



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



КУРЧАТОВСКИЙ
ГЕНОМНЫЙ ФОРУМ



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

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

23-24 октября 2024, Обнинск,
НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ



 КИ 80 КИ
КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ
ДЛЯ СТРАНЫ
И МИРА

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
ПРИРОДОПОДОБНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



КУРЧАТОВСКИЙ
ГЕНОМНЫЙ ФОРУМ



III 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 3rd International Young Scientists Conference**

Obninsk, October 23-24, 2024

Obninsk
2024

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
III Международной молодежной конференции**

Обнинск, 23-24 октября 2024 г.

Обнинск
2024

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 III международной молодежной конференции, Обнинск, 23–24 октября 2024. Обнинск: НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, 2024. – 317 с.: ил.

ISBN 978-5-903386-75-8

В сборнике представлены материалы III молодежной конференции «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве». В 2024 году конференция проходит на площадке Курчатовского геномного форума (КурчатовГенТех-2024), одного из ключевых мероприятий Международного форума природоподобных технологий. Сборник содержит материалы по следующим направлениям: генетические технологии в сельском хозяйстве, радиационная биология, радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, 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 3rd International Young Scientists Conference, Obninsk, October 23-24, 2024. Obninsk: NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE, 2024. – 317 p.

The proceedings present the materials of the 3rd International Young Scientists Conference "Genetic and Radiation Technologies in Agriculture." In 2024, the conference is held at the Kurchatov Genomic Forum (KurchatovGenTech-2024), one of the key events of the International Forum on Nature-like Technologies. The collection includes materials on the following topics: genetic technologies in agriculture, radiation biology, radiation technologies in agriculture and the food industry, 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 978-5-903386-75-8

© НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, 2024
© Авторы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Секция

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	13
<i>Алимова В.Р., Синякина Е.В., Галанова Е.С., Сулыга Н.В.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ОЦЕНКЕ ПРОДУКТИВНЫХ КАЧЕСТВ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫМЕНИ У МОЛОЧНЫХ КОЗ	14
<i>Батаева Ю.В., Григорян Л.Н., Батаева А.Д.</i>	
ПОИСК КЛАСТЕРОВ ГЕНОВ ШТАММА <i>STREPTOMYCES CARPATICUS</i> RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ПРОДУКЦИЮ БИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ	17
<i>Болотина А.А., Меркулов П.Ю., Казанцев М.Ю., Киров И.В.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА VIGS ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МОБИЛОМА <i>N. BENTHAMIANA</i>	19
<i>Веселкин А.А., Лебедева М.В., Ражина П.Л., Козенкова П.И., Таранов В.В.</i>	
ГЕНОМНОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ РЫЖИКА ПОСЕВНОГО ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ	21
<i>Гайсина Э.М., Очирова Э.М., Никитинская Е.Б., Никитинский Д.А., Пакина Е.Н., Игнатов А.Н.</i>	
ОЦЕНКА МЕЖВИДОВОЙ РЕКОМБИНАЦИИ СРЕДИ ПОТИВИРУСОВ, ПОРАЖАЮЩИХ ПАСЛЕНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ	23
<i>Горбатова И.В., Казакова Е.А.</i>	
ВАЛИДАЦИЯ ГЕНОВ РАДИАЦИОННОГО ГОРМЕЗИСА НА РАЗНЫХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЯХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН	25
<i>Горбунова М.Е., Хаммадов Н.И., Громова Е.А., Додонова Е.А., Усольцев К.В., Шангараев Р.И.</i>	
ИЗЫСКАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ ДЛЯ ПЦР-ДИАГНОСТИКИ ВИРУСА БОЛЕЗНИ АУЕСКИ	27
<i>Громова Е.А., Осянин К.А., Миргазов Д.А., Горбунова М.Е., Додонова Е.А.</i>	
ИНДИКАЦИЯ ВИРУСА ИНФЕКЦИОННОГО НЕКРОЗА ГЕМОПОЭТИЧЕСКОЙ ТКАНИ ЛОСОСЕВЫХ РЫБ МЕТОДОМ ПЦР-РВ	29
<i>Груздев И.В., Москалев Е.А., Рубец В.С., Киров И.В.</i>	
ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛОКУСОВ <i>HMW-GS</i> ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ	31
<i>Доморацкая Д.А., Игнатъева И.М., Кононова Е.П.</i>	
РАЗРАБОТКА НОВЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПЦР-ТЕСТОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВОЗБУДИТЕЛЯ БАКТЕРИАЛЬНОГО УВЯДАНИЯ <i>CLAVIBACTER INSIDIOSUS</i>	34
<i>Душкин В.А., Шамустакимова А.О.</i>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛЯДВЕНЦА С ПОМОЩЬЮ SRAP-МАРКЕРНОЙ СИСТЕМЫ	37
<i>Игошин А.В., Ромашов Г.А., Черняева Е.Н., Елаткин Н.П., Юдин Н.С., Ларкин Д.М.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧАСТОТ ДНК-ПОЛИМОРФИЗМОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ И ХОЗЯЙСТВЕННО ВАЖНЫМИ ПРИЗНАКАМИ, В ГЕНОМЕ АБЕРДИН-АНГУССКОЙ ПОРОДЫ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПО ДАННЫМ ПОЛНОГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ	39
<i>Камараули Е.Д., Власова А.В., Перевозчиков Д.В., Киров И.В.</i>	
НА ПУТИ К ПРЕОДОЛЕНИЮ БАРЬЕРА ТРАНСГЕНЕРАЦИОННОГО НАСЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОДХОДА TE-STORM	43
<i>Капустина С.И.</i>	
БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ РНК ВИРУСА ТАБАЧНОЙ МОЗАИКИ	44
<i>Косман Е.С., Ярославцева О.Н., Роцкая У.Н., Носков Ю.Н., Крюков В.Ю.</i>	
ЭКСПРЕССИЯ ГЕНОВ ИММУННОГО ОТВЕТА У КОЛОРАДСКОГО ЖУКА ПРИ МЕТАМОРФОЗЕ И В ОТВЕТ НА ГРИБНУЮ ИНФЕКЦИЮ	46

