,7	89,9	1,0	1,0	0,065
ФосАгроNPK+ ^{137}Cs +Гумитон	78,8	92,2	1,0	1,0	0,06
НСР ₀₅	4,0	1,9	0,1	0,1	

Таблица 2

Продуктивность, биометрические показатели овса и накопление ^{137}Cs зерном в фазу полной спелости

Вариант	Высота растений, см	Масса, г/сосуд		Кустистость		Kn^{137}Cs
		зерна	соломы	общая	продуктивная	
Почва б/у + ^{137}Cs	55,3	5,2	14,6	1,0	1,0	0,145
Почва б/у + ^{137}Cs + Гумитон	53,6	5,1	14,6	1,0	1,0	0,135
ФосАгро NPK + ^{137}Cs	74,9	14,3	30,8	1,3	1,1	0,035
ФосАгро NPK + ^{137}Cs + Гумитон	73,1	13,9	39,3	1,45	1,35	0,035
НСР ₀₅	4,5	1,0	2,7	0,1	0,1	

Внесение в почву ФосАгро NPK (в 4,1 раза) снизило накопление ^{137}Cs зерном овса. Применение Гумитона на удобренной почве достоверно (на 7,4 %) снизило $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$ в зерне (табл. 2).

Низкие значения высоты растений, урожайности зерна, соломы и щуплое зерно овса могут быть объяснены кратковременным (в течение 24 ч), но резким (до 60 °С) повышением температуры воздуха в теплице в фазу колошения овса (после обработки растений Гумитоном) из-за сбоя в работе вентиляции.

Заключение

Комплексное удобрение ФосАгро NPK (8:20:30), внесенное в дерново-подзолистую супесчаную почву, способствовало повышению сырой биомассы овса на 168 %, зерна – на 175 % по сравнению с контролем и резко снизило $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$ – в 3,7 раза в сырой биомассе и в 4,1 в зерне, соответственно.

Обработка вегетирующих растений Гумитоном на почве без удобрений достоверно повысила сырую биомассу овса на 6 % и снизила $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$ на почве с ФосАгро NPK на 8,3 % по сравнению с вариантами без препарата.

При уборке овса в фазу полной спелости применение Гумитона на удобренной почве повысило массу соломы на 28 %, общую и продуктивную кустистость растений в 1,1 и 1,2 раза, и снизило $\text{Kн}^{137}\text{Cs}$ в зерне на 7,4 %, соответственно, по сравнению с вариантами без обработки препаратом.

Список литературы

1. Алексахин Р.М. Научные основы ведения сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях, обеспечивающего получение продукции, соответствующей нормативам. Обнинск, 2004. 110 с.

2. Реестр технологических приемов восстановления техногенно нарушенных сельскохозяйственных земель / Р.М. Алексахин, А.Н. Ратников, Л.Н. Ульяненко [и др.]. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ РАСХН, 2009. 106 с.

3. Органоминеральный комплекс Гумитон как элемент адаптивной технологии возделывании озимой пшеницы в Брянской области / А.А. Суслов, А.Н. Ратников, Д.Г. Свириденко [и др.] // Агрехимический вестник. 2020. № 4. С. 24-29. DOI:10.24411/1029-2551-2020-10051.

4. Gumiton – New Organo-Mineral Complex to Increase the Productivity of Agricultural Cultures / V.N. Mazurov, P.S. Semeshkina, A.N. Ratnikov [et al.] // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 8. № 4. PP. 3374-3381.

5. Интернет-ресурс: <https://www.phosagro.ru/production/fertilizer/azotno-fosforno-kalijnye-udobreniya/169553/> (дата обращения: 03.02.2023).

6. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного опыта. М.: Наука, 1968. 243 с.

7. Сравнительная оценка эффективности различных гуминовых препаратов при возделывании ячменя в условиях радиоактивного загрязнения почв / Д.Г. Свириденко, К.В. Петров, С.П. Арышева [и др.] // Вестник аграрной науки. 2023. Т. 2(101). С. 57-67.

THE EFFECTIVENESS OF COMPLEX GUMITON IN GROWING OATS IN CASE OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

Sviridenko D.G., Arysheva S.P., Suslov A.A., Ivankin N.G., Petrov K.V., Balanova O.Yu. ^a

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^aanimaleco15@rambler.ru*

According to the results of vegetation experiment on soddy-podzolic sandy loam soil, containing ^{137}Cs , it is shown that the introduction of PhosAgro NPK complex fertilizer into the soil (8:20:30) contributed to an increase in the crude biomass of oats by 168%, grain – by 175% compared to the control and sharply reduced the accumulation of ^{137}Cs - in crude biomass by 3.7 and 4.1 times in grain, respectively. The treatment of vegetating oat plants with an organo-mineral complex based on Gumiton peat on soil without fertilizers significantly increased the crude biomass of oats by 6% and reduced accumulation coefficient ^{137}Cs on soil with PhosAgro NPK by 8.3% compared to options without the use of the drug. In the phase of full ripeness of oats, the use of Gumiton on soil fertilized with PhosAgro NPK increased the mass of oat straw by 28%, the total and productive bushiness of plants by 1.1 and 1.2 times, and reduced AC^{137}Cs on non-fertilized soil by 7.4%, respectively, compared with options without treatment with the drug.

Keywords: soil, oats, ^{137}Cs , PhosAgro NPK, Gumiton, crude biomass, grain, accumulation

According to the results of vegetation experiment on the basis of RIRAE on soddy-podzolic acidic sandy loam soil containing ^{137}Cs , it was shown that the introduction of PhosAgro NPK complex fertilizer into the

soil (8:20:30) at a dose of $N_{0.06}P_{0.15}K_{0.23}$ g/kg of soil contributed to an increase in the crude biomass of oats of the Yakov variety in the flowering phase by 168%, grain weight – by 175%, in the phase of full ripeness of oats, plant height - by 30 and 35% compared to the control, respectively. PhosAgro NPK fertilizer sharply reduced the accumulation of ^{137}Cs : in raw oat biomass by 3.7 times, in grain – by 4.1 times, respectively.

Organo-mineral complex based on Gumiton peat has a high content of elements of mineral nutrition of plants (N – 12%, P_2O_5 – 23 %, K_2O – 30 %), humates (11-14%) and enriched with microelements (B, Mo, Mn). Lowland peat with the following characteristics are used for the production of Gumiton: pH ≥ 5.0 , ash content - 8-15%, humic substances content more than 35%. During leaf processing of plants, the concentrate is diluted with water in a ratio of 1:300 liters of working solution per 1 hectare of crops (dilution in a smaller volume of water is allowed, which is provided for by

the technical characteristics of the sprayer). The treatment of vegetating oat plants with Gumiton at a dose of 1 l/ha in the phase of entering the tube significantly increased the crude biomass of oats by 6% on soil without fertilizers and reduced Accumulation coefficient of ^{137}Cs (AC) on soil with PhosAgro NPK by 8,3% compared with options without the use of the drug. In the phase of full ripeness of oats. Using of Gumiton on soil fertilized with PhosAgro NPK increased the mass of oat straw by 28%, the total and productive bushiness of plants by 1.1 and 1.2 times, and reduced AC ^{137}Cs on non-fertilized soil by 7,4% in grain, respectively, compared with options without treatment with Gumiton.

Complex fertilizer PhosAgro NPK (8:20:30) and organo-mineral complex based on Gumiton peat are effective agromeliorants for increasing the productivity of oats and reducing the intake of ^{137}Cs into grain on radioactively contaminated soddy-podzolic soils.

УДК 632.262:631.5

МЕЖСОРТОВЫЕ РАЗЛИЧИЯ В НАКОПЛЕНИИ 90-СТРОНЦИЯ В ЛУКЕ РЕПЧАТОМ

Середин Т.М.^а, Баранова Е.В., Кайгородова И.М., Марчева М.М., Ушакова О.В., Солдатенко А.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства», 143072, Московская обл., Одинцовский р-он, п. ВНИИССОК, ул. Селекционная, д. 14, Российская Федерация
e-mail: ^а timofey-seredin@rambler.ru

Лук репчатый (*Allium cepa* L.) по ботанической классификации принадлежит к семейству Луковые (*Alliaceae* L.) и роду лук (*Allium* L.). В Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации на 2022 год внесено 205 сортов и 209 гибридов лука репчатого. Культура лука репчатого происходит из горных районов Средней Азии [1]. Одна из самых древних овощных культур, известная уже за 4 тысячи лет до н.э. Химический состав лука репчатого зависит от многих факторов, в первую очередь от сорта, экологических условий и агротехнических приемов [2]. По вкусовой оценке сорта лука репчатого делят на три группы: острые, полуострые, сладкие или салатные, которые отличаются по содержанию в луковичах сухого вещества, сахаров и других веществ [3]. В настоящих исследованиях охарактеризован коллекционный питомник лука репчатого по содержанию 90-стронция. Показано, что в среднем в зависимости от образца содержание последнего наблюдается 11,26 Бк/кг. Исследовано пять коллекционных форм лука репчатого с разной окраской сухих кроющих чешуй. Выяснено, что минимальное накопление 90-стронция отмечено у образца с белой окраской, а максимальное с коричневой окраской сухих чешуй.

Ключевые слова: лук репчатый, радионуклиды, 90-стронций, луковича

Методика исследований

Для проведения работы в 2022-2023 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) и «Методическими указаниями по изучению и поддержанию в живом виде мировой коллекции лука и чеснока» (2005). В

разные годы исследований коллекционный питомник лука репчатого был представлен 170 сортообразцами различного эколого-географического происхождения и образцами из каталога ВНИИГР им. Н.И. Вавилова.

Результаты исследований

В условиях изучаемых лет накопление радионуклида, в частности ^{90}Sr в луковичах лука репчатого в зависимости от образца варьировало от 7,03 до

12,83 Бк/кг, что почти в четыре раза ниже ПДК. Среднее накопление по ⁹⁰стронцию – 11,26 Бк/кг.

Как показали результаты исследований коллекционного питомника по уровню накоплению ⁹⁰стронция проявляются сортовые различия и

специфика накопления поллютанта. В таблице 1 представлены образцы, которые были отобраны в условиях Московской области в 2022 году как контрастно различающиеся по накоплению радионуклида.

Таблица 1

Содержание ⁹⁰стронция (Бк/кг) в луковицах лука репчатого, 2022-2023 годы

Сортообразец	⁹⁰ Sr	Ранг
Стардаст (белая окраска сухих чешуй)	7,03±0,7	1
Ли лу (лимонная окраска сухих чешуй)	12,13±1,2	3
Селекционный образец (Корея) 47-21 (желтая окраска сухих чешуй)	11,97±1,1	2
Ред Барон (красная окраска сухих чешуй)	12,34±1,2	4
Новатор (озимая форма) (коричневая окраска сухих чешуй)	12,83±1,2	5
ПДК	50	-

С целью выделения исходного материала для селекции на стабильно низкий уровень накопления ⁹⁰стронция особый интерес представляют два образца: Стардаст и Селекционный образец из Кореи 47-21.

В результате проведения эксперимента на коллекционном питомнике лука репчатого отечественной и зарубежной селекции выявлена сортовая реакция по накоплению ⁹⁰стронция. Выяснено, что лук репчатый не является активным аккумулятором накопления экотоксикантов в условиях Московской области. В среднем по пяти сортам накопление ⁹⁰Sr составило 12,13 Бк/кг, при ранге 3. Необходимо отметить, что анализ полученных результатов свидетельствует, что при высоком уровне накопления ⁹⁰стронция растения сформировали более крупный листовый аппарат и имели более продуктивные луковицы по сравнению с растениями с низким уровнем накопления элемента.

Список литературы

1. Изучение сортов и гибридов лука репчатого коллекции ВНИИГР в почвенно-климатических условиях Астраханской области / Т.М. Середин, В.В. Шумилина, Н.А. Щербакова [и др.] // Картофель и овощи. 2020. Вып. 2. С.28-31.

2. Влияние глауконитовых песков на основные биохимические показатели лука репчатого / М.М. Марчева, Т.М. Середин, В.В. Логунова [и др.] // Агрохимический вестник. 2022. № 3. С.39-42.

3. Адаптивный потенциал овощных растений для получения экологически безопасной продукции с низким уровнем накопления ¹³⁷-цезия / А.В. Солдатенко, Е.Г. Добруцкая, С.М. Сычев, Т.М. Середин // Фундаментальные и прикладные исследования в биоорганическом сельском хозяйстве России, СНГ и ЕС.: сб. науч. тр., Москва, 9-12 августа 2016 г.М.: Печатный город, 2016, Т.2. С. 531-536.

INTERSORT DIFFERENCES IN THE ACCUMULATION OF ⁹⁰-STRONTIUM IN ONIONS

Seredin T.M.^a, Baranova E.V., Kaigorodova I.M., Marcheva M.M., Ushakova O.V., Soldatenko A.V.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center», Selektionnaya st. 14, VNISSOK, Moscow region, Odintsovo district, Russian Federation, 143072

e-mail: ^a timofey-seredin@rambler.ru

Onion (*Allium cepa* L.) according to the botanical classification belongs to the Onion family (*Alliaceae* L.) and the onion genus (*Allium* L.). The State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation for 2022 includes 205 varieties and 209 hybrids of onion. The onion culture originates from the mountainous regions of Central Asia [1]. One of the most ancient vegetable crops, known already for 4 thousand years BC. The chemical composition of onions depends on many factors, primarily on the variety, environmental conditions and agrotechnical techniques [2]. According to the taste assessment, onion varieties are divided into three groups: spicy, spicy, sweet or salad, which differ in the content of dry matter, sugars and other substances in the bulbs [3]. In these studies, the collection nursery of onions is characterized by

the content of 90-strontium. It is shown that on average, depending on the sample, the content of the latter is observed at 11.26 Bq/kg. Five collectible forms of onion with different colors of dry covering scales have been studied. It was found out that the minimum accumulation of 90-strontium was observed in a sample with a white color, and the maximum with a brown color of dry scales.

Keywords: onion, radionuclides, 90-strontium, bulb onion

УДК 550.424

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕХОДА ^{137}Cs В ЗЛАКОВЫЙ ТРАВСТОЙ НА СЕТИ КОНТРОЛЬНЫХ УЧАСТКОВ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ЗА ДИНАМИКОЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА БЫВШИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ НА ОТЧУЖДЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Титов И.Е., Кречетников В.В., Кузнецов В.К., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: rirae70@yandex.ru*

В ходе работ по реализации мероприятий Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС создана сеть наблюдений за динамикой восстановления природных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях на отчужденных территориях, которая включает 16 контрольных участков, находящихся в зоне отчуждения. На основе полученных результатов мониторинга за 2020-2022 гг. для каждого контрольного участка рассчитаны коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой.

Ключевые слова: : коэффициенты перехода, отчужденные территории, авария на ЧАЭС, мониторинг, контрольные участки

Одной из основных задач Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, является создание условий по возврату радиоактивно загрязненных территорий к нормальной жизнедеятельности. Для реализации поставленной цели был выполнен комплекс работ, включая организацию сети многолетних наблюдений за динамикой восстановления природных экосистем и фитосанитарной обстановкой.

На начальном этапе работ был выполнен анализ имеющейся информации об уровнях радиоактивного загрязнения, характеристиках почвенного покрова, культуртехническом состоянии выведенных из оборота земель для 34 предварительно отобранных точек для формирования сети контрольных участков для наблюдения за состоянием бывших сельскохозяйственных земель на отчужденных территориях. Было проведено первичное обследование каждой

точки, для дальнейшего уточнения перечня контрольных участков и закладки сети наблюдения за состоянием бывших сельскохозяйственных земель на отчужденных территориях.

Для формирования сети наблюдений были отобраны участки с различными типами почв, уровнями загрязнения и культуртехническим состоянием. Также учитывалось географическое положение точек. Для территориальной привязки исследуемых контрольных участков было проведено их оконтуривание с географической привязкой по всему периметру каждого участка и закладкой номерных реперных колышков.

Таким образом, была заложена сеть наблюдения за динамикой восстановления природных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях на отчужденных территориях, которая включает 16 контрольных участков (рис. 1).

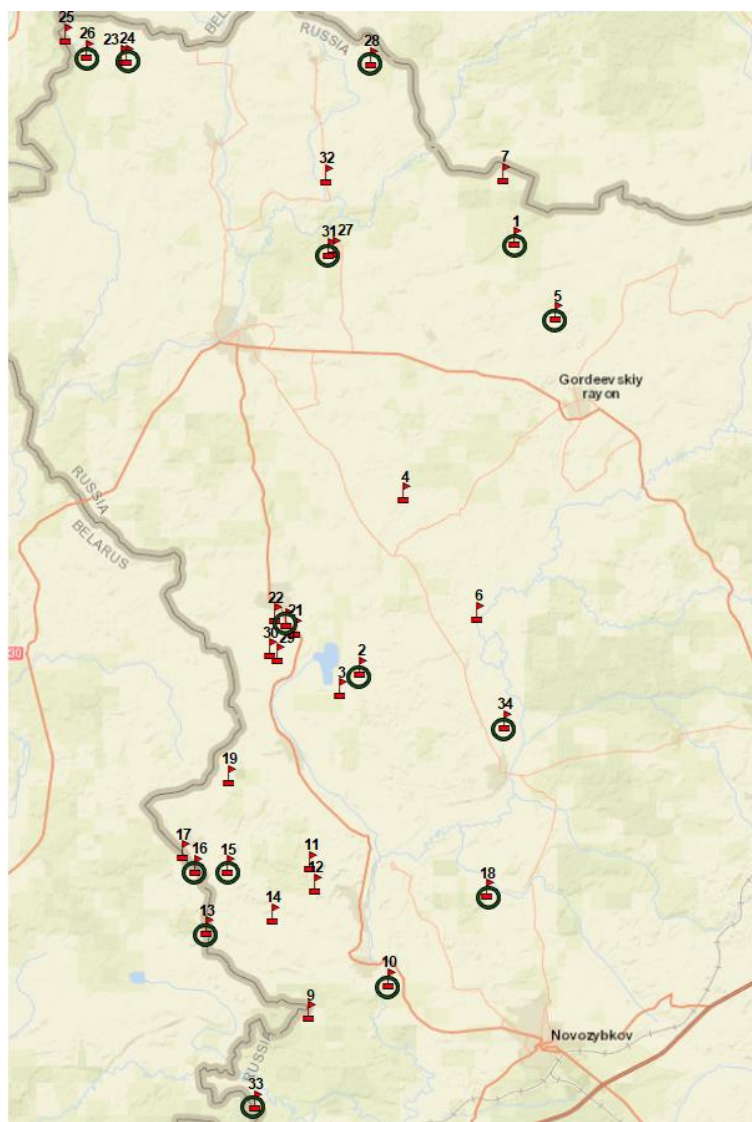


Рисунок 1. Картограмма размещения сети контрольных участков

Наблюдения на сети контрольных участков комплексного мониторинга за динамикой восстановления природных экосистем на бывших сельскохозяйственных землях на отчужденных территориях проводились с 2020 по 2022 год. Наряду с исследованием химических, физико-химических, физических, водно-физических и биологических свойств почв определялись уровни загрязнения почв и растительности радионуклидами.

На основе полученных данных по содержанию ^{137}Cs в почве и луговой растительности (злаковый травостой), рассчитаны коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой для каждого контрольного участка (табл. 1).

Из представленных данных (табл. 1, рис. 2) видно, что максимальные коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой наблюдаются при очень

низкой (0-4 мг/100 г почвы) и низкой (4-8 мг/100 г почвы) степени обеспеченности обменным калием. Тогда как при повышенной (12-17 мг/100 г почвы), высокой (17-20 мг/100 г почвы) и очень высокой (выше 20 мг/100 г почвы) степени обеспеченности значения коэффициентов перехода ^{137}Cs в злаковый травостой резко снижаются (рис.2).

Из представленных данных (табл. 1) видно, что максимальные коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой наблюдаются при очень низкой (0-4 мг/100 г почвы) и низкой (4-8 мг/100 г почвы) степени обеспеченности обменным калием. Тогда как при повышенной (12-17 мг/100 г почвы), высокой (17-20 мг/100 г почвы) и очень высокой (выше 20 мг/100 г почвы) степени обеспеченности значения коэффициентов перехода ^{137}Cs в злаковый травостой резко снижаются.

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой на сети контрольных участков на бывших сельскохозяйственных землях на отчужденных территориях

№ точки	Коэффициенты перехода ^{137}Cs в злаковый травостой в скобках – содержание подвижных форм калия (K_2O), мг/100 гр почвы				Тип почвы
	2020	2021	2022	Ср.знач.	
1	0,337 (4,99*)	0,859 (1,92)	1,05 (1,93)	0,749	дерново-подзолистая, легкосуглинистая
2	0,665 (6,89)	0,45 (6,85)	0,628 (7,12)	0,581	дерново-подзолистая, песок связанный
5	0,228 (6,89)	0,805 (5,75)	1,353 (5,71)	0,795	дерново-подзолистая, песок связанный
10	0,029 (5,2)	0,098 (5,23)	-	0,064	аллювиальная дерновая, слоистая, песок несвязанный
13	0,018 (11,53)	0,021 (11,61)	0,0134 (11,53)	0,017	дерново-глеевая, супесчаная
15	0,148 (8,03)	0,28 (7,96)	0,148 (8,05)	0,192	дерново-подзолистая, песок связанный
16	0,648 (2,93)	0,867 (3,01)	1,17 (3,04)	0,895	дерново-подзолистая, супесчаная
18	0,217 (2,63)	0,466 (2,58)	0,375 (2,74)	0,353	дерново-подзолистая, супесчаная
21	0,133 (2,26)	0,343 (2,27)	0,483 (2,34)	0,320	дерново-подзолистая, супесчаная
24	0,008 (13,57)	0,062 (13,48)	0,018 (13,51)	0,029	дерново-подзолистая, супесчаная
26	0,061 (7,66)	0,094 (7,63)	0,117 (7,71)	0,091	дерново-подзолистая, супесчаная
28	0,006 (26,36)	0,01 (26,51)	0,093 (25,54)	0,036	дерново-подзолистая, супесчаная
31	0,128 (8,17)	0,265 (8,15)	0,099 (8,15)	0,164	дерново-подзолистая, супесчаная
32	0,077 (2,46)	0,103 (2,48)	0,127 (2,53)	0,102	дерново-подзолистая, супесчаная
33	0,938 (6,09)	0,984 (6,06)	5,02 (6,24)	2,314	аллювиальная лугово-болотная
34	0,067 (2,89)	0,088 (2,93)	0,434 (3,01)	0,196	дерново-подзолистая, песок связанный

* – в скобках – содержание подвижных форм калия (K_2O), мг/100 гр почвы

Полученные результаты подтверждают необходимость применения калийных удобрений на радиоактивно загрязненных ^{137}Cs территориях с низким

содержанием обменного калия для получения продукции кормопроизводства, удовлетворяющей нормативам.

COEFFICIENTS OF ^{137}Cs TRANSITION TO CEREAL HERBAGE ON A NETWORK OF CONTROL SITES FOR INTEGRATED MONITORING OF THE DYNAMICS OF RESTORATION OF NATURAL ECOSYSTEMS ON ABBANDONED LANDS IN EXCLUSION ZONE

Titov I.E., Krechetnikov V.V., Kuznetsov V.K., Shubina O.A., Krechetnikova E.O.

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

As part of the work on the implementation of the activities of the Program of Joint Activities within the framework of the Union State of Russia and Belarus for the Protection of the population and rehabilitation of territories affected by the Chernobyl accident a network of control sites for observations of the dynamics of restoration of natural ecosystems on abandoned lands, which includes 16 control sites located in exclusion zone. Based on the results of monitoring for 2020-2022, the coefficients of the transition of ^{137}Cs to grassland were calculated for each control site.

Keywords: transition coefficients, alienated territories, Chernobyl accident, integrated monitoring, control areas

УДК 504.4.054: 551.48: 661.879.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ^{238}U В ВОДЕ, КАК ФАКТОРА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕРРИТОРИИ СИП

Тлеуканова Ж.Е.^а, Айдарханова А.К., Мамырбаева А.С., Субботин С.Б.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» Министерства энергетики Республики Казахстан, 071100, область Абай, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 2Б, Республика Казахстан

e-mail: ^а Zhapasheva_zh@nnc.kz

В работе представлены данные по распределению ^{238}U по формам нахождения в воде водных объектов территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) в зависимости от степени окисления и размера частиц. В результате полученных данных установлено, что в водах исследованных водоемов техногенного происхождения содержание ^{238}U находилось ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения. В исследованных водах штолен площадки «Дегелен» от 52 % до 94 % ^{238}U находится в степени окисления +6, от 51 % до 80 % данного радионуклида распределено в виде растворенного вещества.

Ключевые слова: СИП, водные объекты, ^{238}U , формы нахождения, каскадная фильтрация, степень окисления

Казахстан был активно вовлечен в производство ядерного оружия при Советском Союзе. Кроме СИП, существовало еще значительное количество предприятий, имевших отношение к ядерной инфраструктуре. Все это, включая уранодобывающую промышленность Казахстана, имеет огромное влияние на радиозоологическую обстановку в нашей стране. Однако радиационный фактор является не единственным, влияющим на показатели состояния окружающей среды и здоровье населения. Зачастую немаловажным фактором становится также и загрязнение природных экосистем тяжелыми металлами и токсичными элементами. Одним из таких элементов является уран.

Поэтому одной из важных задач является оценка загрязнения окружающей среды ^{238}U , а также оценка рисков, связанных с воздействием данного загрязнения на человека и природную среду, которое производится измерением общей концентрации радионуклида. Однако без знания закономерностей распределения ^{238}U , его форм нахождения и возможной трансформации, влияющих на динамику миграции в объектах

экосистемы, невозможна корректная оценка экологической обстановки и ее прогнозирование.

Исследования, проводимые на территории СИП, показали, что компоненты окружающей среды в той или иной степени загрязнены ураном. При этом установлены существенные уровни загрязнения водной среды не только на территории СИП, но и за ее пределами.

Точки отбора проб воды выбирались на некотором расстоянии от населенного пункта, для рек – до прохождения через населенный пункт, т.е. в месте наименьшего антропогенного воздействия.

В качестве объектов исследования для определения содержания ^{238}U выбраны водоемы территории СИП техногенного происхождения, расположенные на испытательных площадках «Опытное поле», «Телькем» и водотоки припортовых участков штолен площадки «Дегелен».

Водоемы площадки «Опытное поле» – это воронки, образованные в результате проведения наземных испытаний, заполненные водой. Для проведения исследований выбраны наиболее загрязненные воронки, расположенные на участках № 3, № 4 и П.5 т.6 площадки П5, а также воронка В-1. На площадке «Телькем» было проведено 2

экскавационных взрыва, в результате которых образовались воронки «Телькем-1» и «Телькем-2», выбранные в качестве объектов исследования [1]. Основными водотоками территории СИП являются ручьи площадки «Дегелен», загрязнение которых связано с выносом радиоактивности из полостей штолен водным путем. Для проведения исследований выбраны водотоки в зоне влияния штолен 104, 503, 504, 609.

Определение содержания ^{238}U в воде водных объектов территории СИП проведено методом γ -спектрометрии на γ -спектрометре с колодезным детектором «GWL-120-15-LB-AWT-HJ» производства фирмы «ORTEC», США. Результаты определений представлены в виде распределения ^{238}U по формам нахождения в зависимости от размера частиц и по степени окисления данного радионуклида в исследованных водах.

Формы нахождения радионуклида ^{238}U в водных объектах СИП и его распределение изучены достаточно слабо, что может повлечь за собой некорректную оценку загрязненных водоемов, как источников радиационной опасности и токсичности для природной среды и человека.

В основу методологии определения форм нахождения урана по степени окисления легли методы осаждения. Каждая из представленных форм урана была определена отдельно. Так для определения общего содержания урана использовался метод осаждения фторидами, при котором все существующие формы урана переводят в IV валентное состояние. U (VI) валентный определен методом осаждения 8-оксихинолином, а U (IV) валентный пирофосфатным методом [2]. Уран осаждался согласно представленным методам, затем был получен сухой остаток, который передавался на γ -спектрометрические измерения на спектрометре с колодезным детектором.

Согласно полученным данным в воде с водотоков штолен 503 и 504 свыше 90 % ^{238}U находится в степени окисления + 6. В воде штольни 609 до 52 % исследуемого радионуклида находится в степени окисления + 6 и 48 % – в состоянии + 4. Распределение ^{238}U по степени окисления в воде штольни 104 показало, что 64 % данного радионуклида находится в состоянии окисления + 6 и 36 % – степени + 4.

Определение форм нахождения ^{238}U по размеру частиц проводилось методом каскадной фильтрации. При которой на фильтре задерживался уран в виде грубой взвеси, взвешенного вещества и коллоидов различного размера. Затем фильтры были переданы

на γ -спектрометрический анализ для определения урана. Определение растворенной формы урана проведено методом фторидного осаждения в фильтрате, прошедшем через весь каскад фильтров.

Согласно полученным результатам распределения ^{238}U по формам в зависимости от размера частиц, преимущественной формой нахождения данного радионуклида в воде штольни 503 является растворенное вещество, 15 % от общего содержания ^{238}U в исследованной воде находится в виде коллоидов различного размера и 5 % в виде взвесей. В воде штольни 504 61 % ^{238}U находится в растворенной форме, 21 % в виде взвесей и 18 % от общего содержания в виде псевдоколлоидов. Распределение форм нахождения ^{238}U в воде штольни 104 в зависимости от размера частиц показало, что 51 % исследуемого радионуклида находится в растворенной форме, 20 % в виде грубой взвеси, 20 % во взвешенном веществе и 9 % в виде коллоидов различного размера. В воде водотока штольни 609 55 % от общего содержания ^{238}U находится в растворенной форме, 37 % в виде грубой взвеси и 8 % в коллоидной форме.

При исследовании водных объектов техногенного происхождения, расположенных на площадках «Опытное поле» и «Телькем», установлено, что содержание ^{238}U в исследованных водах находилось ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения.

Знание характера распределения ^{238}U по формам нахождения в водных экосистемах позволит провести корректную оценку радиоактивного загрязнения водных объектов, а также миграционной способности и биодоступности данного радионуклида. Полученные результаты по формам нахождения ^{238}U в зависимости от степени окисления и размера частиц предоставят дополнительные сведения для выполнения прогнозных оценок радиационной ситуации не только на территории бывшего СИП, но и на предприятиях ядерно-топливного цикла и уранодобывающей отрасли.

Список литературы

1. Radionuclide transport in the «sediments – water – plants» system of the water bodies at the Semipalatinsk test site / A.K. Aidarkhanova, S.N. Lukashenko, N.V. Larionova, V.V. Polevik // Journal of Environmental Radioactivity. 2018. Vol. 184-185. PP. 122-126.

2. Аналитическая химия урана. М.: Издательство Академии наук СССР, 1962. 433 с.

INVESTIGATION OF THE SPECIATION OF ^{238}U IN WATER AS A FACTOR OF RADIOACTIVE POLLUTION OF WATER BODIES OF THE STS TERRITORY

Tleukanova Zh.Ye.^a, Aidarkhanova A.K., Mamyrbayeva A.S., Subbotin S.B.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK,
Beibyt atom st. 2, Kurchatov, Abai region, Republic of Kazakhstan, 071100
e-mail: ^a Zhapasheva_zh@nnc.kz

The paper presents data on the distribution of ^{238}U according to the speciation of presence in the water of water bodies of the territory of the Semipalatinsk test site (STS) depending on the degree of oxidation and particle size. As a result of the data obtained, it was found that in the waters of the studied reservoirs of technogenic origin, the content of ^{238}U was below the detection limit of the used hardware and methodological support. In the studied waters of the "Degelen" site, from 52 % to 94 % of ^{238}U is distributed in the +6 oxidation state, from 51 % to 80 % of this radionuclide is distributed in the dissolved matter.

Keywords: STS, water bodies, ^{238}U , speciation, cascade filtration, oxidation state

УДК 577.3

ПЕРСПЕКТИВЫ БИОБАНКИНГА ОПУХОЛЕВЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ

Хохлова В.А., Безбородова О.Б., Трунова Г.В., Плотникова Е.А., Морозова Н.Б.,
Плютинская А.Д., Воронцова М.С., Венедиктова Ю.В., Немцова Е.Р., Панкратов А.А.,
Шегай П.В.

Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П.А. Герцена - филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125284, г. Москва, 2-й Боткинский пр., д. 3, Российская Федерация
e-mail: mniioi@mail.ru

Рассмотрены перспективы формирования биобанков опухолевых тканей домашних животных с точки зрения внедрения трансляционных исследований как этапа доклинического изучения новых методов лечения в онкологии. Описываются возможные преимущества такого подхода с учетом существующих на сегодняшний день проблем.

Ключевые слова: биобанк, трансляционное исследование, доклинические исследования, моделирование опухолевых заболеваний, иммунотерапия

Биобанки представляют собой специализированные хранилища биологических образцов, таких как ткани, кровь, ДНК, РНК и другие биоматериалы, собранные от пациентов с различными, в том числе онкологическими заболеваниями. Эти образцы хранятся на долгосрочной основе и используются для проведения медицинских исследований. Формирование биобанков имеет множество преимуществ как для экспериментальной, так и для практической медицины: большее количество материала становится доступно для исследования на молекулярном уровне и для тестирования новых методов лечения, расширяется понимание генетических факторов риска и становится возможной разработка персонализированных методов лечения.

В биобанках национальных онкологических центров и НИИ всегда имеется коллекция клеточных

линий опухолевого происхождения и биоматериал, полученный от пациентов. Однако современный мировой опыт показывает, что в структуру биобанка онкологической направленности помимо коллекций биологических образцов, полученных от больных, могут быть включены коллекции биоматериала, полученные из опухолей животных разных видов.

Одно из преимуществ биобанкинга – возможность создания на его основе доклинических моделей заболевания с последующей оценкой эффективности и безопасности методов лечения. Моделирование опухолей человека на грызунах является в настоящее время стандартной техникой в доклинических исследованиях, но хорошо доказано, что такие модели не могут полностью повторить сложность онкологического заболевания у человека. По данным фармкомпаний только 11 % препаратов

онкологического профиля, эффективность которых была продемонстрирована на мышах, были одобрены и зарегистрированы для использования в медицине.

Перспективным направлением, которое позволило бы преодолеть многие недостатки моделирования опухолевых заболеваний на грызунах, являются трансляционные исследования, и, в частности, сравнительные испытания с использованием животных-компаньонов.

Исследования иммунотерапевтических препаратов, все аспекты действия которых невероятно сложно оценить в лабораторных условиях, могут особенно выиграть при включении трансляционного этапа с участием домашних животных. Сейчас, например, разработаны методы, которые позволяют оценить эффективность клеточной терапии с использованием ген-модифицированных Т-клеток, экспрессирующих химерный антигенный рецептор (CAR) у собак с В-клеточной лимфомой [1, 2].

Прогностическая значимость этого подхода заключается в доказанном биологическом сходстве многих спонтанно возникающих опухолевых заболеваний собак и человека. Также спонтанные опухоли собак формируются в иммунокомпетентном организме, где естественным образом развивается резистентность к лечению, приводя к возникновению рецидивов заболевания или инициированию метастазирования.

Молекулярно-генетические исследования, и, в частности, транскриптомный анализ меланомы, остеосаркомы, карциномы легких, Т-и В-клеточной лимфомы собак, показали, что эти опухоли животных-компаньонов имеют большое сходство с «молекулярно-генетическим портретом» соответствующих опухолей человека [3]. При транскриптомном анализе опухолей собак выявляются транскрипты РНК, присутствующие в опухолевых клетках, но отсутствующие в нормальных, гены, которые экспрессируются только в опухолях, и различные соматические мутации. А современные возможности биоинформатики позволяют выявить совпадения с аналогичными опухолями человека. Подобная работа приводит к определению биомаркеров, которые впоследствии могут выступать мишенями для новых таргетных

препаратов применимых и в медицине и в ветеринарии. Другое направление деятельности исследователей – геномное профилирование опухолей собак на больших выборках. Проводится секвенирование генома клетки для выявления мутаций и изучения дифференциальной экспрессии генов.

Объектами для таких исследований являются образцы из коллекций биобанков, а поэтому сегодня такие коллекции приобретают особую важность.

В настоящее время в ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России иницирована программа биобанкирования опухолей животных-компаньонов. Коллекция немногочисленна, потому что прошел небольшой временной интервал с момента начала архивирования, и насчитывает 85 образцов, среди которых 60 – спонтанные опухоли собак разного гистогенеза, 5 – доброкачественные опухоли собак и 19 – спонтанные опухоли кошек.

Пополнение коллекций биобанков и работа с имеющимися образцами требует значительных ресурсов и координации усилий самых разных специалистов. Поэтому на текущем этапе одной из наиболее важных задач является повышение информированности среди профессионального сообщества о целях и задачах биобанкинга.

Список литературы

1. The application of CAR-T cell therapy in hematological malignancies: advantages and challenges / Zhao Zijun, Yu Chen, Ngiambudulu M. Francisco [et al.] // Acta Pharm Sin B. 2018. Vol. 8(4). PP. 539-551 (2018). doi: 10.1016/j.apsb.2018.03.001.

2. Feasibility and safety of RNA-transfected CD20-specific chimeric antigen receptor T cells in dogs with spontaneous B Cell lymphoma / M.K. Panjwani, J.B. Smith, K. Schutsky [et al.] // Mol Ther. 2016. Vol. 24. PP. 1602-14. doi: 10.1038/mt.2016.146.

3. Oh J.H., Cho J.Y. Comparative oncology: overcoming human cancer through companion animal studies // Exp Mol Med. 2023. Vol. 55. PP. 725-734. doi: 10.1038/s12276-023-00977-3.