<i>Крылова П.С., Шестерикова Е.М., Ханова А.С., Блинова Я.А., Бондаренко В.С., Фролова Н.А., Бондаренко Е.В.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И PH СРЕДЫ НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ СЕМЕЙСТВА СУПЕРОКСИДДИСМУТАЗ У <i>BEAUVERIA BASSIANA</i>	49
<i>Латыпова А.А., Тюрин К.Н., Киров И.В.</i> ДЕТЕКЦИЯ И ГЕНОМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИНСЕРЦИЙ РЕТРОТРАНСПОЗОНОВ В ГЕНОМЕ РАПСА (<i>B. NAPUS</i>)	52
<i>Минина Е.В., Логинова Н.Н., Вересова П.Д., Базанов Т.А.</i> ОЦЕНКА СОРТОВОЙ ЧИСТОТЫ <i>CAMELINA SATIVA L.</i> НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНО-МАРКЕРНОГО АНАЛИЗА	56
<i>Можаровская Л.В., Майсеня С.В.</i> ОЦЕНКА ТРАНСКРИПЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГЕНОВ <i>PR1</i> И <i>WRKY40 BETA VULGARIS L.</i> ПРИ БИОТИЧЕСКОМ СТРЕССЕ	58
<i>Нестерова И.А., Плотникова Э.М.</i> КАРИОЛОГИЧЕСКАЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КУЛЬТУР КЛЕТОК ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИТОКИНОВ	60
<i>Оболенский Р.Р., Словарева О.Ю.</i> РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ БАКТЕРИЙ СЕМЕЙСТВА <i>MICROBACTERIACEAE</i> НА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ В КОЧУБЕЕВСКОМ РАЙОНЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ	62
<i>Перевозчиков Д.В., Власова А.В., Камараули Е.Д., Киров И.В.</i> РАЗРАБОТКА ПОДХОДА ВИРУС-ОПОСРЕДОВАННОЙ АКТИВАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>ARABIDOPSIS THALIANA L.</i>	66
<i>Подлущий М.С., Шубина С.И., Самад С., Байк А., Бондаренко В.С., Болдырев С.В., Лукашевич М.И., Бен С., Бондаренко Е.В.</i> АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ У ПРОРОСТКОВ <i>LUPINUS ALBUS L.</i> ПОСЛЕ ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН ПАТОГЕНОМ <i>COLLETOTRICHUM LUPINI</i>	67
<i>Полховская Е.С., Груздев И.В., Москалёв Е.А., Киров И.В.</i> МУЛЬТИПЛЕКСНОЕ НАНОПОРОВОЕ СЕКВЕНИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ RAPID BARCODING KIT	71
<i>Полховский А.В., Дмитриева М.В., Киров И.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКОМБИНАНТНЫХ ВИРУСОВ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО МУТАГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ	75
<i>Пырских А.С., Крылова Е.В., Солтынская И.В., Блюменкранц Д.А., Макаров Д.А., Иванова О.Е.</i> МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ И ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ПРИ ВЕТЕРИНАРНОМ МОНИТОРИНГЕ РЕЗИСТЕНТНОСТИ	76
<i>Романишко Е.Л., Киреева А.И., Михайлова М.Е., Тиханович Н.И., Камыш Н.А.</i> ДНК-ДИАГНОСТИКА НАСЛЕДСТВЕННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ ВСТРЕЧАЕМОСТИ МУТАЦИЙ У КОРОВ, СВИНЕЙ, ЛОШАДЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ	79
<i>Серганова М.А., Меркулов П.Ю., Ялтанская А.В., Киров И.В.</i> ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕПЛООВОГО СТРЕССА НА НАСЛЕДУЕМУЮ ТРАНСПОЗИЦИЮ ЭЛЕМЕНТОВ <i>ONSEN</i> У <i>A. THALIANA</i>	83
<i>Смутин Д.В., Тальдаев А.Х., Данилов Л.Г., Лебедев Е.Е., Адонин Л.С.</i> ПЧЕЛИНЫЙ МИКРОБИОМ: НЕВИДИМАЯ СИЛА, ПОДДЕРЖИВАЮЩАЯ ЖИЗНЬ	85
<i>Титаренко В.С., Кротова О.Е.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНОМНЫХ И ПОСТГЕНОМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕЛЕКЦИИ СЕМЕНОВОДСТВА	86
<i>Торгашева Е.В., Котов И.А., Попов А.В.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПАРААМИНОБЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ (ПАБК) В ПОВЫШЕНИИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ОСЕТРА СИБИРСКОГО В УСЛОВИЯХ УЗВ	88
<i>Фирсова А.М., Корабейников Р.В., Евлагина Д.Д., Колосов С.Е.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В МОЛОЧНОМ ОВЦЕВОДСТВЕ	91