PROSPECTS FOR BIOBANKING HUMAN AND ANIMAL TUMOR TISSUES

Khokhlova V.A., Bezborodova O.B., Trunova G.V., Plotnikova E.A., Morozova N.B., Plyutinskaya A.D., Vorontsova M.S., Venediktova Yu.V., Nemtsova E.R., Pankratov A.A., Shegai P.V.

*P. Hertsen Moscow Scientific Research Institute of Oncology of the Hertsen Federal Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2nd Botkinsky pr. 3, Moscow, Russian Federation, 125284
e-mail: mnioi@mail.ru*

This report covers the prospects for biobank collections of small animal tumor tissues from the perspective of introducing translational research as a preclinical stage for studying new treatment methods in oncology. The report describes the potential advantages of this approach with respect to current problems and identifies key areas for developing this direction.

Keywords: *biobank, translational research, preclinical studies, cancer modeling, immunotherapy*

Biobanks are storage facilities for patient samples such as tissues, blood, DNA, and RNA, used for medical research. They benefit experimental and practical medicine by enabling molecular research, testing treatments, and developing personalized care. In particular, cancer biobanks store human tumor samples and animal tumor biomaterials for creating preclinical disease models to test treatment methods. However, it is known that mouse models do not fully replicate human cancer, with only 11 % of drugs effective in mice gaining medical approval.

Translational trials with companion animals, such as dogs, offer a promising path to overcome existing obstacles. For example, evaluating complex immunotherapies, such as CAR T-cell therapy, which can be challenging in lab settings.

Translational research with dogs benefits both human and veterinary medicine, as canine tumors closely resemble human ones at the molecular level. Identifying shared biomarkers can lead to new targeted therapies. Another area of research involves genome profiling of canine tumors on large sample sets. Samples from biobank collections are crucial for such research, and worldwide biobanks provide them.

Currently, the Russian Ministry of Health National Medical Research Center for Radiology has initiated a program for biobanking companion animal tumors. The collection is relatively small, with 85 samples archived. Increasing awareness among professionals about biobanking goals and tasks is crucial, as it demands significant resources and coordination efforts.

УДК 502/504

ПОГЛОЩЕНИЕ ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ ПЕРОМ ЛУКА, ВЫРАЩЕННОГО В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Шаврина К.Е.^{1,2,a}, Эдомская М.А.¹, Лукашенко С.Н.¹, Кузьменкова Н.В.³, Шупик А.А.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1, Российская Федерация

² Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация
e-mail: ^a shavrina2000@gmail.com

В вегетационном опыте изучено накопление плутония пером лука, выращенном на дистиллированной воде, питательном растворе Эллиса и дерново-подзолистой почве. Установлено, что коэффициенты накопления изотопов плутония в перьях лука равняются $1,7 \pm 0,4$ для дистиллированной воды; $0,7 \pm 0,2$ для питательного раствора Эллиса; $0,0054 \pm 0,0014$ для дерново-подзолистой почвы.

Ключевые слова: *Pu, перо лука, коэффициент накопления, дерново-подзолистая почва, гидропонный метод выращивания*

Изучение накопления радионуклидов растительностью и факторов, влияющих на их переход в системе «почва-растение» является важным направлением радиоэкологии сельскохозяйственных угодий. Это связано с тем, что содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции определяет их

величину последующего перехода в организм животных и человека.

В настоящее время наиболее активно идут исследования таких изотопов как ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr [1]. Однако в отдаленный период все большее значение приобретают трансурановые элементы, обладающие большим периодом полураспада. Один из таких

элементов – плутоний. Плутоний, как и любой радиоактивный элемент, при попадании в организм человека способен вызвать ряд тяжелых негативных последствий. В частности, α -излучение плутония вызывает изменения клеток внутренних органов и систем [2]. Механизм перехода плутония в системе «почва-почвенный раствор-растение» мало изучен.

Цель работы – исследование перехода $^{239+240}\text{Pu}$ пером лука, выращенным на дистиллированной воде, питательном растворе Эллиса и дерново-подзолистой почве.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования использовалось перо лука-севка сорта «Центурион» (*Allium sera Centurion F1*).

Выращивание лука в почве проводилось в лабораторных условиях на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ. Для эксперимента была выбрана дерново-подзолистая супесчаная окультуренная почва с внесенными удобрениями. Отобранную почву высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 3 мм. В просеянную почву массой 5 кг вносили 1 литр водного раствора ^{239}Pu концентрацией $3,75 \text{ Бк/см}^3$,

приготовленного непосредственно перед внесением путем разбавления стандартного образца. Расчетная концентрация плутония в почве составляла 750 Бк/кг . Почву инкубировали при 60 % влажности от полной влагоемкости в течение 45 суток, периодически перемешивая. После инкубирования проводили контроль содержания плутония в подготовленной почве. Концентрация ^{239}Pu в подготовленной почве по результатам трех измерений составила $780 \pm 100 \text{ Бк/кг}$.

Для выращивания в почве использовались вегетационные сосуды объемом 2 л. В сосуд на поверхность почвы высаживали 30 луковиц. Период вегетации составлял 33 дня. Для подсветки использовалась светодиодная (LED) лампа. После вегетационного периода перо лука срезали ножницами, промывали водопроводной и ополаскивали дистиллированной водой.

Выращивание пера лука гидропонным методом проводили в лабораторных условиях. Для выращивания лука на гидропонике использовались специальные лотки на 2,5 л с крышкой с отверстиями для луковых головок. Дистиллированная вода во время всего периода вегетации имела pH $\sim 7,00$, питательный раствор Эллиса – pH $\sim 5,54$. Питательный раствор Эллиса готовили из солей (табл. 1).

Таблица 1

Масса солей, добавляемых для приготовления питательного раствора Эллиса на 2 л воды

Соль	м, г
Нитрат кальция	2
Сульфат магния	1
Монокалийфосфат	0,6
Сульфат аммония	0,2
Железо лимоннокислое	0,1
Сульфат марганца	0,004
Бура	0,004
Сульфат цинка	0,002
Сульфат меди	0,002

В каждый лоток заливали 2 л воды/раствора Эллиса, вносили 1 см^3 раствора ^{239}Pu активностью $8,3 \text{ кБк}$ и высаживали по 10 луковиц. Период вегетации на гидропонике длился 15 дней, подсветка осуществлялась с помощью лампы с ультрафиолетом. Во время вегетационного периода проводили контроль содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в питательном растворе (рис. 1).

После вегетационного периода перо лука срезали ножницами, промывали в водопроводной воде и ополаскивали в дистиллированной.

Для определения содержания $^{239+240}\text{Pu}$ использовался метод альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением [3].

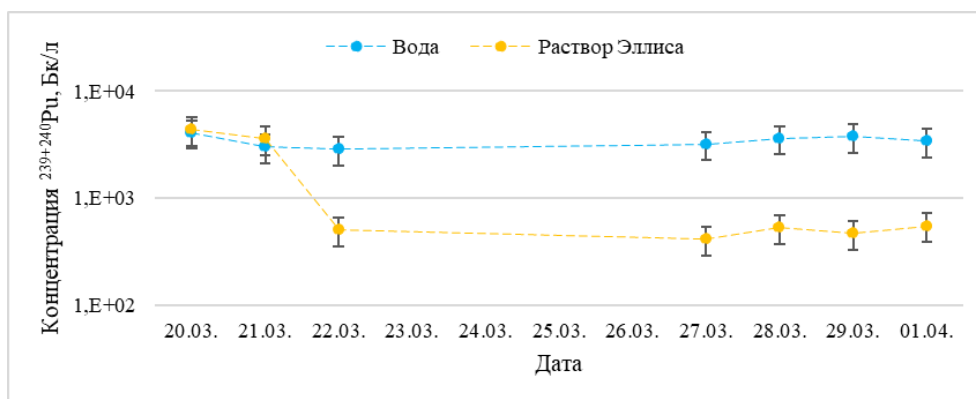


Рисунок 1. Контроль удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ при выращивании лука в дистиллированной воде и питательном растворе Эллиса

Результаты исследования

Как видно из рисунка 1 концентрация плутония в дистиллированной воде была относительно постоянной в течение всего периода вегетации. Среднее значение удельной активности составило 3,4 кБк/л.

Концентрация ^{239}Pu в питательном растворе Эллиса уменьшалась в течение первых 3 дней до относительной стабильной концентрации в 0,49 кБк/л до конца вегетационного периода.

Поскольку при выгонке лука на перо гидропонным методом концентрация плутония в растворах изменялась, коэффициент накопления Pu в гидропонном опыте с использованием в качестве

питательного раствора дистиллированной воды рассчитывался как отношение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в сухой массе растения к средней удельной активности в воде за весь период вегетации. Коэффициент накопления плутония пером лука для вегетационного опыта с использованием раствора Эллиса получен как отношение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в сухой массе растения к средней удельной активности плутония в растворе после стабилизации его концентрации.

В таблице 2 представлены данные по содержанию изотопов плутония в пере лука, выращенном в различных системах.

Таблица 2

Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в пере лука, выращенного на дистиллированной воде, питательном растворе Эллиса и дерново-подзолистой почве

Метод выращивания	Сухая масса образца, г	Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$, Бк/кг
Гидропонный – Дистиллированная вода	3,98	5900±410
Гидропонный – Питательный раствор Эллиса	2,06	330±23
Грунт – Дерново-подзолистая почва	1,66	4,00±0,28

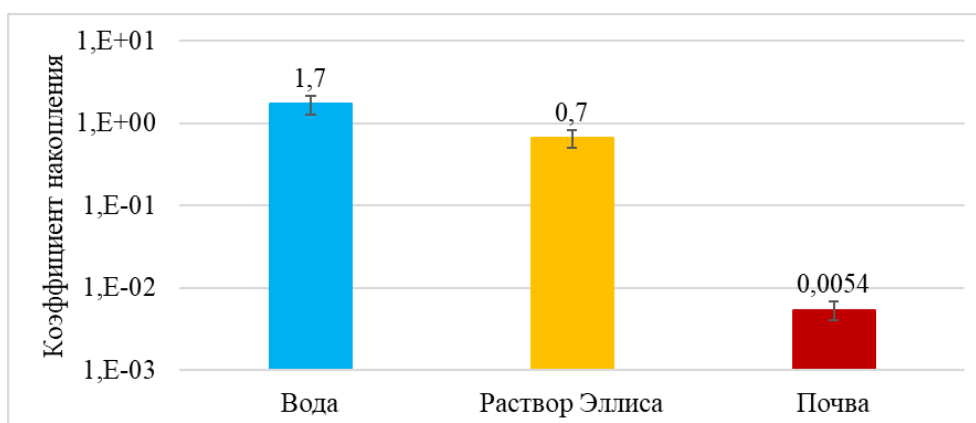


Рисунок 2. Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ пером лука, выращенным на дистиллированной воде, питательном растворе Эллиса и дерново-подзолистой почве

Накопление $^{239+240}\text{Pu}$ пером лука уменьшается в ряду: дистиллированная вода > питательный раствор Эллиса >> дерново-подзолистая почва (рис. 2).

Коэффициент накопления $^{239+240}\text{Pu}$ пером лука, выращенном гидропонным методом с использованием в качестве питательного раствора дистиллированную воду, выше, чем полученный в опытах с использованием раствора Эллиса и дерново-подзолистой почвы в ~2,5 раза и ~300 раз, соответственно.

В почве $^{239+240}\text{Pu}$ может связываться с различными почвенными комплексами и соединениями, закрепляя его, в зависимости от состава и структуры почвенного профиля. Плутоний чаще всего находится в труднорастворимой и органической формах [5] и связывается с труднорастворимыми оксидами, прочно связанными ионами, адсорбированными по типу изоморфного замещения в кристаллических решетках, а также с соединениями, связанными с органической частью почвы [6], что препятствует его поглощению растениями.

Полученные в ходе настоящего исследования значения коэффициента накопления пером лука, выращенном на дерново-подзолистой почве в $5,4 \cdot 10^{-3}$ согласуются со средней величиной коэффициента накопления, полученного в результате многолетних опытов на территории Семипалатинского испытательного полигона, составляющего $2,8 \cdot 10^{-3}$ [4].

В специальных публикациях МАГАТЭ по накоплению радионуклидов растениями значения коэффициентов накопления сгруппированы, что делает затруднительным сравнительный анализ с результатами проведенных экспериментов. Однако, по данным МАГАТЭ коэффициенты накопления плутония для листовых овощей, которые определяются диапазоном от $1,9 \cdot 10^{-4}$ до $2,0 \cdot 10^{-3}$ со средним значением $1,1 \cdot 10^{-3}$ [1], имеют тот же порядок величины.

Выводы

В ходе вегетационных опытов установлено, что переход изотопов плутония из дистиллированной воды в перо лука происходит сильнее, чем из питательного раствора Эллиса и дерново-подзолистой почвы в 2,5 и 300 раз, соответственно.

Список литературы

1. International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: IAEA, 2010.
2. Бекман И.Н. Плутоний. Москва: МГУ, 2010. 166 с.
3. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and Eastern Europe territory / M.A. Edomsкая [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. Vol. 247. P. 106865.
4. Kozhahanov T.E., Lukashenko S.N., Larionova N.V. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol. 137. PP. 217-236.
5. Qiao J., Hou X. Fractionation of plutonium in environmental and bio-shielding concrete samples using dynamic sequential extraction // J. Environ. Radioact. 2010. Vol. 101. № 3. PP. 244-249.
6. Лукашенко, С.Н. Эдомская М.А. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 4. С. 394-424.

ABSORPTION OF PLUTONIUM ISOTOPES WITH A BOW FEATHER

Shavrina K.E.^{1,2,a}, Edomsкая M.A.¹, Lukashenko S.N.¹, Kuzmenkova N.V.³

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039

³ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, Russian Federation, 119991

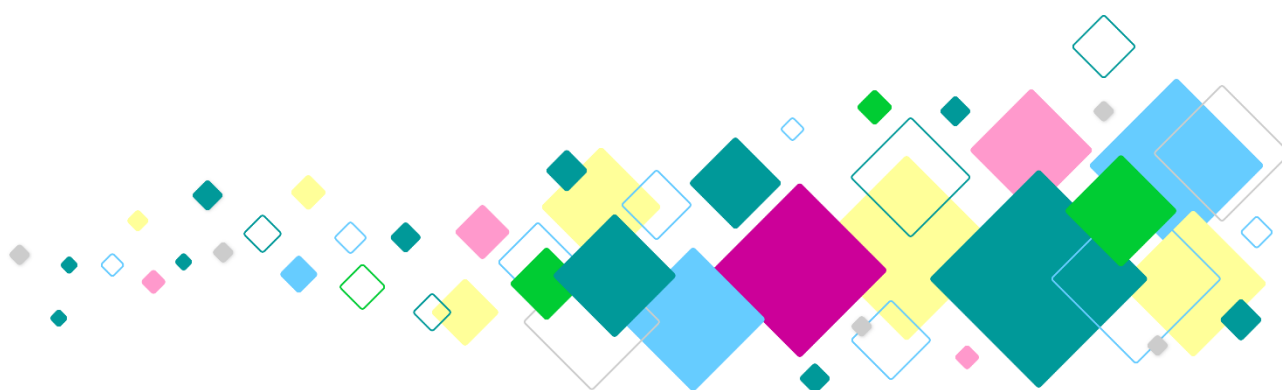
e-mail: ^ashavrina2000@gmail.com

In a vegetative experiment, the accumulation of plutonium in green onion feathers grown on distilled water, Ellis's nutrient solution and soddy-podzolic soil was studied. It has been established that the plutonium transfer factors in green onion feathers are 1.7 ± 0.4 for distilled water; 0.7 ± 0.2 for Ellis's nutrient solution; 0.0054 ± 0.0014 for sod-podzolic soil.

Keywords: Pu, onion feather, accumulation coefficient, sod-podzolic soil, hydroponic cultivation method

ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА

«BIOSKILLS 2023: НАУКА КАК ОБРАЗ ЖИЗНИ»



ИЗУЧЕНИЕ ДЕАНОЛА АЦЕГЛУМАТА, ОБЛАДАЮЩЕГО АНТИОКСИДАНТНЫМИ СВОЙСТВАМИ, В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОЛУЧЕВОГО СРЕДСТВА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

Выпова Е.Р.^{1,а}, Купцова П.С.^{1,2}, Лапенко А.К.¹, Комарова Л.Н.¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация

² Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 249036, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 4, Российская Федерация
e-mail: ^а elena.vypova@yandex.ru

Проведено исследование деанола ацеглумата, потенциально обладающего радиопротекторными свойствами, на нормальных клетках человека при действии гамма-излучения, протонного излучения и ионов ¹²C. Проведен сравнительным анализ радиозащитных свойств деанола ацеглумата с известным радиопротектором цистамином. Показан радиозащитный эффект исследуемого соединения, оцененный по показателю выживаемости клеток и времени удвоения.

Ключевые слова: радиопротекторы, деанола ацеглумат, цистамин, гамма-излучение, протонное излучение, ионы ¹²C, фибробласты, выживаемость, время удвоения

В современном мире источники ионизирующих излучений широко распространены и используются во многих сферах деятельности человека. Расширение контактов с ионизирующим излучением разного качества в технике, промышленности, в медицине, возможность возникновения аварийных ситуаций на объектах атомной энергетики и ядерных силовых установках, и, наконец, планируемые в ближайшем будущем полеты на другие планеты, например, на Марс – все это определяет необходимость иметь в арсенале современной медицины специальные лекарственные средства, радиопротекторы, способные ослаблять последствия радиационных воздействий на организм человека [1]. Отдельную проблему составляет поиск эффективных радиопротекторов для применения в клинической онкологии, которые будут избирательно защищать нормальные ткани. Основным и наиболее эффективным видом лучевой терапии в настоящее время является адронная терапия, а именно терапия ионами ¹²C и протонами [2]. Основными преимуществами тяжелых заряженных частиц перед фотонами являются увеличение вероятности контроля опухоли и уменьшение лучевых нагрузок на здоровые ткани. Однако при имеющихся преимуществах у адронной терапии имеется ряд недостатков. Тяжелые ионы, как и протоны, склонны к фрагментации на осколки. Длина пробега осколков существенно отличается от первичных частиц, что приводит к изменению формы кривой Брэгга. В результате этого появляется выступ за пиком, что приводит к увеличению дозы, поглощаемой тканями,

расположенными за пиком Брэгга. Вторичными частицами протонной терапии в основном являются нейтроны и фотоны, которые вносят наибольший вклад в дозу за пиком Брэгга. При проведении ионной терапии основными источниками, вносящими вклад в дозу от вторичных частиц, являются протоны, ¹¹C, альфа-частицы и ¹¹B.

Плотноионизирующее излучение вызывает акты ионизации непрерывно вдоль трека частицы, порождая двойные разрывы нитей ДНК, которые трудно устранить системе репарации, что может привести к летальному исходу. Ведущую роль в механизме патогенеза лучевого поражения, возникающего в результате действия редкоионизирующего излучения и вторичных частиц плотноионизирующего излучения, играет оксидативный стресс, который сопровождается резким усилением продукции активных форм кислорода, инициацией перекисного окисления липидов и снижением активности антиоксидантной системы [3].