Секция	
РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ	96
<i>Басова М.А., Снегирёв А.С., Козьмин Г.В.</i>	
ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ МЕТАБОЛИЗМА РАДИОЙОДА У ДОЙНЫХ КОРОВ ПРИ ИЗБЫТКЕ И ДЕФИЦИТЕ СТАБИЛЬНОГО ЙОДА В РАЦИОНЕ	97
<i>Битаршвили С.В., Волкова П.Ю.</i>	
ОСОБЕННОСТИ МЕТАБОЛИЗМА <i>ACHILLEA MILLEFOLIUM</i> ИЗ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ	100
<i>Гайнутдинов Т.Р.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-БИОЛОГИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ НА КРОЛИКАХ	103
<i>Горбунов И.Ю., Карпов А.Д., Радин А.И., Раздаиводин А.Н., Белов А.А.</i>	
НАКОПЛЕНИЕ Cs-137 В СКЕЛЕТНЫХ ВЕТВЯХ, ПОБЕГАХ ВТОРОГО И СЛЕДУЮЩИХ ПОРЯДКОВ У ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (<i>PICEA ABIES</i> (L.) H.KARST.)	106
<i>Гринберг М.А., Воденев В.А.</i>	
КАК РАСТЕНИЯ ЧУВСТВУЮТ РАДИАЦИЮ?	110
<i>Плотникова Э.М., Гайнуллин Р.Р., Шакуров М.М., Ефимова М.А., Тухфатуллоев З.Л., Мухаметшин И.Р., Вафин Ф.Р.</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИПОСОМАЛЬНОГО ПРЕПАРАТА ПРИ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ ОВЕЦ	111
<i>Ромодин Л.А., Никитенко О.В., Бычкова Т.М., Московский А.А., Ильязов Р.Г., Родионова Е.Д.</i>	
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ РАДИОЗАЩИТНЫХ ПРЕПАРАТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СОДЕРЖАНИЯ ЛЕЙКОЦИТОВ И ТРОМБОЦИТОВ И КРИТЕРИЮ ВЫЖИВАЕМОСТИ ОБЛУЧЕННЫХ В ДОЗЕ 6.5 Гр МЫШЕЙ	115
<i>Федоров С.Г.</i>	
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ	119
<i>Ханова А.С., Горбатова И.В., Шестерикова Е.М., Подлуцкий М.С., Бондаренко Е.В.</i>	
ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА ДИНАМИКУ ПРОРАСТАНИЯ, ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ РАЗВИТИЯ И ВЫЖИВАЕМОСТЬ ЛЮПИНА БЕЛОГО	121
<i>Ханова А.С., Смирнова А.С., Блинова Я.А., Бондаренко Е.В.</i>	
ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ СЕМЯН <i>LUPINUS L.</i> И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОРОСТКАХ	124
<i>Чередникова Н.Н., Бабина Д.Д., Шестерикова Е.М., Король М.Ю., Празян А.А., Сабуров В.О., Моисеев А.С., Казаков Е.И., Казакова Е.А.</i>	
ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИРУЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУЛЬТУРЫ <i>LACTUCA SATIVA</i>	128
<i>Шаповалов С.Г., Козьмин Г.В.</i>	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ β -ОБЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ОВЕЦ МОДЕЛЬНЫМИ ОПЛАВЛЕННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ	132
Секция	
РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ	136
<i>Галлямова М.Ю., Семенов В.Г., Ишмухаметов К.Т., Курбангалеев Я.М.1, Калимуллин Ф.Х.</i>	
ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО РАДИОЗАЩИТНОГО СРЕДСТВА НА КАЧЕСТВО МЯСА КРОЛИКОВ	137
<i>Золотов С.А., Близнюк У.А., Студеникин Ф.Р.</i>	
БЫСТРОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ	139
<i>Зубрицкая Я.В., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Ипатова В.С., Малюга А.А., Никитченко А.Д., Родин И.А., Черняев А.П., Чибисова М.С., Чуликова Н.С., Юров Д.С.</i>	
ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И ФИТОПАТОГЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАРТОФЕЛЯ СОРТОВ ГАЛА И ФИОЛЕТОВЫЙ	142

<i>Ильяхина Ю.В., Тимакова Р.Т.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ В ПРИМЕНЕНИИ ХОЛОДНОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МОЛОЧНЫХ КОНСЕРВОВ	146
<i>Ипатова В.С., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Болотник Т.А., Зубрицкая Я.В., Козлова Е.К., Малюга А.А., Никитченко А.Д., Опруненко А.Ю., Родин И.А., Чуликова Н.С., Черняев А.П.</i> ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЕННОГО КАРТОФЕЛЯ НА БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛИ КЛУБНЕЙ НОВОГО УРОЖАЯ	148
<i>Кляпнев А.В., Семенов В.Г.</i> ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ УБОЯ БЫЧКОВ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАТРИЯ НУКЛЕИНАТА И ЭСТРОГЕННОГО ПРЕПАРАТА КОРОВАМ-МАТЕРЯМ ДО ОТЕЛА	153
<i>Костылев Д.В., Есаулова О.В., Никифоров С.И.</i> ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПИЩЕВОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ, А ТАКЖЕ НЕПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ТОВАРОВ НАРОДНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ	156
<i>Коцюбинская О.А., Бондаренко Е.В., Казыдуб Н.Г., Блинова Я.А., Кузьмина С.П., Чернов Р.В.</i> ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ	158
<i>Кузунова Е.А., Близнюк У.А., А.П. Черняев, Борщеговская П.Ю., Родин И.А., Торопыгина М.И., Ипатова В.С., Золотов С.А., Козлова Е.К.</i> МОДИФИКАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ МИОГЛОБИНА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ 8 СУТОК	162
<i>Кусак А.А., Борщеговская П.Ю., Никитченко А.С., Ипатова В.С., Близнюк У.А., Черняев А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА» ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРЫ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ МАТЛАВ	166
<i>Межетова И.Т., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю. Беклемишев М.К., Черняев А.П., Родин И.А.</i> ВЛИЯНИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БЕЛКОВЫЕ МОЛЕКУЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПЕЧЕНИ ИНДЕЙКИ	169
<i>Симагин А.Д., Симагина А.С., Вертикова Е.А., Барнашова Е.К., Брит О.Д.</i> ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ СОРТОВ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО	172
<i>Суслова О.В., Лой Н.Н., Харламов В.А.</i> ВЛИЯНИЕ ДОЗ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФИТОПАТОГЕННУЮ МИКРОФЛОРУ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ	177
<i>Титова Д.И., Харламов В.А., Меджидов И.М., Басырова Д.В.</i> ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СЕМЕНА, ЗАГРЯЗНЕННЫЕ МИКОТОКСИНАМИ	180
<i>Харламов В.А., Тхорик О.В., Меджидов И.М., Титова Д.И., Горбатов С.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ (ДО 300 КЭВ) ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ АГРОКУЛЬТУР (ОБЗОР)	182
<i>Чибисова М.С., Близнюк У.А., Зубрицкая Я.В., Чуликова Н.С., Никитченко А.Д., Борщеговская П.Ю., Малюга А.А., Черняев А.П., Родин И.А.</i> ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВСХОЖЕСТЬ, УРОЖАЙНОСТЬ И ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	185
<i>Чиж Т.В., Павлов А.Н., Дорн Ю.А., Снегирев А.С., Зейрук В.Н.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЦЕЛЯХ БОРЬБЫ С КАРАНТИННЫМИ ВРЕДИТЕЛЯМИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО КАРТОФЕЛЯ	188
<i>Шимко П.А., Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Зубрицкая Я.В., Малюга А.А., Родин И.А., Черняев А.П., Чуликова Н.С., Юров Д.С.</i> ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА АКТИВНОСТЬ ФИТОПАТОГЕННЫХ ГРИБОВ	192