В связи с этим актуальным и перспективным являются исследования соединений, обладающих антиоксидантными свойствами и способных уменьшить негативное действие ионизирующего излучения на организм человека. Перспективным соединением является деанола ацеглумат, известный как малотоксичный ноотропный препарат. По химическому строению препарат схож с естественными метаболитами мозга (γ-аминомасляная кислота, глутаминовая кислота). Имеются данные, свидетельствующие о гепатопротекторной и антиоксидантной активности деанола ацеглумата.

Следовательно, цель работы – изучение возможных радиопротекторных свойств деанола ацеглутата при действии излучения разного качества на фибробласты человека, а также сравнение эффективности деанола ацеглутата с радиозащитным действием известного радиопротектора – цистамина.

Материалы и методы

Объект исследования: клеточные линии: фибробласты hTERT (нормальные клетки соединительной ткани). Культивирование клеток проводилось по стандартной методике [4].

Исследуемое соединение: деанола ацеглутат. Клетки инкубировали с деанола ацеглутатом в концентрации 1000 мкМ в течение 24-х часов, с цистамином в концентрации 0,01 М в течение 30 мин.

Источником гамма-излучения служила уникальная научная установка НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ «ГУР-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{cp} = 1,25$ МэВ). Мощность дозы составила 0,9 Гр/мин. Дозы облучения: 2, 6, 8, 12 Гр.

Облучение на комплексе протонной терапии «Прометеус» (АО «Протом») МРНЦ им. А.Ф. Цыба. Облучение осуществлялось со средней энергией 100 МэВ. Доза облучения составила 2, 6, 8, 12 Гр за пиком Брэгга.

Облучение ионами ^{12}C проводили на каскаде ускорителя «У-70» Института физики высоких энергий. Облучение осуществлялось в водном фантоме со средней энергией 455,8 МэВ/ нуклон. Дозы облучения: 2, 6, 8, 12 Гр.

Эффекты действия ионизирующего излучения на клетки оценивали с помощью расчета времени удвоения и анализа клоногенной активности. Каждая серия опытов повторялась 3-5 раз.

Результаты

В ходе работы было проведено исследование радиозащитных свойств деанола ацеглутата на здоровых клетках человека при действии гамма-излучения, протонного излучения и ионов ^{12}C . Также проведен сравнительный анализ эффективности деанола ацеглутата и известного радиопротектора цистамина.

Показано, что деанола ацеглутат оказывает радиопротекторное действие на фибробласты человека в концентрации 1000 мкМ при действии ионизирующего излучения (^{60}Co) в дозах 2, 6, 8, 12 Гр. При сравнении эффективности деанола ацеглутата известным радиопротектором цистамином было показано, что радиозащитные свойства деанола ацеглутата выше (ФИД = $2,12 \pm 0,21$), чем у цистамина ($1,33 \pm 0,12$). Проявление радиопротекторного действия деанола ацеглутата хорошо объясняется его антиоксидантными свойствами, которые значительно снижают косвенное действие гамма-излучения.

Показано, что водный раствор деанола ацеглутата слабо проявляет радиопротекторные свойства в

отношении нормальных клеток человека при действии протонного излучения за пиком Брэгга в дозах 2, 6, 8, 12 Гр, но при сравнении с радиозащитным действием цистамина, ФИД = $1,08 \pm 0,10$, деанола ацеглутат проявляет больший эффект (ФИД = $1,21 \pm 0,16$). Полученные результаты можно объяснить тем, что основными и наиболее важными вторичными продуктами протонной терапии за пиком Брэгга, которые вносят вклад в дозу, являются нейтроны и фотоны, поэтому деанола ацеглутат слабо защищает нормальные клетки от действия вторичных частиц протонного излучения, так как фотоны имеют косвенный механизм повреждающего действия, а нейтроны прямой.

Показано, что при действии ионов ^{12}C на клетки, инкубированные как с деанола ацеглутатом, так и с цистамином, не наблюдается радиозащитный эффект. ФИД для деанола ацеглутата составил $1,01 \pm 0,12$, для цистамина ФИД = $1,0 \pm 0,09$. Это объясняется высокой ОБЭ ионного излучения, а также его вторичными продуктами, которые имеют прямой механизм повреждающего действия.

Сравнительный анализ результатов действия препаратов с гамма-квантами, протонным излучением и ионами ^{12}C показал существенную зависимость проявления модифицирующих свойств от качества излучения.

Заключение

Деанола ацеглутат проявляет радиозащитный эффект в отношении нормальных клеток человека при действии гамма-квантов, и в меньшей степени при действии вторичных ионов адронной терапии. Возможной причиной возникновения радиопротекторного эффекта деанола ацеглутата является его известная антиоксидантная активность. В частности, антиоксидантное действие направлено на снижение косвенного влияния ионизирующего излучения.

Представляет интерес дальнейшее исследование деанола ацеглутата с целью более глубокого изучения его радиопротекторных свойств. Такие исследования обусловлены необходимостью поиска перспективных препаратов, которые будут использоваться в качестве модификаторов действия ионизирующего излучения на живые организмы.

Список литературы

1. Владимиров В.Г., Красильников И.И. О некоторых итогах и перспективах развития профилактической радиационной фармакологии // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. 2011. Т. 9. № 1. С. 44-50.
2. Particle therapy tumour outcomes: An updated systematic review / E.J. Hwang, P. Gorayski, H. Le [et al.] // Journal of medical imaging and radiation oncology. 2020. Vol. 64(5). PP. 711-724.

3. Seed T.M. Radiation protectants: current status and future prospects // Health Phys. 2005. Vol. 89. № 5. PP. 531-545.

4. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов / А.Ю. Прилепский, А.С. Дроздов, В.А. Богатырев, С.А. Староверов. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. 43 с.

STUDY OF DEANOL ACEGLUMATE, WHICH HAS ANTIOXIDANT PROPERTIES, AS AN ANTI-RADIATION AGENT UNDER THE ACTION OF IONIZING RADIATION IN VITRO

Vypova E.R.^{1,a}, Kuptsova P.S.^{1,2}, Lapenko A.K.¹, Komarova L.N.¹

¹Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039

²A. Cyb Scientific Research Centre of Radiology of the Hertsen Federal Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Koroleva st. 4, Obninsk, Kaluga Region, Russian Federation, 2490036

e-mail: ^aelena.vypova@yandex.ru

Deanol aceglumate, potentially possessing radioprotective properties, was studied on normal human cells under the action of ionizing radiation of different quality. A comparative analysis of the radioprotective properties of deanol aceglumate with cystamine was carried out. The radioprotective effect of the studied compound is shown in terms of survival and cell doubling time.

Keywords: radioprotectors, deanol aceglumate, cystamine, gamma radiation, proton radiation, ¹²C ions, fibroblasts, survival, doubling time

Radioprotective compounds are important for radiation therapy, since normal tissues must be protected from the effects of ionizing radiation of various qualities, as well as from secondary particles formed as a result of the action of dense ionizing radiation. The study of compounds with antioxidant properties is relevant and promising. Such a compound is deanol aceglumate.

The aim of the work is to study the possible radioprotective properties of deanol aceglumate under the action of radiation of different quality on human fibroblasts (hTERT) and compare deanol aceglumate with cystamine.

It has been shown that deanol aceglumate has a radioprotective effect (Dose Modification Factor (DMF = 2.12±0.21) on human fibroblasts when exposed to gamma radiation in doses of 2, 6, 8, 12 Gy. It was also shown that deanol aceglumate weakly has a radioprotective effect (DMF = 1.21±0.16) on normal cells

when irradiated with protons and does not provide radioprotection (DMF = 1.01±0.12) when irradiated with ¹²C ions at doses of 2, 6, 8, 12 Gy. This is due to the fact that secondary particles mainly have a direct mechanism of damaging action. When comparing deanol aceglumate with cystamine, the studied drug showed greater radioprotection and effectiveness. A comparative analysis of the results of the action of drugs with gamma quanta, proton radiation and ¹²C ions showed a significant dependence of the manifestation of modifying properties on the quality of radiation. A possible cause of the radioprotective effect of deanol aceglumate is its known antioxidant activity.

It's of interest to further study deanol aceglumate in order to study its radioprotective properties in more depth. Such studies are conditioned by the need to search for promising drugs that will be used as modifiers of the effect of ionizing radiation on living organisms.

НОВЫЙ ТИП СВЧ-ИСТОЧНИКА НЕТЕПЛОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Горбатов С.А.^а, Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Басырова Д.В., Меджидов И.М., Харламов В.А., Петрухина Д.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация
e-mail: ^аgorbatovsa004@gmail.com

Уникальные применения нетеплой плазмы атмосферного давления (НТАП) связаны с ее огромным потенциалом для низкотемпературной плазмохимии и для обработки термочувствительных материалов, включая полимеры и биологические ткани.

Ключевые слова: СВЧ-источник, СВЧ-разряд, НТАП, СВЧ-генератор, волноводный мост

Новый тип СВЧ-источника НТАП, представленный ранее авторами [3, 4], обладает как характеристиками диэлектрического барьерного разряда (по конфигурации и низкой температуре газа), так и способностью формировать «чистую» плазму. Струю, похожую на классический микроволновый плазменный резак. СВЧ-разряд возбуждается в диэлектрической трубке, проходящей поперек волновода перпендикулярно вектору напряженности электрического поля E . В такой конфигурации две широкие стенки волновода можно рассматривать как электродную систему из двух плоских параллельных электродов, расположенных параллельно оси разрядной трубки, стенки которых играют роль диэлектрического барьера. Такая конфигурация СВЧ-источника НТАП может быть реализована на основе волноводных концентраторов напряженности электромагнитного поля в трех вариантах – резонансный пульт, широкополосный сквозной или с трехдецибелным Н-плоскостным волноводным мостом. На рисунке 1 представлен общий

вид СВЧ-источника НТАП в конфигурации резонансного пульта (слева) и схема его подключения к СВЧ-генератору (справа). Сам такой источник плазмы достаточно прост в изготовлении, но требует использования дорогостоящего циркулятора для защиты магнетрона от отраженной волны. Менее бюджетный и очень простой проходной нерезонансный источник НТАП (рис. 2) не требует для своей работы циркулятор, так как СВЧ-генератор всегда загружается до согласованной нагрузки. Однако при этом ухудшаются условия иницирования и поддержания разряда, а малый размер плазмы приводит к тому, что эффективность ввода СВЧ-мощности, проходящей по волноводу в разряд, очень мала, как следствие, значительная часть его теряется в согласованной нагрузке.

Основная идея третьего варианта конфигурации источника НТАП состоит в замене циркулятора, используемого в консольной конфигурации (рис. 1), на трехдецибелный волноводный мост в Н-плоскости, имеющий подключение через узкую стенку (рис. 3).

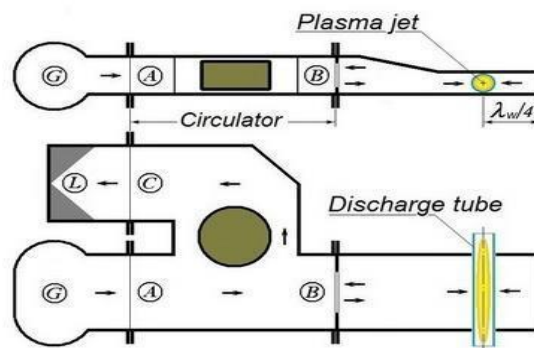


Рисунок 1. СВЧ-источник НТАП в конфигурации резонансной консоли

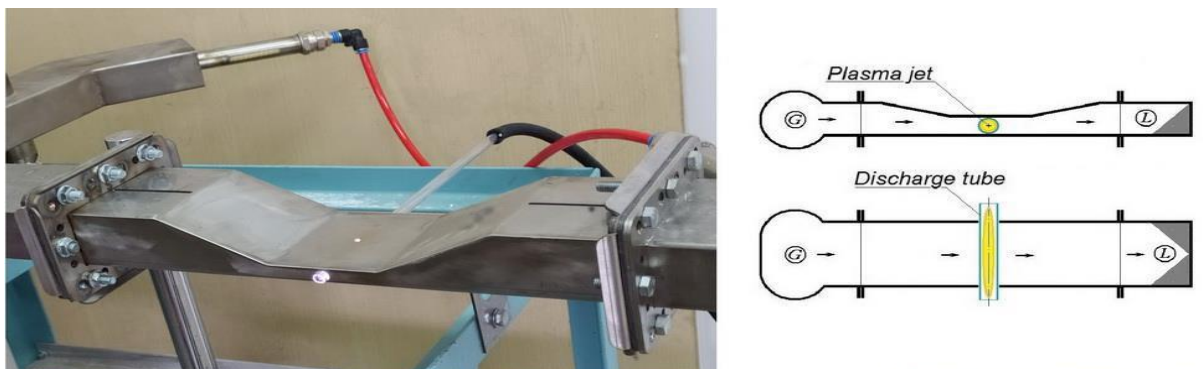


Рисунок 2. Простой проходной нерезонансный источник НТАР

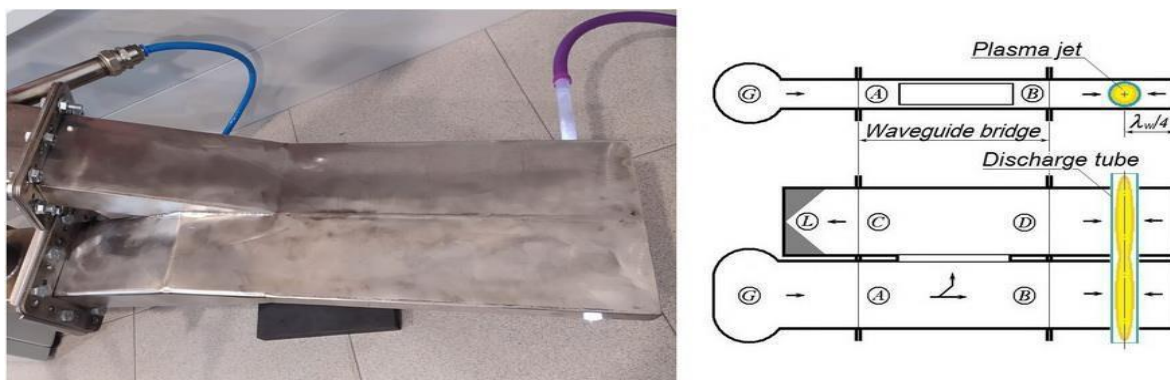


Рисунок 3. СВЧ-источник НТАП на основе трехдецибелового волноводного Н-моста

Уникальное свойство волноводного моста на три децибела состоит в том, что если оба выходных плеча такого моста нагрузить любыми произвольными, но одинаковыми нагрузками, то вся отраженная от них мощность пойдет на четвертое «развязанное» плечо – С моста. Подключив согласованную нагрузку развязанной руке С, мы спасем микроволновый генератор от неприятностей, даже в случае очень значительных отражений.

Конструктивное решение такого источника несколько сложнее двух предыдущих, но в нем нет

необходимости использовать циркулятор. Важно отметить, что в представленном образце СВЧ-источника НТАП высота волноводов в зоне формирования разряда составляет 20 мм по сравнению с 8 и 10 мм в описанных выше Е-концентраторах (рис. 1, 2). Таким образом, площадь поперечного сечения разрядной трубки и формируемой плазменной струи может быть увеличена в четыре раза. Кроме того, мощность, подводимая к Н-мосту и вводимая в СВЧ-разряд, также может быть значительно увеличена.

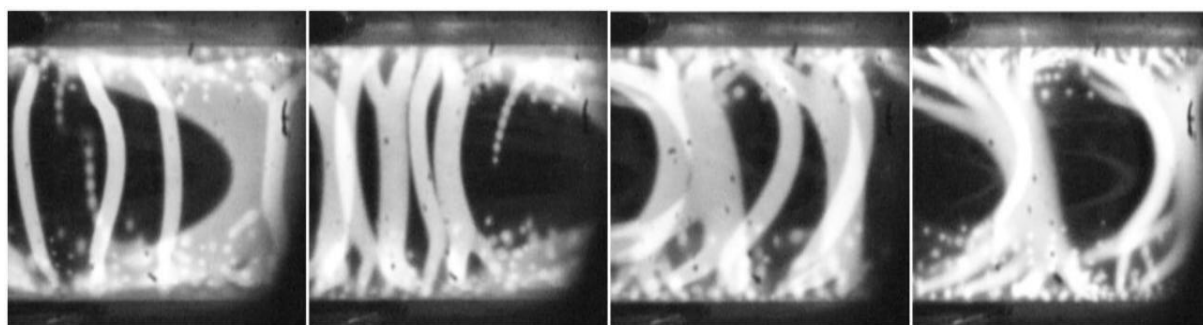


Рисунок 4. Типичные кадры скоростной видеосъемки в середине газоразрядной трубки

Динамика и структура СВЧ-разряда исследовались методом скоростной видеосъемки. Излучение разряда регистрировалось Фантом Миром М110, камера с частотой съемки до 105 кадров в секунду. Разряд внутри трубки состоит из широких светящихся

каналов, движущихся вдоль газового потока со скоростями порядка 50-100 м/с (при расходах газа до 40 л/мин). Каналы имеют вид вертикальных разрядов-столбов, расщепляющихся на нити на верхнем и нижнем концах, которые образуют древовидную

структуру у стенок в верхней и нижней частях трубки и заканчиваются на поверхности трубки множеством ярких микропятен (рис. 4)

Проведены термопарные и тепловизионные измерения профилей температуры струи аргоновой плазмы, формирующейся за выходным отверстием диэлектрической трубки, а также измерения и анализ

спектров ее излучения. При расходе аргона 10 и 20 л/мин длина видимой (светящейся) части плазменной струи составляла около 26 и 21 мм (рис. 5), а температура плазменной струи по центральной оси разрядной трубки на расстоянии 20 мм от стенки волновода составляла 290 °С и 200 °С, соответственно.

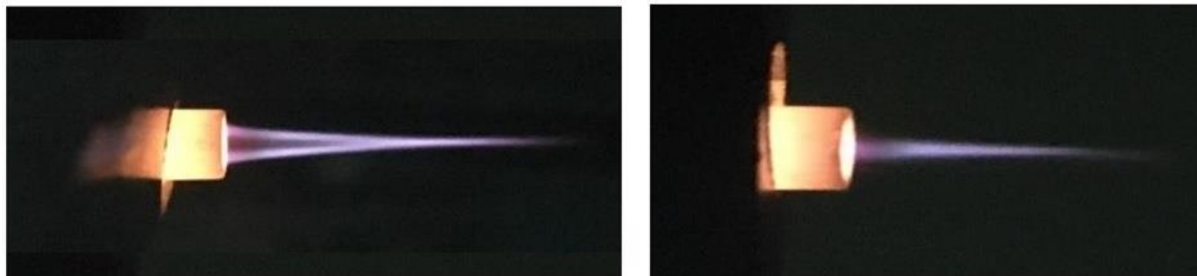


Рисунок 5. Струя аргоновой плазмы на выходе из керамической разрядной трубки

Анализ атомных линий возбужденного аргона в спектрах излучения, полученных в разных зонах разрядного канала, позволил оценить температуру электронов в плазменной струе, которая составила около $0,4 \div 0,5 \text{ эВ}$.