Секция**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ195**

- Блинова Я.А., Подлуцкий М.С., Арышева С.П., Свириденко Д.Г., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Бондаренко Е.В.*
ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АГРОМЕЛИОРАНТОВ НА ДИНАМИКУ ПАРАМЕТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ
ХЛОРОФИЛЛА У ОВСА ПОСЕВНОГО, ВЫРАЩЕННОГО НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ СВИНЦОМ ПОЧВЕ 196
- Гусева О.А.*
ДИНАМИКА КОМПОНЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ И ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ
ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЬЯХ ЯЧМЕНЯ В ОТВЕТ НА ОДНОКРАТНОЕ γ -ОБЛУЧЕНИЕ 199
- Дикарев А.В., Дикарев Д.В., Крыленкин Д.В.*
ОЦЕНКА СВЯЗИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННОГО СУБСТРАТА И ИНТЕНСИВНОСТИ ТОКСИЧЕСКОГО
СТРЕССА У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ 204
- Жерненков А.О., Парамонова Т.А., Кузьменкова Н.В.*
НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs РАЙОНА ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ В ПРОДУКЦИИ КАРТОФЕЛЯ:
ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА ИЗ ПОЧВ, ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ВАРКИ НА ОСТАТОЧНОЕ
СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДА, РИСКИ РАЗВИТИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ 207
- Ковалев И.И., Булгарова О.И., Ларина Д.Д., Гурина Р.Р.*
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ
В ЭКОСИСТЕМАХ ГОРНОГО МАССИВА ХИБИНЫ 211
- Кречетников В.В., Титов И.Е., Кречетникова Е.О., Кузнецов В.К.*
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
СИТУАЦИИ НА ЗЕМЛЯХ ТУЛЬСКОГО НИИСХ 214
- Кречетников В.В., Титов И.Е., Шубина О.А., Кречетникова Е.О.*
СОЗДАНИЕ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ОТЧУЖДЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ..... 218
- Крыленкин Д.В., Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Дикарев А.В., Мезина М.В., Саруханов А.В., Корнеев Ю.Н.*
СОДЕРЖАНИЕ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ И ПЕРЕХОД В РАСТЕНИЯ ^{238}U И ^{232}Th
НА ПАСТБИЩНЫХ УЧАСТКАХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В АЙГУРСКОЙ ПРОВИНЦИИ СТЕПНЫХ
ЛАНДШАФТОВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ 222
- Кудако И.С., Кудако С.А., Калиниченко С.А.*
РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ^{137}Cs В ВОЗДУШНЫХ АЭРОЗОЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОБИЛЬНОЙ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ 226
- Кулешова Т.Э., Эзерина Е.М., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В., Синявина Н.Г., Панова Г.Г.*
ФИТОМОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРНЕОБИТАЕМОЙ СРЕДЕ РАЗЛИЧНЫХ
ТИПОВ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР 229
- Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В.*
МОНИТОРИНГ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ
НА ТЕРРИТОРИЯХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ 231
- Маркова М.В., Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Ступакова Г.А.*
ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ РАЗНЫХ ТИПОВ ПОЧВ 235
- Мезина М.В., Анисимов В.С., Фесенко С.В., Анисимова Л.Н., Крыленкин Д.В., Дикарев А.В.*
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ^{137}Cs И ^{40}K В БИОГЕОЦЕНОЗАХ ПАСТБИЩНЫХ УЧАСТКОВ,
РАСПОЛОЖЕННЫХ В АЙГУРСКОЙ ПРОВИНЦИИ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ
СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ 238
- Микаилова Р.А., Спиридонов С.И., Нуштаева В.Э.*
ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА НАСЕЛЕНИЕ ОТ ВЫБРОСОВ КУРСКОЙ АЭС С УЧЕТОМ
РЕГИОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ 242
- Милейко А.А.*
ОЦЕНКА СТИМУЛИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ БИОМАССЫ ЛИШАЙНИКОВ В ОТНОШЕНИИ *SORGHUM*
SUDANENSE (PIPER) STARF. 246

<i>Мингареева Е.В., Санжарова Н.И., Фесенко С.В.</i> СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ¹³⁷ Cs ГЛОБАЛЬНЫХ И ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ В ПОЧВАХ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОН ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	249
<i>Муликова А.Б., Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Мамырбаева А.С., Богатырева Т.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО, ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОГО И РАДИАЦИОННОГО СОСТАВА ВОД ОБЪЕКТОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА	251
<i>Надеева А.М., Мамырбаева А.С., Айдарханова А.К., Муликова А.Б., Маден Б.Е.</i> РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ИХ КАЧЕСТВО	254
<i>Орлов П.М., Аканова Н.И., Ермаков А.А.</i> ОЦЕНКА ДОЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОЧИХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ	257
<i>Радин А.А., Митрофанов Е.М., Раздайковин А.Н., Радин С.А.</i> ВОЗМОЖНОСТИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В РАДИАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСА	260
<i>Рыбак А.В., Майстренко Т.А.</i> ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПРИ РАДИЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЧВЫ НА БИОМАРКЕРЫ СТРЕССА У ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ <i>EISENIA FETIDA</i>	262
<i>Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Суслов А.А., Баланова О.Ю.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГУМИТОН ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОВСА НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОМ ЧЕРНОЗЕМЕ	266
<i>Середин Т.М., Ушакова О.В., Баранова Е.В., Солдатенко А.В.</i> ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ РОДА <i>ALLIUM L.</i>	271
<i>Смирнова А.С., Ханова А.С., Гераськин С.А.</i> СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОСТИ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ <i>PINUS SYLVESTRIS L.</i>	274
<i>Тамразова А.Р.</i> УДЕЛЬНЫЕ АКТИВНОСТИ ²²⁶ Ra, ²³⁸ U, ²³² Th И ИХ ЗАПАСЫ В АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ И АГРОСЕРОЙ ПОЧВАХ ЛЕСНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОН ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ	277
<i>Титов И.Е., Кречетников В.В., Спиридонов С.И., Карпенко Е.И.</i> СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОДЭК	282
<i>Чижова М.С., Денисенко А.И., Кадурина А.А., Миличенко А.А.</i> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕПАРАТА ГЕОТОН В УСЛОВИЯХ ДОНБАССА	285
<i>Шималина Н.С.</i> «ПАМЯТЬ О СТРЕССЕ» У ПОДОРОЖНИКА БОЛЬШОГО ИЗ ЗОНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ПОСЛЕ СНЯТИЯ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ	288
<i>Шиманская Н.С., Иванова С.В., Серков В.А., Ущаповский И.В.</i> ВЛИЯНИЕ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ КОНОПЛИ ПОСЕВНОЙ	292
ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА «BIOSKILLS 2024: НАУКА КАК ОБРАЗ ЖИЗНИ»	296
<i>Братухина М.О., Андрейчикова О.Н., Шаврина К.Е., Маркова М.В., Эдомская М.А.</i> ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГУБНЫХ ПОМАДАХ ИЗВЕСТНЫХ БРЕНДОВ	297
<i>Купцова П.С., Ольховая Е.Р., Лапенко А.К., Комарова Л.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ РАДИОПРОТЕКТОРНЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ	300
<i>Михайлов А.В., Лукашенко С.Н., Эдомская М.А., Томсон А.В.</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ ПО ВЕГЕТАТИВНЫМ ОРГАНАМ ДИКОРАСТУЩИХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ С ПОДЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТРИТИЯ.....	303

<i>Тендитник Е.А., Ольховая Е.Р., Купцова П.С., Лапенко А.К., Чудновец Т.А., Комарова Л.Н., Ляпунова Е.Р.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МЕЛАТОНИНА	305
<i>Терентьева У.А., Лебедева М.В., Ражина О.Л., Таранов В.В.</i> ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО К ИМИДАЗОЛИНОНАМ РАПСА С ПОМОЩЬЮ ГЕНОМНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ	307
<i>Федунова Е.В.а, Михайлов А.В., Томсон А.В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛЯРНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ ДЛЯ ЖИДКОСТНО-СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КОКТЕЙЛЕЙ МАРКИ «ЛИРА»	309
<i>Шаврина К.Е., Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Шаповалов С.Г.</i> ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ПЛУТОНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ	311
<i>Шубина С.И., Подлуцкий М.С., Воронежская В.С., Самад С., Байк А., Бондаренко В.С., Болдырев С.В., Лукашевич М.И., Бен С., Бондаренко Е.В.</i> ОТВЕТ ПРОРОСТКОВ ЛЮПИНА БЕЛОГО, ПОДВЕРГШИХСЯ ЗАРАЖЕНИЮ АГРЕССИВНЫМ ШТАММОМ ФИТОПАТОГЕНА <i>COLLETOTRICHUM LUPINI</i> НА УРОВНЕ АНАЛИЗА ТРАНСКРИПТОМА	314

ФЕНОМЕНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

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



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

PHENOSPEx
Smart Plant Analysis



PHENOMICS.RU

Секция

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ
ХОЗЯЙСТВЕ**

GENETIC TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ОЦЕНКЕ ПРОДУКТИВНЫХ КАЧЕСТВ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫМЕНИ У МОЛОЧНЫХ КОЗ

Алимова В.Р.^а, Синякина Е.В., Галанова Е.С., Сулыга Н.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», 356241, Ставропольский край, Шпаковский район, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49, Российская Федерация
e-mail: ^аalimova-lera-01@mail.ru

В данной статье рассматриваются математические аспекты оценки удоя и морфологических признаков вымени молочных коз, что является важной темой в области животноводства. Удой и состояние вымени напрямую влияют на производительность и качество молока, что делает их ключевыми факторами в селекции и разведении. Особое внимание уделяется морфологическим характеристикам вымени, таким как форма, размер и симметрия, а также их взаимосвязи с производственными показателями. Так же приводится анализ математических методов оценки молочной продуктивности у коз. Результаты исследования подчеркивают важность комплексного подхода к селекции, включающего как продуктивные, так и морфологические характеристики. Статья предлагает практические рекомендации для фермеров и селекционеров, направленные на повышение качества молока и здоровья животных через улучшение генетики и морфологии вымени.

Ключевые слова: удой, параметры молочных желез, морфология, молочная продуктивность коз, математические методы

Введение

Козоводство является одной из важнейших отраслей сельского хозяйства, обеспечивающей население высококачественным молоком и молочными продуктами. В последние годы наблюдается растущий интерес к разведению молочных коз, что связано с повышением спроса на натуральные молочные продукты.

Важнейшими показателями продуктивности молочных коз являются удой и качество молока, которые в значительной степени зависят от морфологических характеристик вымени.

Морфология вымени, включая его форму, размер, симметрию и состояние, играет ключевую роль в определении продуктивных способностей животного. Однако наличие различных дефектов вымени, таких как асимметрия, воспалительные процессы и другие аномалии, может негативно сказаться на производительности и здоровье коз. Поэтому всесторонняя оценка данных параметров является актуальным направлением исследований, позволяющим улучшить селекцию и разведение молочных коз.