Список литературы

1. Виджай Нехра, Ашок Кумар Х.К. Источники атмосферной нетепловой плазмы Двиведи // Международный инженерный журнал. 2008. Т. 2. Вып. 1. С. 53-68.

2. Мисра Н.Н., Оливер Шлютер, Каллен П.Дж. Холодная плазма в пищевой промышленности и

сельском хозяйстве: основы и применение. Лондон, Великобритания: Academic Press, 2016.

3. Тихонов В.Н., Иванов И.А., Тихонов А.В. Новый тип источника нетепловой плазмы атмосферного давления // Журн. физ.: конф. сер. 1393. 2019. 012062 doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012062

4. Новый тип источника нетепловой плазмы атмосферного давления на основе волноводного моста / В.Н. Тихонов, С.А. Горбатов, И.А. Иванов, А.В. Тихонов // Журн. физ.: конф. сер. 2064. 2021 012131 doi:10.1088/1742-6596/2064/1/012131

A NEW TYPE OF MICROWAVE SOURCE OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA

Gorbatov S.A.^a, Tikhonov A.V., Tikhonov V.N., Ivanov I.A., Basyrova D.V. Medzhidov I.M., Kharlamov V.A., Petrukhina D.V.

*Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute»,
Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: ^agorbatovsa004@gmail.com*

The unique applications of atmospheric pressure non-thermal plasma (NTAP) are related to its great potential for low-temperature plasma chemistry and for processing temperature-sensitive materials, including polymers and biological tissues.

Keywords: *microwave source, microwave discharge, NTAP, microwave generator, waveguide bridge*

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНОГО КАЧЕСТВА: ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА *IN VITRO*

Мельникова А.А.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация
e-mail: angelik_melnikova@mail.ru

Терапия ионами углерода-12 является наиболее эффективным и точным методом лучевой терапии глубоко расположенных и радиорезистентных опухолей. Существенным преимуществом этой терапии является проникновение пучка ускоренных ионов ^{12}C на необходимую глубину с максимальным повреждением опухолевых клеток. В конце цикла ионы углерода испытывают резкое замедление, передавая большую часть энергии поглощенному веществу (пик Брэгга). Таким образом, происходит избирательное воздействие на глубоко расположенную опухоль. Известно, что комбинированное воздействие ионизирующего излучения (ИИ) и лекарственных противоопухолевых препаратов повышает радиочувствительность опухолевых клеток. В результате актуально исследовать комбинированное действие ионизирующего излучения и противоопухолевых средств. Благодаря широкому спектру действия против многих типов опухолей мы выбрали доксорубицин в качестве химиотерапевтического препарата.

Ключевые слова: ионы углерода, гамма-излучение, доксорубицин, синергизм, клеточные линии, фибробласты человека, рак молочной железы, MCF-7

Введение

Наиболее распространенным видом онкологии считается рак молочной железы. При лечении онкологических заболеваний принимаются во внимание молекулярно-биологические характеристики опухоли [1]. В частности, рак молочной железы подразделяется на подтипы (люминальный А и В, тройной негативный, HER2-положительный нелюминальный) в соответствии с экспрессией в опухоли рецепторов эстрогенов, HER2, прогестерона, также учитывается пролиферативная активность опухоли [2]. В клинической практике возникают случаи, когда использование таргетной терапии и эндокринотерапии невозможно. Такая ситуация складывается при тройном негативном раке молочной железы, когда опухолевые клетки не экспрессируют рецепторы эстрогенов, прогестерона, HER2.

Цель работы – выявление закономерностей комбинированного действия ионизирующего излучения разного качества и доксорубицина на опухолевые и неопухолевые клетки человека. Объектами исследования являлись клеточные линии: MCF-7 (аденокарцинома протоков молочной железы человека), hTERT (теломеризованные фибробласты 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.

Материалы и методы

Культивирование клеточных линий осуществлялось по стандартной методике в виде монослоя в полной питательной среде DMEM. Клетки инкубировали с препаратом доксорубицин в дозе 0,004 мг/мл [3, 4] в течение 24 ч, затем облучали.

Облучение ионами ^{12}C проводили на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий ФГБУ ГНЦ РФ «Курчатовский институт» 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. Доза облучения опухолевых клеточных линий в пике Брэгга составила 1, 2, 4 Гр. Для оценки ОБЭ клеточную суспензию облучали гамма-излучением. Источником стандартного излучения служила гамма-установка радиационного облучения «ГУР-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{\text{cp}} = 1,25$ МэВ). Мощность дозы – 0,9 Гр/мин. Дозы облучения: 1, 2, 4, 6 Гр. Отмечаем, что доза облучения в 6 Гр была выбрана дополнительно в виду особенностей редкоионизирующего излучения. Пострадиационное культивирование клеток включало проведение клоногенного анализа, времени удвоения, МТТ-теста.

Схема эксперимента представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема эксперимента

Результаты

На начальном этапе исследования была проведена сравнительная оценка выживаемости клеточных линий после действия на них ионизирующего излучения разного качества. Показатель ОБЭ ионного излучения ^{12}C для клеточной линии MCF-7 согласно формуле (1) составил $1,7 \pm 0,1$; для линии hTERT – $2,8 \pm 0,2$.

На рисунке 2 приведены экспериментально полученные кривые выживаемости клеток MCF-7 после комбинированного действия ионизирующего излучения и доксорубицина. Кривая 1 на этих рисунках характеризует выживаемость клеток после действия одного ионизирующего излучения, точка 2 – действие только доксорубицина, кривая 3 – теоретическая кривая, ожидаемая при независимом сложении эффектов от ионизирующего излучения и препарата

доксорубицина, кривая 4 – выживаемость клеток после комбинированного действия ионизирующего излучения и химиопрепарата.

В случае комбинированного действия ионов углерода при максимальной дозе 4 Гр и доксорубицина наблюдается существенное снижение выживаемости. Минимальный показатель выживаемости наблюдается при комбинированном действии ионов ^{12}C в дозе 4 Гр и доксорубицина и составляет 7 %.

Далее проводилась оценка изменения времени удвоения после воздействия ионизирующего излучения, доксорубицина, а также их комбинации. Результаты представлены на рисунке 3.

Обработка результатов МТТ-теста проводилась с использованием программного обеспечения RStudio. Для проведения МТТ-теста и определения цитотоксичности препарата необходимая концентрация клеток должна составлять 10 тыс. на лунку (рис. 4).

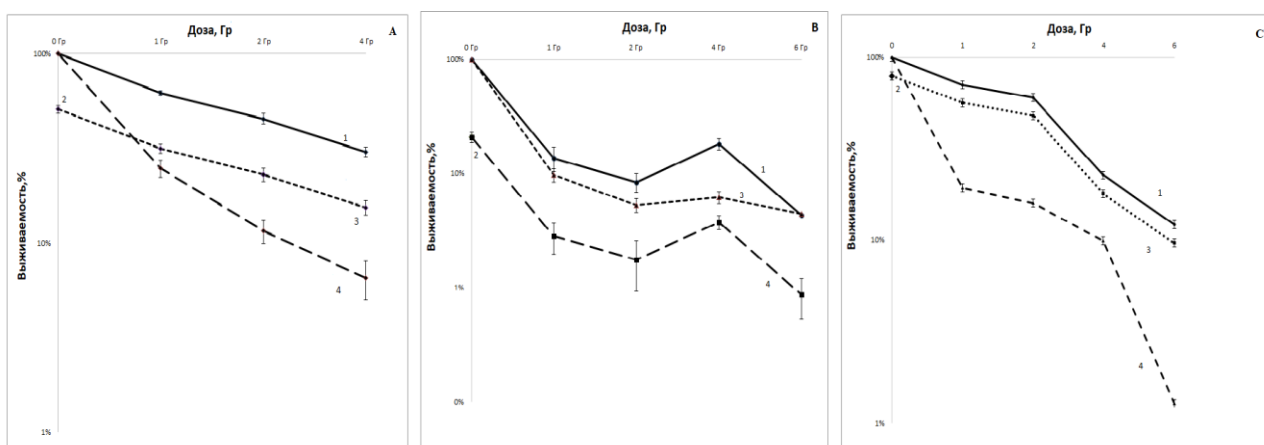


Рисунок 2. Зависимость выживаемости клеток MCF-7 от дозы ИИ:
А – ионы углерода, **В** – гамма-излучение (результаты после процедуры облучения),
С – гамма-излучение (результаты через 12 суток после облучения)

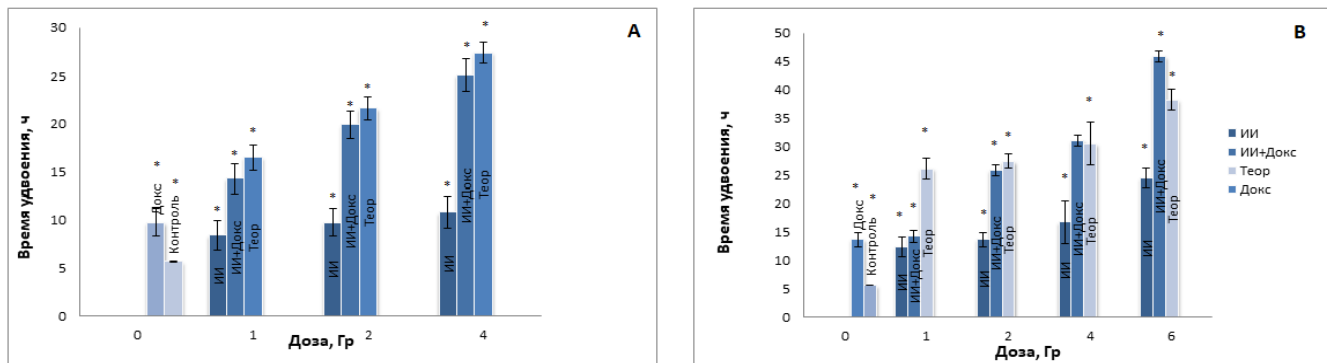


Рисунок 3. Зависимость времени удвоения MCF-7 от дозы облучения:
А – ионы углерода, **В** – гамма-излучение

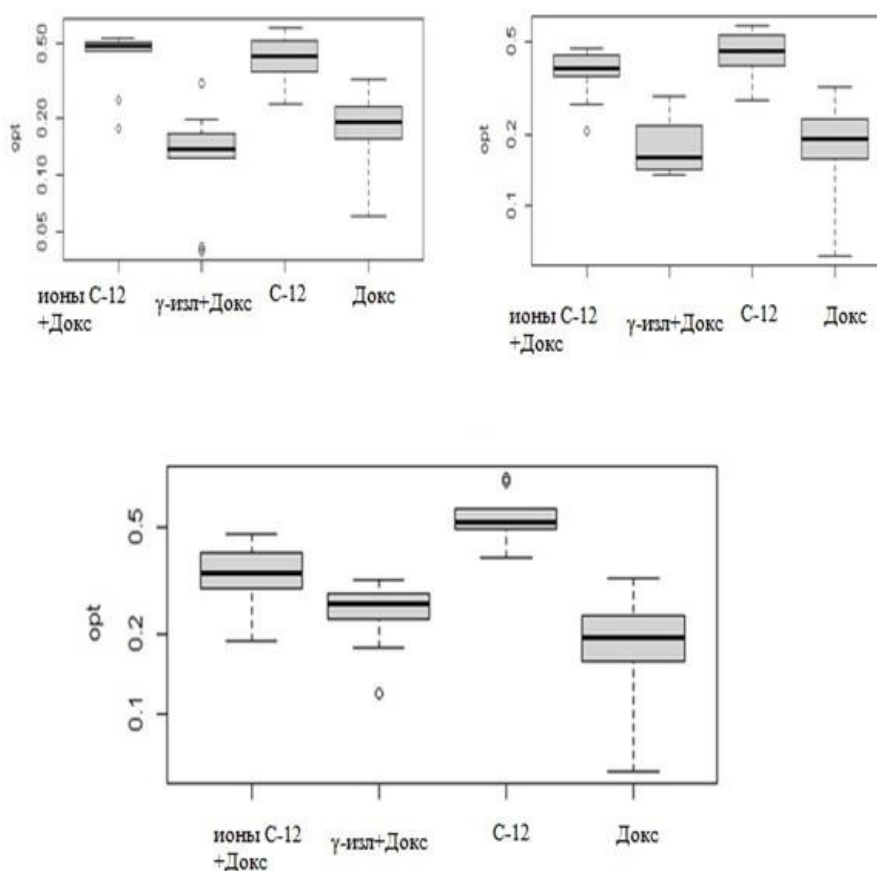


Рисунок 4. Сравнение оптической плотности линии клеток MCF-7 при воздействии различных типов излучения и доксорубина

Заключение

Выявление закономерностей синергического взаимодействия ионизирующего излучения и химиопрепаратов остается нерешенной и актуальной темой в клинической практике. В рамках экспериментальной работы выявлены некоторые закономерности синергического взаимодействия высоко- и низкоионизирующего излучения с доксорубином на культурах опухолевых клеток человека.

Максимальное синергическое взаимодействие наблюдается при равном соотношении повреждающих, индуцированных каждым фактором.

Список литературы

1. Hypoxia increases membrane metallo-endopeptidase expression in a novel lung cancer ex vivo model – role of tumor stroma cells / K. Leithner [et al.] // BMC Cancer. 2014. Vol. 14. P.40.

2. Perou C.M. Molecular portraits of human breast tumours // *Eisen Nature*. 2000. Vol. 406. PP. 747-52.

3. Алясова А.В. Влияние озона и доксорубина на жизнеспособность и морфологию злокачественных клеток печени // *Современные технологии в медицине*. 2016. №8 (2). С.84-89.

4. Бакина О.В. Синергетический эффект противоопухолевой активности доксорубина и бикомпонентных наноструктур на основе оксида алюминия // *Сибирский онкологический журнал*. 2020. № 19(2). С. 82-89.

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION OF DIFFERENT QUALITY: MAIN RESULTS OF IN VITRO ANALYSIS

Melnikova A.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039

e-mail: angelik_melnikova@mail.ru

Carbon-12 ion therapy is the most effective and accurate method of radiation therapy for deeply located and radioresistant tumors. A significant advantage of this therapy is the penetration of a beam of accelerated ¹²C ions to the required depth with maximum damage to tumor cells. At the end of the cycle, carbon ions experience a sharp slowdown, transferring most of the energy to the absorbed substance (Bragg peak). Thus, there is a selective effect on a deeply located tumor. It is known that the combined effect of ionizing radiation (II) and medicinal antitumor drugs increases the radiosensitivity of tumor cells. As a result, it is relevant to investigate the combined effect of ionizing radiation and antitumor agents. Due to the wide spectrum of action against many types of tumors, we chose doxorubicin as a chemotherapeutic drug.

Keywords: *carbon ions, gamma radiation, doxorubicin, synergism, cell lines, human fibroblasts, breast cancer, MCF-7*

The aim of the work is to identify the patterns of the combined effect of ionizing radiation of different quality and doxorubicin on human tumor and non-tumor cells. The objects of the study were cell lines: MCF-7 (human mammary duct adenocarcinoma), hTERT (human telomerase-positive fibroblasts).

In the course of the study, new results were obtained on the manifestation of the synergistic and antagonistic nature of the agents used on the cells of tumor lines, which is of great practical and theoretical importance for understanding the mechanism of the combined effects of ionizing radiation and the chemotherapy drug doxorubicin.

УДК 543-4

РЕЦЕПТУРА НОВОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КОКТЕЙЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ

Михайлов А.В.^{1,2,а}, Лукашенко С.Н.¹, Эдомская М.А.¹, Томсон А.В.¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1, Российская Федерация*

² *Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1, Российская Федерация*

e-mail: ^а mikhajlovav@oiate.ru

Жидкосцинтилляционная спектрометрия – один из основных методов анализа проб, содержащих тритий. Основным производителем жидкосцинтилляционных коктейлей, необходимых для анализа на рынке России и стран СНГ, была фирма PerkinElmer. На данный момент импорт продуктов данного производителя на территорию России невозможен. Разработанная рецептура жидкосцинтилляционного коктейля «ЛИРА 1» наиболее применима для определения трития в водных растворах и по техническим характеристикам сравнима с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: жидкосцинтилляционный коктейль, жидкосцинтилляционная спектрометрия, тритий, импортозамещение

Жидкосцинтилляционная спектрометрия – один из основных методов анализа проб, содержащих тритий. Это обусловлено ее способностью регистрировать низкоэнергетическое β -излучение с высокой эффективностью.

До определенного времени основным производителем жидкосцинтилляционных коктейлей (далее – ЖСК), необходимых для ее реализации на рынке России и стран СНГ, была фирма PerkinElmer, которая производила линейку ЖСК, в которую входят такие марки, как «Ultima Gold», «PermaFluor», «Flo-Scint» [1]. На данный момент импорт подобных продуктов невозможен.

В Советском Союзе производился ряд ЖСК для определения трития серии «ЖС», таких как «ЖС-6», «ЖС-8», «ЖС-20», «ЖС-1» и т.д. [2]. В настоящий момент эти коктейли не производятся.

Цель исследования – разработать рецептуру нового сцинтилляционного коктейля для определения трития на основе реактивов, выпускаемых Российской промышленностью.

Для разработки рецептуры была проведена серия экспериментов с использованием ксилола, толуола в качестве растворителя; бутилгликоля в качестве дополнительного растворителя; неолола в качестве поверхностно активного вещества; нафталина и терфенила, PPO и PPOP в качестве сцинтилляторов. Проведена серия экспериментов по:

– исследованию сцинтилляционных характеристик и величины аналитического сигнала при определении трития с использованием ЖСК на основе ксилола, бутилгликоля и неолола в зависимости от соотношения БГ/ксилол;

– исследованию сцинтилляционных характеристик и величины аналитического сигнала при определении трития с использованием ЖСК на основе ксилола, бутилгликоля и неолола в зависимости от количества PPO;

– исследованию сцинтилляционных характеристик и величины аналитического сигнала при определении трития с использованием ЖСК на основе ксилола, бутилгликоля и неолола в зависимости от количества PPO;

– исследованию сцинтилляционных характеристик и величины аналитического сигнала при определении трития с использованием ЖСК на основе ксилола, бутилгликоля и неолола в зависимости от количества нафталина;

– исследованию сцинтилляционных характеристик и величины аналитического сигнала при определении трития с использованием ЖСК на основе ксилола, бутилгликоля и неолола в зависимости от количества PPOP.

Для оценки качества полученной рецептуры проведена сравнительная оценка характеристик разработанной рецептуры (далее – «ЛИРА 1») и коктейлей серии «ЖС». Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка характеристик коктейля «ЛИРА 1» и коктейлей серии «ЖС»

Название ЖСК	Предельное соотношение растворяющейся в ЖСК воды к объему коктейля	Количество полезных импульсов на 1 Бк трития	Наличие линейной зависимости сигнала от объема добавляемой пробы
«ЖС-6»	< 1:100	1,00	Нет
«ЖС-8»	15:100	17,6	Да
«ЖС-1»	< 1:100	1,10	Нет
«ЛИРА 1»	> 100:100	10,8	Да

В результате анализа коктейлей серий «ЖС-6» и «ЖС-1» выявлено, что смешиваемость данных ЖСК с водной пробой крайне низка, а также отсутствует линейная зависимость сигнала от объема добавляемой пробы, что говорит о неприемлемости использования этих коктейлей при анализе водных растворов.

Анализ коктейлей серий «ЖС-8» и «ЛИРА 1» показал наличие линейной зависимости сигнала от объема добавляемой пробы и хорошее соотношение «Сигнал – Фон». При этом чувствительность коктейля серии «ЖС-8» в 1,6 раза выше чувствительности коктейля серии «ЛИРА 1» при малом соотношении «Проба – ЖСК», однако он ограниченно смешивается с водой (не более 1,5 мл пробы к 10 мл коктейля), что

затрудняет его практическое применение. В свою очередь предел смешиваемости коктейля серии «ЛИРА 1» больше 10 мл пробы к 10 мл коктейля.

Таким образом, по совокупности характеристик разработанная рецептура «ЛИРА 1» наиболее применима для определения трития в водных растворах.

Разработанный коктейль имеет следующий состав (в объемных %):

- ксилол – 40-55;
- бутилгликоль – 10-20;
- неолол – 20-50;
- нафталин – 0,5-2,5;
- PPO (2,5-дифенилоксазол) – 0,005-5;

– РОРОР (1,4-ди-(2-(5-фенил-оксазолил))-бензол) – 0,005-0,1

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда №23-24-00165.

Список литературы

1. Products & Services // PerkinElmer URL: <https://www.perkinelmer.com/> (дата обращения: 14.03.2023).

2. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. Л: Химия, 1971.

COMPOSITION OF A NEW SCINTILLATION COCKTAIL FOR TRITIUM DETERMINATION

Mikhailov A.V.^{1,2,a}, Lukashenko S.N.¹, Edomskaya M.A.¹, Tomson A.V.¹

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute» Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039
e-mail: ^a mikhajlovav@iate.ru

Liquid scintillation spectrometry is one of the main methods for analyzing samples containing tritium. The main manufacturer of liquid scintillation cocktails required for analysis on the Russian and CIS markets was PerkinElmer. At the moment, it is not possible to import products from this manufacturer into Russia. The developed composition of the liquid scintillation cocktail "LIRA 1" is most applicable for the determination of tritium in aqueous solutions its characteristics are comparable to foreign analogues.

Ключевые слова: *liquid scintillation cocktail, liquid scintillation spectrometry, tritium, import substitution*

УДК 502/504

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПЛОДОВЫХ ТЕЛАХ ВЫСШИХ ГРИБОВ Г. ОБНИНСК

Сидоренко Е.А.^{1,a}, Шаврина К.Е.², Братухин Н.О.², Саруханов А.В.², Эдомская М.А.², Сироткина Г.М.¹

¹ Муниципальное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 5 г. Балабаново», 249000, Калужская обл., Боровский р-н, г. Балабаново, ул. Гагарина, д. 43, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1, Российская Федерация

e-mail: ^a egorland@list.ru

Проведен анализ содержания тяжелых металлов в грибах, собранных на территории города Обнинска. Результаты исследования свидетельствуют, что концентрация тяжелых металлов в отобранных образцах сопоставима со средними значениями концентраций данных элементов в грибах. Результат анализа канцерогенных и неканцерогенных рисков свидетельствует, что опасности употребления грибов, произрастающих в городе Обнинск, нет.

Ключевые слова: *загрязнение, тяжелые металлы, дикорастущие грибы, риск*

Введение

В настоящее время проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ) актуальна для многих стран, в том числе и России. Город Обнинск, расположенный в Калужской области Российской Федерации, оказывается под воздействием

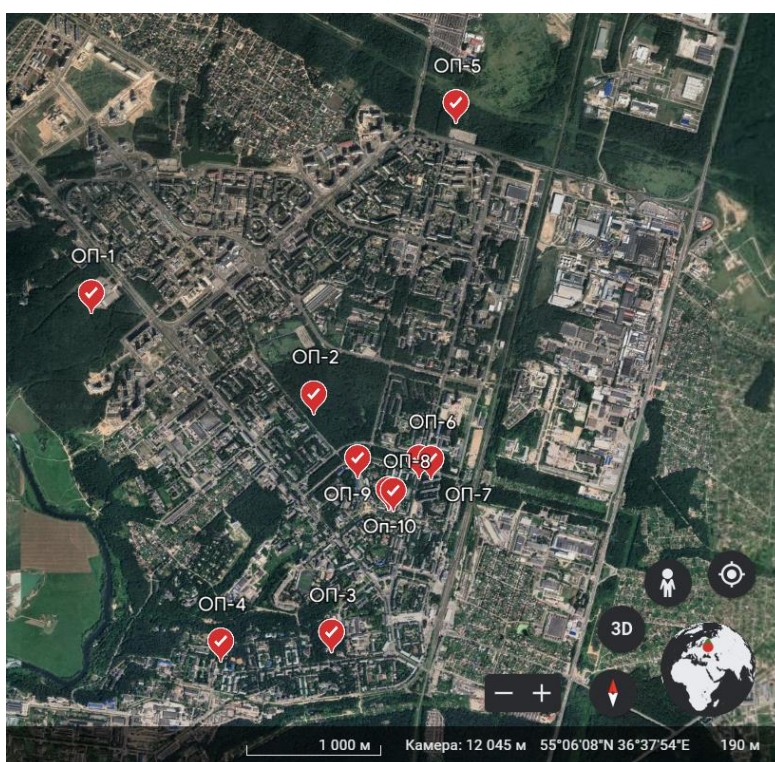
различных источников загрязнения, таких как транспорт и промышленность, включая предприятия химического производства и атомной отрасли. Поэтому анализ содержания ТМ в объектах окружающей среды города Обнинска имеет важное значение для понимания уровня экологического риска и его воздействия на здоровье человека.

Грибы, будучи биологическими организмами, способны аккумулировать тяжелые металлы из окружающей среды. Из биологических объектов в качестве индикаторов накопления тяжелых металлов наиболее известны лишайники (Pb, Cu, Ni), мхи (Mn, Cd, Pb, Zn). Грибы в большей степени изучены как биоиндикаторы накопления радионуклидов, однако, микологи утверждают, что индикаторные способности грибов не уступают лишайникам [1]. Следует отметить, что помимо роли биоиндикаторов, грибы активно используются в пищу. При этом качество дикорастущих грибов, собранных в окрестностях городов, определяется лишь органолептически [2].

Цель настоящей работы – изучить содержание тяжелых металлов в плодовых телах высших грибов, собранных в г. Обнинск, и дать оценку потенциальных рисков, связанных с употреблением этих грибов в пищу.

Материалы и методы исследования

Отбор образцов плодовых тел высших грибов проводили в 2023 г. Места пробоотбора представлены на рисунке 1.



№ пп	Точка отбора	Координаты	Гриб
1	ОП-1	55,113567-36,5778485	Валуй (<i>Russula foetens</i>)
2	ОП-2	55,1059587-36,6048113	Шампиньон (<i>Agaricus</i>)
3	ОП-3	55,0904826-36,6051687	Валуй (<i>Russula foetens</i>)
4	ОП-4	55,089364-36,5932228	Моховик (<i>Xerocomus</i>)
5	ОП-5	55,1251723-36,6209269	Валуй (<i>Russula foetens</i>)
6	ОП-6	55,01028-36,616574	Моховик (<i>Xerocomus</i>)
7	ОП-7	55,1019591-36,6168701	Свинушка (<i>Paxillus</i>)
8	ОП-8	55,1019857-36,6094353	Шампиньон (<i>Agaricus</i>)
9	ОП-9	55,0996793-36,6122686	Моховик (<i>Xerocomus</i>)
10	ОП-10	55,0996794-36,6122686	Шампиньон (<i>Agaricus</i>)

Рисунок 1. Точки отбора образцов

В работе проведен анализ содержания тяжелых металлов Zn, Mn, V, Cr, Co, Cd, Pb, Cu, Fe, а также таких элементов, как K, Ca, Na, Mg в образцах грибов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Liberty Ax Series II. Кислотную минерализацию образцов

осуществляли с помощью системы микроволнового разложения RayKol XT-9930.

Расчет канцерогенных и неканцерогенных рисков производился по «Руководству по оценке риска для здоровья населения при воздействии

химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04».

Результаты и обсуждение

Результаты анализа содержания тяжелых металлов и макроэлементов в плодовых телах высших грибов (на сухой вес) представлены на рисунке 2, соответственно. На диаграммах также отражена ПДК элементов [3] в перерасчете на сухой вес, исходя из среднего содержания влаги в грибах (90 %).

Для большинства исследованных образцов, концентрация ТМ сопоставима с опубликованными значениями в литературных источниках, однако для некоторых отдельных элементов содержание в грибах превышает средние значения опубликованных данных. Например, в образце ОП-9 (маховик), собранного на ул. Победа, концентрация кобальта незначительно превышает среднее значение в 0,41 мг/кг, составляя 0,56 мг/кг.

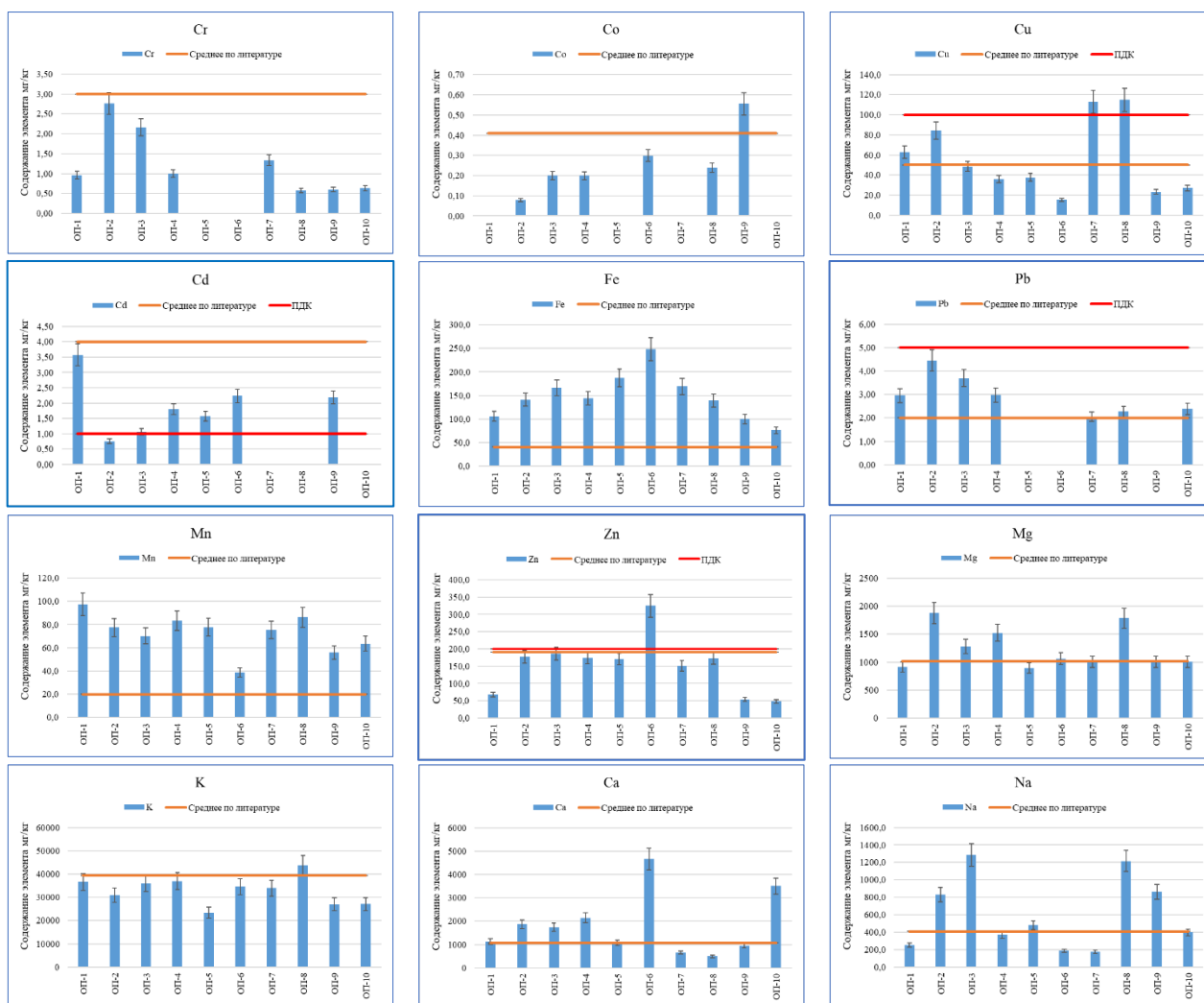


Рисунок 2. Содержание тяжелых металлов и макроэлементов в плодовых телах высших грибов г. Обнинск

Превышение меди по отношению к средним значениям литературных данных фиксируется для трех образцов. При этом в двух образцах (ОП-7 (свинушка, собранная на ул. Курчатова) и ОП-8 (шампиньон, собранный на ул. Жукова)) концентрация меди находится на уровне ПДК данного элемента.

Содержание кадмия в исследуемых образцах грибов существенно ниже средних значений опубликованных данных. Обобщенные литературные данные, представленные в [4], свидетельствуют, что содержание кадмия в плодовых телах большинства видов съедобных грибов, собранных в незагрязненных

районах, варьирует в пределах 0,1-5,0 мг/кг сухого веса. Тем не менее, несмотря на более низкие концентрации в образцах грибов, полученные в ходе анализа, данные величины в пяти образцах превышают установленную ПДК.

Более высокие концентрации во всех отобранных образцах по сравнению со средними значениями литературных данных наблюдаются для железа и марганца. Кроме того, в образце ОП-6 (моховик, ул. Курчатова) фиксируется более высокое содержание цинка, чем его средние концентрации,

представленные в литературных данных, которые совпадают со значением ПДК данного элемента.

Таким образом, можно сделать вывод, что в грибах г. Обнинск в сравнении со средними концентрациями рассмотренных элементов в грибах фиксируется превышение содержания железа и марганца. А также, несмотря на более низкие значения концентраций кадмия в исследуемых образцах по сравнению со средними значениями опубликованных данных, данные величины превышают установленную ПДК.

Для анализа безопасности употребления грибов, произрастающих на территории г. Обнинск, проведена оценка канцерогенного и неканцерогенных рисков. Данную оценку проводили исходя из расчета, что средний россиянин потребляет до 4 кг грибов в год [5].

Расчетные данные свидетельствуют, что суммарный уровень канцерогенного и неканцерогенного риска ниже 1 для всех точек отбора проб грибов. Следовательно опасности при употреблении человеком грибов произрастающих в городе Обнинск в качестве пищи нет.

Заключение

В ходе исследования оценено содержание тяжелых металлов в плодовых телах высших грибов, собранных в г. Обнинск. Установлено, что для большинства исследованных образцов, концентрация ТМ сопоставима с опубликованными значениями в литературных источниках. Однако в грибах г. Обнинск в сравнении со средними концентрациями рассмотренных элементов в грибах фиксируется превышение содержания железа и марганца. А также, несмотря на более низкие значения концентраций кадмия в исследуемых образцах по сравнению со средними значениями опубликованных данных, данные величины превышают установленную ПДК.

Результат анализа канцерогенных и неканцерогенных рисков свидетельствует, что опасности

употребления грибов, произрастающих в городе Обнинск, нет.

Список литературы

1. Горбунова И.А. Тяжелые металлы и радионуклиды в плодовых телах макромицетов в Республике Алтай // Сибирский экологический журнал. 1999. № 3. С. 277-280.

2. Красников А.В., Селихова В.С., Красникова Е.С. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культивируемыми грибами (обзор) // Инновации и продовольственная безопасность. 2021. № 1(31). С. 61-66. DOI 10.31677/2072-6724-2021-31-1-61-66.

3. Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов. М.: Изд-во стандартов, 1990. 185 с.

4. Сазанова К.В., Великова В.Д., Столярова Н.В. Накопление тяжелых металлов грибами. Экологическая и видовая специфичность, механизмы аккумуляции, потенциальная опасность для человека // Medline.ru. Российский биомедицинский журнал. 2017. Т. 18. № 2. С. 336-361.

5. Меняется темп жизни – не каждый пойдет в лес за грибами // Рыночный расклад, Весь мир. 2019. URL:

[https://plus.rbc.ru/news/5d5e3bed7a8aa9272e4f9c3d#:~:text=%D0%92%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8%20%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B8%D1%80%D1%83%D0%B5%D0%BC%D1%8B%D1%85,\(%D0%B4%D0%BE%20%2C5%20%D0%BA%D0%B3%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0](https://plus.rbc.ru/news/5d5e3bed7a8aa9272e4f9c3d#:~:text=%D0%92%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8%20%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BA%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B8%D1%80%D1%83%D0%B5%D0%BC%D1%8B%D1%85,(%D0%B4%D0%BE%20%2C5%20%D0%BA%D0%B3%20%D0%BD%D0%B0%20%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0) (дата обращения: 08.09.2023).

THE CONTENT OF HEAVY METALS IN THE FRUIT BODIES OF HIGHER FUNGI OBNINSK

Sidorenko E.A.^{1,a}, Shavrina K.E.², Bratukhin N.O.², Sarukhanov A.V.², Edomsкая M.A.², Sirotkina G.M.¹

¹ Municipal Educational Institution "Secondary school № 5, Balabanovo", Gagarina st. 43, Balabanovo, Kaluga region, Borovsky district, Russian Federation, 249000

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

e-mail: ^aegorland@list.ru

An analysis of heavy metals content in mushrooms collected in the Obninsk was carried out. The results of the study indicate that the concentration of heavy metals in the selected samples is comparable to the average concentrations of

these elements in mushrooms. The result of the analysis of carcinogenic and non-carcinogenic risks indicates that there is no danger from consuming mushrooms growing in the city of Obninsk.

Keywords: *pollution, heavy metals, mushrooms, risk*

УДК 577.15

ПЛАЗМИД-ОПОСРЕДОВАННАЯ ПЕРЕДАЧА ФЕНОТИПА ПРОДУЦЕНТА БЕТА-ЛАКТАМАЗ РАСШИРЕННОГО СПЕКТРА В КОМПЕТЕНТНЫЕ КЛЕТКИ *E. COLI* DH5 α

Степанова Е.А.^{1,3}, Седракян А.М.², Акопян Ш.С.², Рассказова М.М.³

¹ Школа молекулярной и теоретической биологии

² Институт молекулярной биологии Национальной Академии Наук Республики Армения, 0014, г. Ереван, ул. Эзрас Асратян, д. 7, Республика Армения

³ Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 11 им. Подольских курсантов» г. Обнинска, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Комарова, д. 10, Российская Федерация
e-mail: stepanovaevgenya111@mail.ru

Данная работа посвящена оценке способности плазмид, несущих ген bla_{CTX-M-5}, кодирующий β -лактамазу расширенного спектра, проникать в бактериальные клетки, формируя у них устойчивость к ряду β -лактамных антибиотиков.