Цель исследования – анализ математических методов оценки морфологических свойств вымени и молочной продуктивности у коз.

Методы исследований

Интенсификация отрасли молочного козоводства подразумевает внедрение промышленных технологий производства козьего молока, в связи с этим меняются и требования к оценке животных. На первый план выходят такие показатели, как

приспособленность к машинному доению, крепкий экстерьер и увеличение генетического потенциала продуктивности.

Оценка вымени у коз имеет важное значение, поскольку морфологические характеристики могут существенно влиять на продуктивность животных. Важно учитывать такие аспекты, как размер и расположение вымени относительно брюшной стенки, равномерность развития долей, состояние брюшных и подкожных вен, а также степень развитости волосяного покрова. Также необходимо оценивать соски по их форме и размеру [1, 2].

Визуальная оценка молочной железы дополняется измерением основных параметров, включая обхват, длину, ширину, глубину, расстояние от вымени до земли, а также длину и диаметр сосков и расстояние между ними (рис. 1).

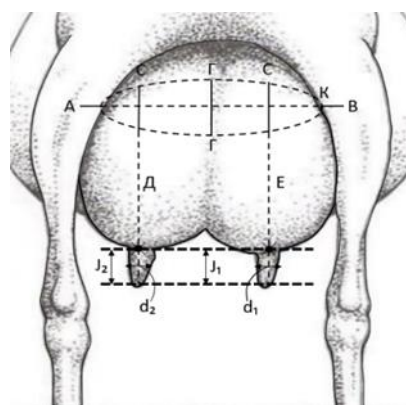


Рисунок 1. Промеры вымени у коз

Для оценки размеров вымени у коз используются различные методы измерения, которые позволяют получить точные данные о его размере и объеме. Одним из распространенных способов является использование мерной ленты, с помощью которой можно

измерить окружность вымени в самых широких местах. Также применяется циркуль, который позволяет производить измерения диаметра вымени, что важно для оценки его симметрии и общего состояния (табл.1).

Таблица 1

Способы измерения параметров вымени у коз

Промеры	Инструменты
Ширина вымени	Циркулем – точки ГГ
Длина вымени	Циркулем в точках АК
Обхват вымени	Мерной лентой – точки АВ
Глубина вымени	Мерной лентой – точки ЕС и АС
Длина сосков	Мерной лентой – j ₁ ; j ₂
Диаметр сосков	Мерной лентой -- d ₁ ; d ₂

Пригодность молочных коз к машинному доению во многом определяется морфологическими характеристиками их вымени и сосков. На основании исследований, проведенных Л.П. Соловьевым и Е.В. Ремизовым, установлено, что с каждой лактацией происходят значительные изменения в этих анатомических структурах, особенно начиная с шестой лактации. Важно отметить, что форма, размер и расположение сосков имеют решающее значение не только для эффективности процесса доения, но и для predisposedности к патологическим состояниям, таким как мастит. Авторы указывают, что среди коз годовалого возраста наиболее часто встречается коническая форма сосков (72.6 %), в то время как цилиндрическая и бутылчатая формы имеют значительно меньшую распространенность (13.2 %). Грушевидная форма сосков является крайне редким явлением (рис. 2) [3].

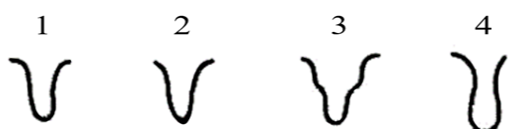


Рисунок 2. Форма сосков вымени

(слева направо и сверху вниз):

- 1 – цилиндрическая, 2 – коническая,
3 – бутылчатая, 4 – грушевидная

Таким образом, отбор по форме вымени в молочном козоводстве способствуют созданию популяции высокопродуктивных животных пригодные к машинному доению [1, 3].

Основной целью в селекционной работе в козоводстве является улучшение продуктивных качеств. У коз, как и у крупного рогатого скота, молочная продуктивность учитывается на основе контрольных доек с первых дней лактации до завершения лактационного периода (ГОСТ Р 53430-2009).

В научно-исследовательской работе для всесторонней оценки коров по молочной продуктивности были разработаны математические методы оценки

лактации, которые могут быть актуальны и в козоводстве.

К наиболее информативным относятся следующие методы:

1) Пересчет полученного молока на базисную жирность и белковомолочность; для коз базисный жир равен 3.5 %, белок – 3.0 % [4].

2) Коэффициент молочности (КМ), рассчитываемый по формуле 1:

$$КМ = \frac{\text{удой за 305 дней лактации} \times 100}{\text{живая масса}} \quad (1)$$

Данный коэффициент показывает эффективность использования животного.

3) Полноценность и устойчивость лактации рассчитывают по формулам 2 и 3.

Коэффициент полноценности лактации (КПЛ) по В. Б. Веселовскому (2):

$$КПЛ = \frac{\text{удой за лактацию} \times 100}{\text{высший суточный удой} \times \text{число дойных дней}} \quad (2)$$

Коэффициент постоянства лактации (К_{Пост.Лакт.}) – по Fuhner в 1959 г. в переработке А.А. Аксенниковой в 1964 г.

$$К_{\text{пост. лакт.}} = \frac{\text{удой за 4,5,6 мес.лактации}}{\text{удой за 1,2,3 мес.лактации}} \times 100 \quad (3)$$

Чем данные индексы выше, тем более устойчивая и плавная лактация. Следовательно, козы с данными характеристиками будут обладать желательными для промышленного производства качествами.

Заключение

В условиях стремительного роста производственных требований и потребностей рынка важно уделять внимание морфологии и возможным дефектам молочных коз. Глубокий анализ этих аспектов способствует более эффективной селекции, что, в свою очередь, повышает продуктивность и устойчивость животных к неблагоприятным условиям содержания.

Список литературы

1. Молочность и некоторые морфологические свойства вымени коз разного происхождения / М.В. Забелина, Т.Б. Ледеяев, В.В. Муратова, Д.Д. Горюшко // Товароведение, технология и экспертиза: инновационные решения и перспективы развития: матер. III нац. науч.-практич. конф. (Москва, 02 июня 2022 года). М.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», 2022. С. 134-138.

2. Качалова А.С. Патологии вымени у коз зааненской породы // Материалы 78-й международной научной конференции молодых ученых и студентов СПбГУВМ (Санкт-Петербург, 01-08 апреля 2024 года). СПб: Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, 2024. С. 100-101.

3. Соловьева Л.П., Ремизова Л.П. Морфология молочной железы лактирующих коз в возрастном

аспекте // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. 2012. № 4. С. 74-80.

4. Влияние породной принадлежности коз на молочную продуктивность, биохимические показатели молока и его пищевую ценность / М.В. Забелина, Т.Б. Ледеяев, Т.С. Преображенская, Л.В. Данилова // Овцы, козы, шерстяное дело. 2022. № 3. С. 31-34. <https://doi.org/10.26897/2074-0840-2022-3-31-34>.

5. Зуева Е.М., Владимиров Н.И. Молочная продуктивность и некоторые экстерьерные особенности коз разных пород пригородной зоны г. Барнаула // Наука и инновации: векторы развития: сб. матер. междунауч.-практич. конф. молодых ученых. В 2-х книгах (Барнаул, 24-25 октября 2018 года). Том Книга 1. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2018. С. 156-158.

6. Продуктивность и характеристика коз молочных пород / Ж.К. Шадьярова, Д.Б. Курмангалиева, Н.Н. Ланцева, Г.Т. Юсупова // Вестник Алматинского технологического университета. 2019. № 2. С. 9-15.

APPLICATION OF MATHEMATICAL METHODS IN ASSESSING THE PRODUCTIVE QUALITIES AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF UDDERS IN DAIRY GOATS

Alimova V.R., Sinyakina E.V., Galanova E.S., Sulyga N.V.

North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, Nikonov str. 49, Mikhailovsk, Shpakovsky district, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241

This article discusses the mathematical aspects of assessing milk yield and morphological characteristics of udder of dairy goats, which is an important topic in the field of animal husbandry. Milk yield and udder condition directly affect milk productivity and quality, which makes them key factors in breeding and breeding. Special attention is paid to the morphological characteristics of the udder, such as shape, size and symmetry, as well as their relationship with production indicators. An analysis of mathematical methods for evaluating dairy productivity in goats is also provided. The results of the study emphasize the importance of an integrated approach to breeding, including both productive and morphological characteristics. The article offers practical recommendations for farmers and breeders aimed at improving the quality of milk and animal health through improving the genetics and morphology of the udder.

Keywords: *milk yield, parameters of mammary glands, morphology, milk productivity of goats, mathematical methods*

Introduction

Goat breeding is one of the most important branches of agriculture, providing the population with high-quality milk and dairy products. In recent years, there has been a growing interest in the breeding of dairy goats, which is associated with an increase in demand for natural dairy products.

The most important indicators of the productivity of dairy goats are milk yield and milk quality, which largely depend on the morphological characteristics of the udder.

The morphology of the udder, including its shape, size, symmetry and condition, plays a key role in determining the productive abilities of the animal. However, the presence of various udder defects, such as asymmetry, inflammatory processes and other abnormalities, can negatively affect the productivity and health of goats. Therefore, a comprehensive assessment of these parameters is an urgent area of research that allows improving the breeding and breeding of dairy goats.

ПОИСК КЛАСТЕРОВ ГЕНОВ ШТАММА *STREPTOMYCES CARPATICUS* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993), ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ПРОДУКЦИЮ БИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Батаева Ю.В.^{1,а}, Григорян Л.Н.^{2,б}, Батаева А.Д.^{1,в}

¹ 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

² Федеральное государственное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20а, Российская Федерация
e-mail: ^аaveatab@mail.ru, ^бlilyagrigroryan90@mail.ru, ^вadbataeva2006@yandex.ru

Продукты, полученные из микроорганизмов, служат жизненно важным ресурсом ценных фармацевтических и сельскохозяйственных препаратов. Стрептомицеты – наиболее распространенные бактерии в окружающей среде с высокой способностью синтезировать разнообразные и ценные продукты со значительной биологической активностью в медицине, пищевой промышленности и агрономии. Современные методы молекулярной биологии позволяют обнаружить генетические кластеры противомикробных веществ в клетке бактерий. В результате проведенных исследований в клетках штамма обнаружены антибиотики, представляющие большой интерес для растениеводства.

Ключевые слова: *Streptomyces*, геномный анализ, антибиотики, кластеры генов

Актинобактерии характеризуются высокой экологической пластичностью, лабильными ферментативными системами и сложным вторичным метаболизмом [1]. Согласно исследованиям распространенности и видового разнообразия актинобактерий, культуры рода *Streptomyces* составляют 80-95 % всех актинобактерий, населяющих почву. Среди известных биологически активных микробных вторичных метаболитов фармакологического и агрохимического применения подавляющее большинство (70-80 %) продуцируют стрептомицеты.

Бактерии рода *Streptomyces* продуцирует большое разнообразие химических структур (поликетиды, пептиды, макролиды, индолы, аминокликозиды, терпены и т.д.) [2, 3], посредством которых они оказывают регулирующее воздействие на растение и контролируют развитие фитопатогенов [4].

Разнообразие молекул с антибактериальной активностью, закодированных в геноме, находится в «молчащем», репрессированном состоянии. В связи с этим возникает необходимость применения методов геномного редактирования и метагеномного анализа для идентификации новых биосинтетических кластеров антибиотиков и изменения экспрессии соответствующих генов, приводящих к синтезу потенциально новых молекул с антибактериальной активностью. Используя методы анализа генома *in silico*, было обнаружено, что геномы *Streptomyces* содержат кластеры генов 25-70 биологически активных соединений, но только небольшая часть этих веществ синтезируется в лаборатории с использованием методов культивирования [5]. Например, геном штамма *S.*

clavuligerus содержит множество генных кластеров вторичных метаболитов, таких как терпены, пенталены, фитоены, сидерофоры и антибиотики [6, 7].