Ключевые слова: *сальмонеллез, антибиотикорезистентность, β -лактамазы расширенного спектра, β -лактамные антибиотики, бактериальная трансформация*

В настоящее время сальмонеллез продолжает оставаться актуальной проблемой здравоохранения, порождающей беспокойство во всем мире. Например, в Армении это самая распространенная бактериальная инфекция пищевого происхождения [1]. В России по данным Роспотребнадзора в 2022 году зафиксировано около 16 тысяч случаев заражения сальмонеллезом [4], в 2023 с января по май заболеваемость выросла на 39 % [5]. Поэтому изучение причин столь быстрого распространения этого заболевания сейчас является особенно актуальным.

Часто высокий рост заболеваемости сальмонеллеза связывают с плохим обучением личной гигиене, появлением большого числа мигрантов, изменением климата, приводящего к возникновению новых очагов инфекции, и ухудшением состояния иммунитета после пандемии COVID-19. Несомненно, эти факторы оказывают большое влияние на темпы распространения этого заболевания, но не менее значимым является появление у патогенов устойчивости к антибиотикам, применяющимся при лечении сальмонеллеза.

Целью работы было оценить способность плазмид, несущих ген bla_{CTX-M-5}, кодирующий β -лактамазу расширенного спектра, проникать в бактериальные клетки, формируя у них устойчивость к ряду β -лактамных антибиотиков.

Исследование выполнялось в рамках Международной школы молекулярной и теоретической биологии 2023 года в лаборатории молекулярной

генетики Института молекулярной биологии Национальной Академии Наук Республики Армения.

Лечение от сальмонеллеза в подавляющем большинстве случаев включает в себя терапию антибиотиками. В последнее время резистентность бактерий к β -лактамным антибиотикам приобретает все большее распространение. В связи с вышеперечисленными условиями особенно актуальным и клинически важным является изучение горизонтального переноса генов резистентности к β -лактамным антибиотикам, применяющимся при лечении сальмонеллеза.

Бета-лактамазы – это разнообразный класс ферментов, продуцируемых бактериями, которые разрушают бета-лактамное кольцо (структурную и функциональную основу β -лактамных антибиотиков) путем гидролиза, инактивируя тем самым β -лактамные антибиотики.

Среди изолятов сальмонелл, циркулирующих в Армении в течение двух десятилетий, наиболее распространенным серотипом с множественной лекарственной устойчивостью был *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium*. Выявлено, что большинство клинических изолятов *S. Typhimurium* были продуцентами β -лактамаз расширенного спектра и принадлежали к сиквенс-типу (Multilocus sequence typing) ST328. Ген bla_{CTX-M-5}, кодирующий β -лактамазу расширенного спектра, преимущественно локализованный на плазмидах pCTXM5, был идентифицирован in silico анализом во всех ESBL-продуцирующих изолятах, выделенных в Армении [1]. В связи с этим для

исследования был выбран клинический штамм *S. ser. Typhimurium str. A_3040* с плазмидой pCTXM5, несущей ген bla_{CTX-M-5}.

Геном клинического штамма *S. ser. Typhimurium str. A_3040*, полученный ранее с помощью полногеномного сиквенса, был аннотирован нами для поиска генов антибиотикорезистентности, а также плазмид, несущих их. Таким образом, на 20 контиге генома

(рис. 1а) была обнаружена плаزمида pCTXM5-1358 (рис. 1б), несущая ген CTX-M-5 (рис. 1в), кодирующий β-лактамазу расширенного спектра

В качестве реципиентного штамма использовалась *Escherichia coli* DH5α, содержащая плазмиду pCMV-GCaMP3 (рис. 2), несущую ген устойчивости к канамицину..

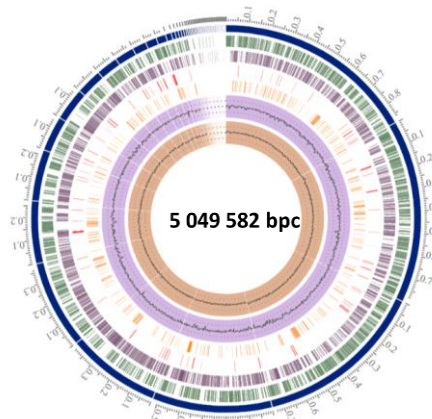


Рисунок 1а. Геном *S. ser. Typhimurium str. A_3040*

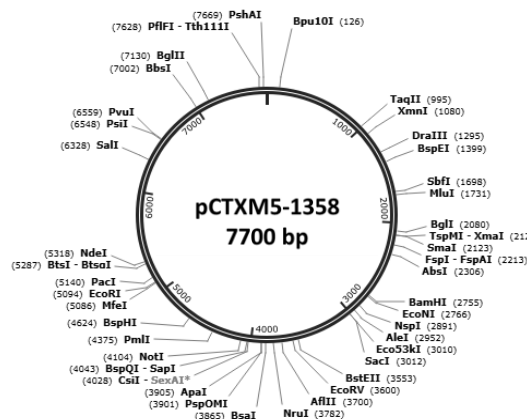


Рисунок 1б. Плазмида pCTXM5-1358

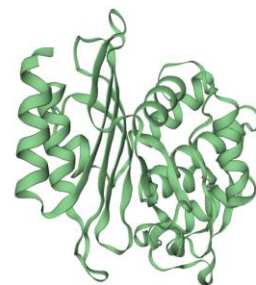


Рисунок 1в. Ген CTX-M-5 β-lactamase

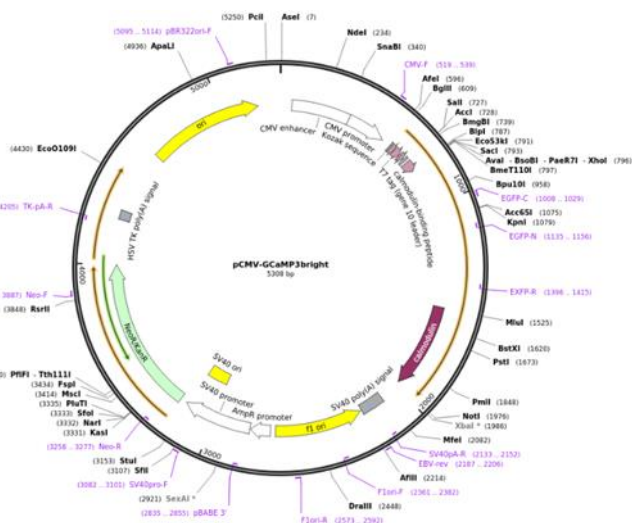


Рисунок 2. Плазмида pCMV-GCaMP3 штамма *Escherichia coli* DH5α

Перед началом работы было необходимо подтвердить фенотип клинического штамма, плазмиды которого использовалась в качестве донора. Для полного подтверждения фенотипа *S. ser. Typhimurium* требовалось выявить синергизм амоксициллин-клавулановой кислоты с двумя разными цефалоспоридами, поэтому методом «Двойных дисков» был проверен синергизм с цефалоспорином 2 поколения, а методом E-strip-тестов – синергизм с цефотаксимом (цефалоспорин 3 поколения).

Для трансформации компетентные клетки были получены химическим (кальциевым) методом [2]. Трансформация выполнялась методом теплового

шока [3]. (рис. 3). Чтобы проверить, насколько эффективно прошла трансформация, трансформированные колонии отбирали на чашках с агаром, содержащим цефтриаксон, ген резистентности к которому присутствовал в плазмиде донора *S. ser. Typhimurium str. A_3040*, и канамицин, ген резистентности к которому содержался в плазмиде реципиента *E. coli* DH5α.

Эффективность трансформации рассчитывали как количество колониеобразующих единиц (КОЕ) на микрограмм использованной плазмидной ДНК. Трансформация была проведена в двух повторностях, эффективность трансформации считалась как среднее значение показателей всех повторностей и

в итоге составила $1,6 \times 10^4$ cfu/ μ g. Это значение свидетельствует о том, что трансформация прошла успешно.

Из колоний трансформантов была выделена плазмидная ДНК для проведения рестрикции. Образцы плазмидной ДНК, выделенные из двух колоний трансформантов (Tf1 и Tf2), а также из донорского и реципиентного штамма, расщепляли эндонуклеазой BglIII (Thermo Fisher Scientific). Эндонуклеаза рестрикции подбиралась в соответствии с сайтами рестрикции на исследуемых плазидах. Исходя из аннотаций предполагаемый размер фрагментов – 5,3 тыс. пар нуклеотидов (у реципиентного штамма *E.coli* DH5alpha) и 7,7 тыс. пар нуклеотидов (у донорского штамма *S. ser. Typhimurium str. A_3040*).

Продукты рестрикции разделяли путем проведения гель-электрофореза (рис. 3) в 1 % агарозе. 1 KB DNA Ladder (GenRuller) использовали в качестве

маркера молекулярной массы. Анализ полиморфизма длин рестриционных фрагментов показал 3 типа профилей рестрикции, которые отображены на рисунке 3.

Профиль типа I представляет собой одну полосу линейной донорской плазмиды размером ~ 8,5 тыс. пар нуклеотидов (образец № 1), что больше, чем предполагалось в аннотации генома (7,7 тыс. п.н., рСТХМ5-1358, Genbank JX017308).

Профиль типа III представляет собой одну полосу линейной плазмиды штамма-реципиента (образец № 4), размер которой соответствует ожидаемому, 5,3 тыс. п.н.

Одинаковый профиль рестриционных фрагментов (Тип II, ~8,5 тыс. п.н. и 5,3 тыс. п.н.) был обнаружен у обоих штаммов-трансформантов (образцы № 2 и № 3), что указывает на наличие как донорской, так и реципиентной плазмиды.

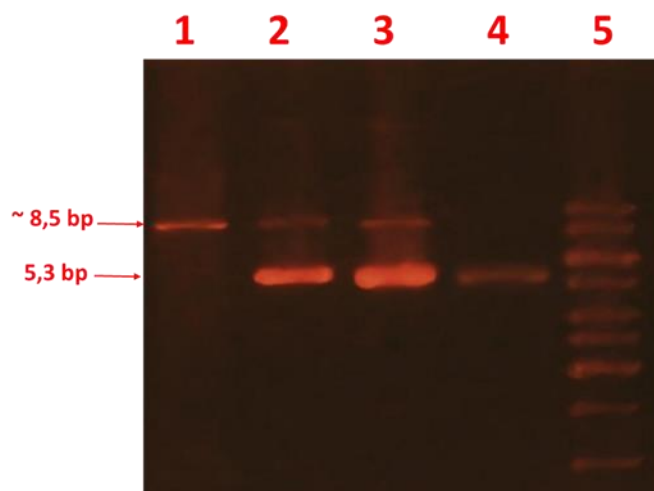


Рисунок 3. Результаты электрофореза рестриционных фрагментов:

№ 1 – донор, № 2 – колония трансформантов с 1 чашки, № 3 – колония трансформантов со 2 чашки, № 4 – реципиент, № 5 – маркер 1 KB DNA Ladder (GenRuller)

В ходе экспериментов по оценке эффективности бактериальной трансформации плазмидой, несущей ген blaCTX-M-5, кодирующий β -лактамазы расширенного спектра, были уточнены размеры плазмид:

– плазида рСТХМ5-1358 – 8,5 тыс. пар нуклеотидов (из донорского штамма *Salmonella enterica* Serovar *Typhimurium*);

– плазида рСМV-GCaMP3 – 5,3 тыс. пар нуклеотидов (штамм-реципиент *Escherichia coli* DH5alpha).

Результаты указали на возможность распространения клинически проблемного фенотипа-продуцента β -лактамаз расширенного спектра среди *Enterobacteriaceae*. Возможность распространения этого фенотипа представляет наибольшую угрозу целой группе антибактериальных препаратов, применяющихся при лечении в том числе и сальмонеллеза.

Список литературы

1. Extended-Spectrum β -Lactamases in Human Isolates of Multidrug-Resistant Non-typhoidal *Salmonella enterica* / A.M. Sedraky, Z.A. Ktsoyan, K.A. Arakelova [et al.] // Front. Microbiol. 2020. Vol. 11. P. 592223.

2. An improved calcium chloride method preparation and transformation of competent cells / Xiaowei Li, Xin Sui, Yan Zhang [et al.] // African J. of Biotechnology. 2010. Vol. 9 (50). PP. 8549-8554.

3. Hanahan D., Jessee J., Bloom F.R. Plasmid transformation of *Escherichia coli* and other bacteria // Methods Enzymol. 1991. Vol. 20. PP. 63-113.

4. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Рекомендации гражданам: Профилактика сальмонеллеза. URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/activities/recommendations/details.php?ELEMENT_ID=23393&sphrase_id=4982719 (дата обращения: 10.08.2023).

PLASMID-MEDIATED TRANSFORMATION OF EXTENDED SPECTRUM β -LACTAMASE (ESBL)-PRODUCER PHENOTYPE TO *E. COLI* DH5 α COMPETENT CELLS

Stepanova E.A.¹, Sedrakyan A.M.², Akopyan Sh.S.², Rasskazova M.M.³

¹ School of Molecular and Theoretical Biology

² Institute of Molecular Biology of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Ezzas Hasratyan st. 7, Yerevan, Republic of Armenia, 0014

³ Municipal Budgetary Educational Institution «Secondary school № 11 named after Podolsky cadets», Komarova st. 10, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035
e-mail: stepanovaevgenya111@mail.ru

This work is devoted to assessing the ability of plasmids carrying the bla_{CTX-M-5} gene, encoding an extended spectrum β -lactamase, to penetrate bacterial cells, forming in them resistance to a number of β -lactam antibiotics.

Keywords: salmonellosis, antibiotic resistance, extended spectrum β -lactamases, β -lactam antibiotics, bacterial transformation

Salmonellosis is the leading foodborne bacterial infection in Armenia. Among Salmonella isolates circulating in the region for two decades, the most prevalent multidrug-resistant (MDR) serotype was *S. ser. Typhimurium*. Of note, the majority of clinical MDR *S. Typhimurium* isolates were extended-spectrum β -lactamase (ESBL)-producers and were assigned to ST328 [1]. The bla_{CTX-M-5} gene predominantly located on the pCTXM5 plasmids was in silico identified in all ESBL-producing *S. Typhimurium* isolates from Armenia.

Aim: To assess efficiency of bacterial transformation with the plasmid carrying the bla_{CTX-M-5} gene encoding extended spectrum β -lactamase. Introduction

Plasmid DNA donor strain: human *S. ser. Typhimurium str. A_3040* (ST328; whole genome sequence: ENA Project PRJEB36290, SAMEA6488673). ESBL-producer phenotype of donor strain was confirmed by double-disk synergism test and E-strip-test.

Recipient strain: *E. coli* DH5 α cells carrying pCMV-GCaMP3 plasmid encoding resistance to kanamycin.

Plasmid-mediated transformation: Preparation of competent cells by CaCl₂ method was done as described previously [2]. Plasmid DNA extracted from ESBL-producing *S. Typhimurium* A_3040 isolate was transferred by transformation into *E. coli* DH5 α cells as described previously [3]. Transformed colonies were selected on agar plates containing ceftriaxone and kanamycin. Transformation efficiency was calculated as the number of colony forming units (cfu) per microgram of plasmid DNA used.

The ceftriaxone-resistant transformants were obtained and transformation efficiency was calculated:

1.6 x 10⁴ cfu/ μ g (shown as mean results of two repeated experiments).

Plasmid DNA restriction: Plasmid DNA samples extracted from two transformants (Tf1 and Tf2), as well as from donor and recipient strains, were digested with BglII endonuclease (Thermo Fisher Scientific) according to the manufacturer's recommendations.

The digest products were separated by performing gel electrophoresis in 1 % agarose. The 1 KB DNA Ladder (GenRuller) was used as a molecular weight marker.

Restriction fragment length polymorphism analysis of plasmid DNA samples revealed 3 types of restriction profiles that are shown in Fig.

The type I profile is a single band of a linear donor plasmid of ~8.5 kb (line 1), which is larger than predicted by the genome annotation (7.7 kb, pCTXM5-1358, Genbank JX017308).

Type III profile is a single band of linear plasmid of recipient strain (line 4), which size is in good agreement with expected, 5.3 kb.

The same profile of restriction fragments (Type II, ~8.5 kb and 5.3 kb) was found in both transformant strains (lines 2 and 3), indicating the presence of both the donor and recipient plasmids.

Conclusions. The efficiency of bacterial transformation with the plasmid carrying the bla_{CTX-M-5} gene encoding ESBL was assessed. In plasmid transfer experiments, ceftriaxone-resistant transformants carrying the low-molecular-weight plasmids of 8.5 kb (from donor strain) and 5.3 kb (recipient strain) were readily obtained.

The results indicated the possibility of spreading the clinically problematic ESBL-producer phenotype among Enterobacteriaceae.

УДК 663.813:577.16

СОДЕРЖАНИЕ ВИТАМИНА «С» И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА РАБОТУ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА, В СОКАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шупик Д.А.^{1,а}, Бейзак К.Н.¹, Авраменко И.А.¹, Лукашенко С.Н.², Шаврина К.Е.², Братухин Н.О.², Саруханов А.В.²

¹ Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 11 им. Подольских курсантов» г. Обнинска, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Комарова, д. 10, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1, Российская Федерация

e-mail: ^а denisshupik2007@gmail.com

Проведено комплексное исследование соков и сокосодержащих напитков промышленного производства, представленных в торговых точках г. Обнинск как источника поступления важных для иммунной системы человека витамина «С» и микроэлементов. Содержание витамина «С» в свежевыжатом апельсиновом соке выше, чем в соках промышленного производства. В яблочных соках уровень витамина «С» сопоставим или близок к содержанию в свежевыжатом соке. Полученные значения содержания рассмотренных элементов в 100 мл соках существенно ниже значений их нормы потребления в сутки для человека.

Ключевые слова: витамин «С», микроэлементы, сок, иммунитет

Введение

Иммунная система – система биологических структур и процессов организма, обеспечивающая его защиту от инфекций, токсинов и злокачественных клеток. Правильное и сбалансированное питание занимает одно из ключевых мест в укреплении иммунной системы человека. Например, недостаток микроэлементов, особенно, жизненно необходимых, которые участвуют в обмене ферментов, существенно снижает иммунитет человека. Особое место занимает дефицит витамина С, который приводит к ослаблению реакции защитных сил организма и уменьшает выработки антител для борьбы с инфекцией.

Фруктовые и овощные соки являются натуральными продуктами, которые играют важную роль в рационе населения разных стран. Однако в России многие потребители считают их «продуктами для удовольствия» и не всегда уделяют им должное внимание [1]. Тем не менее в отечественной литературе имеется ряд работ по исследованию использования соков для поддержания иммунитета [2-7].

Цель работы – оценить содержание витамина «С» и микроэлементов, ответственных за работу иммунной системы человека, в соках промышленного производства, представленных в торговых точках города Обнинск.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны яблочный и апельсиновый соки как наиболее часто покупаемые (на основе опроса продавцов магазинов «Пятёрочка», «Магнит» и «Ашан») в торговых точках г. Обнинск. Для сравнения использовали свежевыжатый сок и сами фрукты.

Предметом исследования являлись содержание витамина «С» и микроэлементов, имеющие наибольшее значение для иммунной системы человека, в соках.

Для определения содержания витамина «С» в соках был использован метод окислительно-восстановительного титрования с использованием йода.

Определения микроэлементов (Zn, K, Ca, Na, Mg, Mn, V, Cr, Co, Cd, Pb, Cu, Fe) проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Liberty Ax Series II.

Результаты исследования

Из представленной диаграммы (рис. 2) видно, что содержание витамина «С» в апельсиновом соке выше, чем в яблочном. Исключением является марка

«Каждый день», однако в отношении данной марки следует учитывать, что в данном случае были

проанализированы яблочный сок и апельсиновый сокосодержащий продукт.

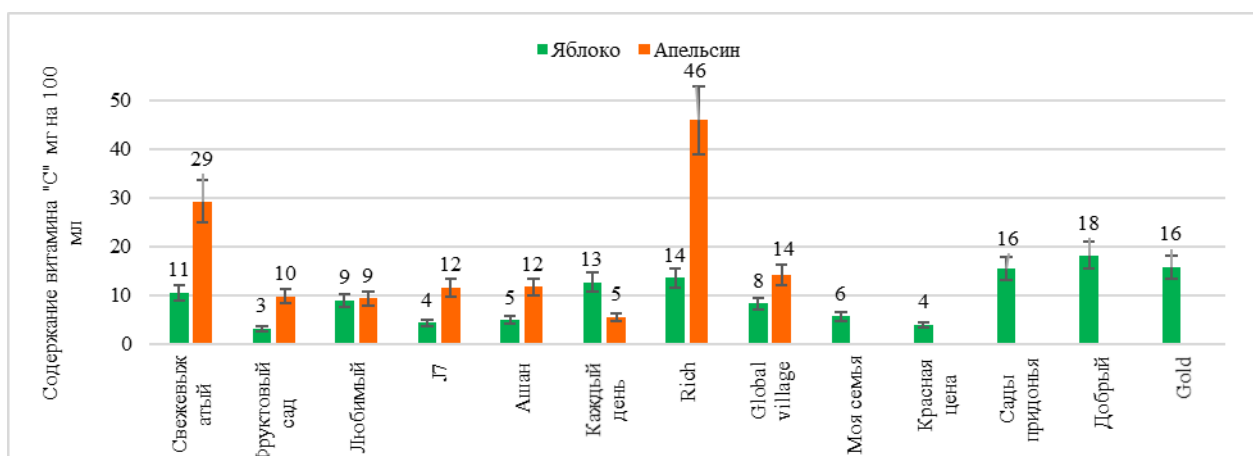


Рисунок 2. Содержание витамина «С» в соках

При анализе соков можно сделать вывод, что содержание витамина «С» в яблочных соках и сокосодержащих продуктах «Rich», «Любимый», «Каждый день» и «Global villadge» находится на уровне свежевыжатого сока, в то время как в остальных яблочных соках содержание витамина «С» ниже.

Содержание витамина «С» во всех рассмотренных апельсиновых соках промышленного производства, за исключением сока «Rich», ниже, чем в свежевыжатом. Учитывая его незначительное превышение и в яблочном соке данного производителя по сравнению со свежевыжатым, можно предположить, что, вероятнее всего, при производстве соков данной марки используется в качестве консерванта аскорбиновая кислота.

Для получения суточной нормы витамина «С» (100 мг/сутки для взрослого и 60 мг/сутки для детей) необходимо употребление свежевыжатого апельсинового сока в объеме 350 мл для взрослого человека и 200 мл для детей, в то время как апельсинового

сока промышленного производства в 2 раза больше. В отношении яблочного сока необходимые объемы для взрослых и детей как для свежевыжатого, так и для соков промышленного производства составят 1 литр и 600 мл, соответственно.

Для большинства элементов наблюдается более высокое содержание в самих фруктах (табл. 1). Наибольшая разница отмечается для таких элементов как Zn, Ca, Co, Cr, Cu, Fe. Следует отметить высокие концентрации микроэлементов в сравнении с их содержанием в соках, в апельсине, в том числе Cd и Pb. Кроме того, содержание V в 4 мкг/100 мл было зафиксировано только в апельсине, для остальных продуктов, включая фрукт яблока, его концентрация составила меньше предела обнаружения. Тем не менее во всех рассмотренных соках и сокосодержащих продуктах, а также самих фруктах уровень содержания микроэлементов не превышает установленные ПДК.

Таблица 1

Содержание элементов в соках и фруктах

Марка	Содержание, мг в 100 мл сока				Содержание, мкг в 100 мл сока									
	K	Ca	Na	Mg	Zn	Fe	Cu	Mn	V	Cr	Co	Cd	Pb	
яблочный сок														
Фруктовый сад	41± 4	3,6± 0,4	0,9± 0,1	2,1± 0,2	37± 4	82± 8	10± 1	19± 2	<1	5,8± 0,6	1,2± 0,1	0,20± 0,02	5,4± 0,5	
Любимый	63± 6	4,4± 0,4	1,8± 0,2	3,0± 0,3	63± 6	130± 13	12± 1	23± 2	<1	4,8± 0,5	0,56± 0,06	0,36± 0,04	<1,0	
J7	100± 10	7,1± 0,7	4,3± 0,4	5,5± 0,6	66± 7	150± 15	15± 2	32± 3	<1	3,8± 0,4	0,80± 0,08	<0,1	5,3± 0,5	
Ашан	99± 10	5,9± 0,6	4,6± 0,5	5,1± 0,5	49± 5	89± 9	34± 3	29± 3	<1	4,8± 0,5	0,48± 0,05	<0,1	3,6± 0,4	
Каждый день	99± 10	7,2± 0,7	4,3± 0,4	5,5± 0,6	58± 6	150± 15	7,4± 0,7	31± 3	<1	2,2± 0,2	0,72± 0,07	0,36± 0,04	<1,0	
Global village	94± 9	5,0± 0,5	4,8± 0,5	4,4± 0,4	18± 2	71± 7	17± 2	29± 3	<1	6,4± 0,6	0,60± 0,06	0,32± 0,03	1,8± 0,2	
Rich	93± 9	7,5± 0,8	4,4± 0,4	5,1± 0,5	27± 3	120± 12	16± 2	44± 4	<1	<1,0	0,56± 0,06	<0,1	2,6± 0,3	

Марка	Содержание, мг в 100 мл сока				Содержание, мкг в 100 мл сока								
	K	Ca	Na	Mg	Zn	Fe	Cu	Mn	V	Cr	Co	Cd	Pb
Добрый	65± 7	4,9± 0,5	3,4± 0,3	3,3± 0,3	21± 2	110± 11	7,2± 0,7	29± 3	<1	4,8± 0,5	<0,4	0,20± 0,02	3,4± 0,3
Сады придонья	88± 9	9,7± 1,0	7,6± 0,8	5,2± 0,5	36± 4	240± 24	2,0± 0,2	83± 8	<1	4,1± 0,4	<0,4	<0,1	3,9± 0,4
<i>Красная цена</i>	0,05± 0,01	0,39± 0,04	0,084± 0,01	0,048± 0,01	16± 2	<0,9	9,3± 0,9	1,4± 0,1	<1	2,2± 0,2	0,44± 0,04	<0,1	<1,0
<i>Моя семья</i>	10± 1	1,4± 0,1	1,6± 0,2	0,66± 0,07	14± 1	45± 5	<0,4	5,0± 0,5	<1	2,0± 0,2	0,48± 0,05	<0,1	5,2± 0,5
<i>Gold</i>	21± 2	2,2± 0,2	7,6± 0,8	1,0± 0,1	13± 1	27± 3	3,6± 0,4	6,5± 0,6	<1	4,1± 0,4	1,1± 0,1	<0,1	<1,0
Среднее	64± 6	4,9± 0,5	3,8± 0,4	3,4± 0,3	35± 4	100± 10	11± 1	28± 3	<1	3,8± 0,4	0,60± 0,06	0,14± 0,01	2,6± 0,3
Свежевыжатый	72± 7	3,0± 0,3	0,52± 0,05	3,6± 0,4	54± 5	66± 7	52± 5	24± 3	<1	2,0± 0,2	1,4± 0,1	<0,1	2,0± 0,2
Фрукт	110± 11	18± 2	1,9± 0,2	9,6± 1,0	350± 35	1100± 110	160± 16	80± 8	<1	15± 2	6,8± 0,7	3,2± 0,3	22± 2
апельсиновый сок													
Фруктовый сад	72± 7	7,6± 0,8	1,1± 0,1	5,0± 0,5	86± 9	140± 14	19± 2	18± 2	<1	6,3± 0,6	1,1± 0,1	0,40± 0,04	1,2± 0,1
Любимый	66± 7	5,7± 0,6	1,0± 0,1	4,3± 0,4	73± 7	120± 12	27± 3	15± 2	<1	0,80± 0,08	1,4± 0,1	0,24± 0,02	3,1± 0,1
J7	100± 10	12± 1	1,7± 0,2	10± 1	82± 8	140± 14	57± 6	30± 3	<1	1,6± 0,2	1,2± 0,1	0,40± 0,04	1,8± 0,2
Ашан	100± 10	15± 2	4,4± 0,4	10± 1	65± 7	110± 11	41± 4	29± 3	<1	2,5± 0,3	0,68± 0,07	<0,1	5,8± 0,6
Global villadge	77± 8	5,0± 0,5	3,3± 0,3	4,6± 0,5	16± 2	35± 4	9,0± 0,9	5,7± 0,6	<1	2,7± 0,3	<0,4	<0,1	5,5± 0,6
Rich	94± 9	7,3± 0,7	2,2± 0,2	6,4± 0,6	36± 4	73± 7	32± 3	27± 3	<1	2,0± 0,2	<0,4	0,28± 0,03	4,1± 0,4
<i>Каждый день</i>	25± 3	4,7± 0,5	8,5± 0,9	1,8± 0,2	100± 10	120± 12	30± 3	8,5± 0,9	<1	2,7± 0,3	<0,4	0,27± 0,02	1,3± 0,1
Среднее	77± 8	8,3± 0,8	3,2± 0,3	6,0± 0,6	66± 7	110± 11	31± 3	19± 2	<1	2,7± 0,3	0,67± 0,07	0,23± 0,02	3,3± 0,3
Свежевыжатый	100± 10	22± 2	2,4± 0,2	13± 1	180± 18	190± 19	70± 7	60± 6	<1	3,9± 0,4	0,64± 0,06	1,2± 0,1	5,7± 0,6
Фрукт	160± 16	76± 8	3,4± 0,3	17± 2	440± 44	690± 69	140± 14	90± 9	4,0± 0,4	22± 2	5,6± 0,6	11± 1	160± 16
Норма потребления в сутки	2500	1000	2300	350	15000	15000	3000	4000	150*	30	150	50**	20**
ПДК в соках [8]	-	-	-	-	1000	-	500	-	-	-	-	5	100

* – нормы не установлены, приведено среднее потребление человеком

** – допустимое количество в сутки

Курсивом выделены сокодержательные продукты

Заключение

Проведено исследование содержания витамина «С» и микроэлементов, ответственных за работу иммунной системы человека, в соках промышленного производства, представленных в торговых точках города Обнинск. Показано, что апельсиновый сок более богат витамином «С». Содержание данного витамина Содержание витамина «С» во всех рассмотренных апельсиновых соках промышленного производства, за исключением сока «Rich», ниже, чем в свежесыжатом, а в яблочном соке и сокодержательных продуктах промышленного производства одинаково или близко к содержанию в свежесыжатом соке.

Для получения суточной нормы витамина «С» необходимо употребление свежесыжатого апельсинового сока в объеме 350 мл для взрослого человека и 200 мл для детей, в то время как апельсинового

сока промышленного производства в 2 раза больше. В отношении яблочного сока необходимые объемы для взрослых и детей как для свежесыжатого, так и для соков промышленного производства составят 1 литр и 600 мл, соответственно.

Рассмотрено содержание микроэлементов, имеющих наибольшее значение для иммунной системы человека. Полученные значения содержания рассмотренных элементов в 100 мл соках существенно ниже значений их нормы потребления в сутки для человека.

Список литературы

1. Белокурова Е.С., Панкина И.А. Исследование процессов биодegradации углеводов яблочного сока // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и

аппараты пищевых производств». 2016. № 4. С. 58-64.

2. *Омаров М.М., Абдулхаликов З.А.* Производство купажированного диетического сока из овощей и дикорастущего сырья для повышения иммунитета // Пиво и напитки. 2016. № 4. С. 20-22.

3. *Малахова Г.* Эффективные способы повышения иммунитета. М.: Центрполиграф, 2011. 160 с.

4. Получение сублимированного купажированного сока из овощей, шиповника и лимона для повышения иммунитета и нарушения обмена веществ / *М.М. Омаров [и др.]* // Неделя науки-2016. 2016. С. 135-137.

5. *Насыбуллина Н.М.* Фитотерапия для повышения иммунитета // Медицинская сестра. 2009. № 8. С. 42-44.

6. *Кварталова М.В.* Полифенолы как главные антиоксиданты для поддержания иммунитета в составе напитков с функциональными свойствами // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. 2021. С. 346-352.

7. *Болотов Б.В., Погожев Г.А.* Повышение иммунитета и регенерация тканей по Болотову. Санкт-Петербург: Издательство: Издательский дом «Питер», 2011. 160 с.

8. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 31 марта 1986 г. N 4089-86).

CONTENT OF VITAMIN C AND MICROELEMENTS RESPONSIBLE FOR THE HUMAN IMMUNE SYSTEM IN INDUSTRIAL JUICES

Shupik D.A.^{1,a}, Beizak K.N.¹, Avramenko I.A.¹, Lukashenko S.N.², Shavrina K.E.², Bratukhin N.O.², Sarukhanov A.V.²

¹ *Municipal Budgetary Educational Institution «Secondary school № 11 named after Podolsky cadets», Komarova st. 10, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035*

² *Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035*

e-mail: ^a denisshupik2007@gmail.com

A comprehensive study of industrially produced juices and juice-containing drinks from shops in Obninsk as a source of vitamin C and microelements important for the human immune system was carried out. The content of vitamin C in fresh orange juice is higher than in industrially produced juices. In apple juices, the level of vitamin C is comparable or close to the content in fresh juice. The obtained values for the content of the considered elements in 100 ml of juices are significantly lower than the values of their daily consumption for humans.

Ключевые слова: *vitamin C, microelements, juices, immunity*

Научное издание

Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве

Сборник докладов
II Международной молодежной конференции
(Обнинск, 19-20 октября 2023 г.)

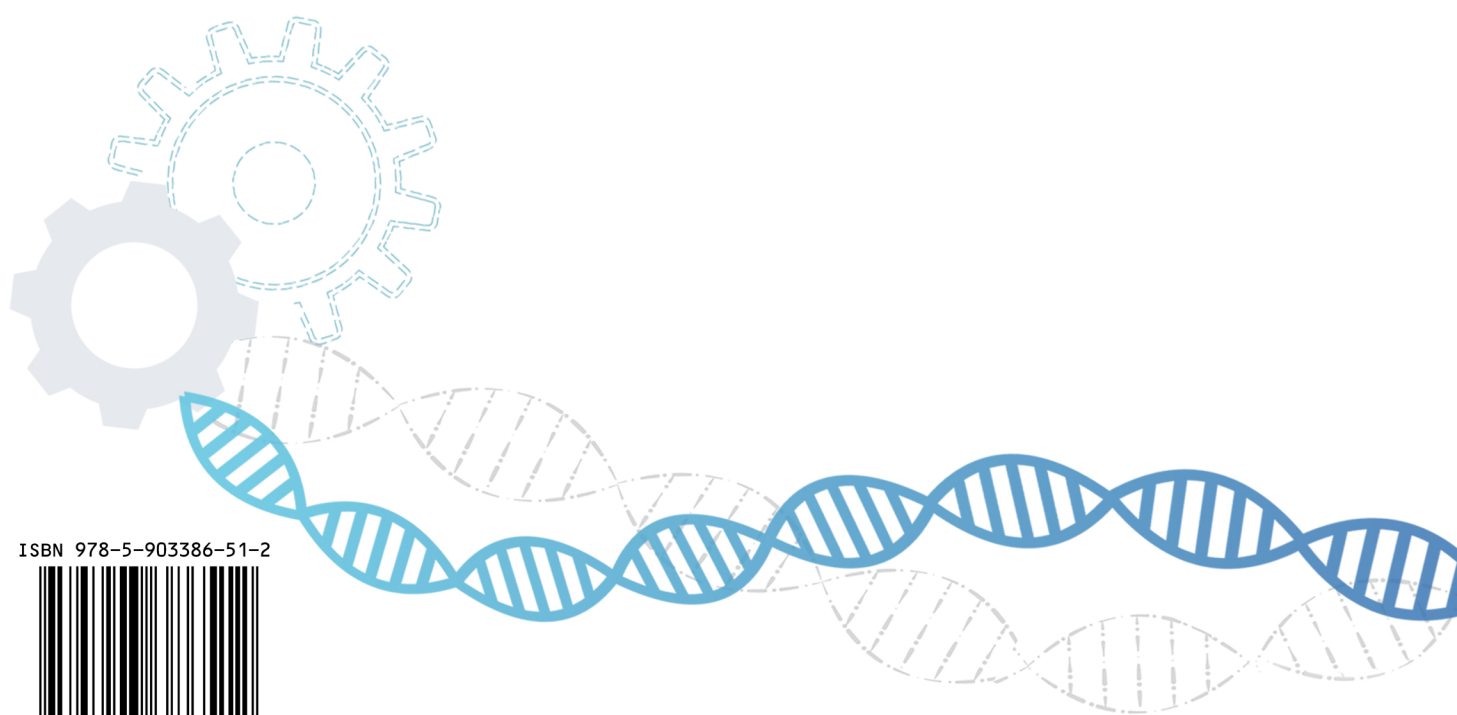
ISBN 978-5-903386-73-4



Компьютерная верстка Шубина О.А.

Подписано в печать 18.10.2023 г.
Формат 60x90 1/8. Гарнитура PT Sans, AGLetterica.
Усл. печ. л. 36,87. Тираж 350 экз. Заказ № 64.

Издательство НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ
249035, г. Обнинск, Киевское шоссе, д.1., к.1
www.rirae.ru



ISBN 978-5-903386-51-2



9 785903 386512