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) выделен из бурых полупустынных почв с очень высокой степенью засоления на территории Астраханской области Российской Федерации. Учитывая высокую степень полиморфизма *Streptomyces*, несомненно, важно, с научной и практической точек зрения, изучить уровень специфичности и биологической активности штамма *S. carpaticus* SCPM-O-B-9993. Ранее выполненные лабораторные исследования показали, что штамм обладает фитостимулирующими, антифунгальными, антиоксидантными, инсектицидными, противовирусными свойствами и представляет интерес для растениеводства [3].

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) поддерживали на крахмально-казеиновом агаре при 28 °С. Геном штамма был секвенирован и полностью собран [3], аннотирован с помощью NCBI Prokaryotic Genome Annotation Pipeline (PGAP) версии 4.6, Prokka и RAST.

Штамм *S. carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) имеет темно-коричневый воздушный мицелий и вишнево-красный субстратный мицелий. Оптимальная температура роста составляет 28 °С. Оптимальный pH составляет 7.0-7.1. Спороцисты бывают прямыми или скрученными, короткими. Споры овальные или шаровидные с плотной оболочкой, размером 0.5-1.0×1.0-1.1 мкм. Изучение компонентного состава суспензии и экстрактов (водно-спиртовых, метаноловых и гексановых) штамма *S. carpaticus* RCAM04697

(SCPM-O-B-9993) показало наличие вторичных метаболитов – спиртов, альдегидов, углеводов, сложных эфиров, сульфатов и других групп низкомолекулярных органических соединений [2].

Биосинтез антибиотиков микроорганизмами имеет приспособительное значение, а также является наследственно закрепленной особенностью и регулируется особыми генами. Штамм RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) является единственным представителем вида *S. carpaticus*, чей геном был полностью секвенирован (данные о последовательности генома штамма *S. carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) можно найти в базе данных Genbank под номером доступа CP104005.1 (BioProject PRJNA269675, BioSample SAMN30493425). Геном содержит 5 331 кодирующую последовательность, из которых 2 139 (40.1 %) функционально аннотированы. Сборка генома состояла из одной линейной хромосомы 5 968 715 п.н., состава GC 72.84 %. Плазмиды не обнаружены. В ходе аннотации и анализа генома было идентифицировано 5206 кодирующих белок последовательностей, 60 последовательностей tPHK, 15 последовательностей rPHK (5 - 5S, 5 - 16S, 5 - 23S) и 8 локусов CRISPR.

Геном типового штамма *S. carpaticus* на сегодняшний день не секвенирован. Поскольку штамм RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) является биотехнологически перспективным продуцентом вторичных метаболитов, проанализирована генетическая организация кластеров продукции вторичных метаболитов. Исходной единицей в биосинтезе антибиотиков ансамицина стрептомицетами является 3-амино-5-гидроксibenзойная кислота (АНБА). Геном штамма RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) содержит последовательность генов, продукты которых контролируют путь биосинтеза АНБА из UDP-глюкозы, состоящий из 10 реакций. Путь биосинтеза биологически активных веществ в геноме штамма RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) включает создание ключевых метаболитов, таких как изопентенилпирофосфат, геранил-PP, фарнезил-ПП и геранил-геранил-ПП, которые являются предшественниками многих вторичных метаболитов у бактерий рода *Streptomyces*.

Анализ генома является перспективным направлением, которое обнаруживает пути микробного биосинтеза, облегчая поиск активных метаболитов. В настоящее время существуют альтернативы геномному анализу, такие как метаболомный анализ (в сочетании с дупликацией известных соединений)

для оценки наличия потенциально новых соединений в культуре штаммов. Таким образом, изучаемый штамм *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) является биотехнологически перспективным продуцентом вторичных метаболитов с полезными свойствами.

Список литературы

1. An actinobacterial isolate, *Streptomyces* sp. YX44, produces broad-spectrum antibiotics that strongly inhibit *Staphylococcus aureus* / T.-L. Chang, T.-W. Huang, Y.-X. Wang [et al.] // Microorganisms. 2021. № 9 (3). P. 630. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030630>
2. Изучение метаболитов *Streptomyces carpaticus* RCAM04697 для создания экологически чистых средств защиты растений / Ю.В. Батаева, Л.Н. Григорян, Е.А. Курашов [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 172-178. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-3-172-178>
3. Biological activity and composition of metabolites of potential agricultural application from *Streptomyces carpaticus* K-11 RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) / Yu.V. Bataeva, L.N. Grigoryan, A.G. Bogun [et al.] // Microbiology. 2023. № 92 (3). PP. 459-467. <https://doi.org/10.1134/S0026261723600155>
4. Батаева Ю.В., Григорян Л.Н. Актинобактерии: противовирусная и фитостимулирующая активность // Биотехнология. 2024. Т. 40. № 2. С. 84-92. <https://doi.org/10.56304/S0234275824020042>
5. Genome mining of biosynthetic and chemotherapeutic gene clusters in *Streptomyces* bacteria / K.C. Belknap, C.J. Park, B.M. Barth, C.P. Andam // Scientific Reports. 2020. № 10 (1). P. 2003. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58904-9>
6. Draft genome sequence of *Streptomyces clavuligerus* NRRL 3585, a producer of diverse secondary metabolites / J.Y. Song, H. Jeong, D.S. Yu [et al.] // Journal of Bacteriology. 2010. № 192 (23). PP. 6317-6318. <https://doi.org/10.1128/JB.00859-10>
7. Whole genome analysis and assessment of the metabolic potential of *Streptomyces carpaticus* SCPM-O-B-9993, a promising phytostimulant and antiviral agent / Y. Bataeva, Y. Deegan, A. Bogun [et al.] // Biology. 2024. № 13. P. 388. <https://doi.org/10.3390/biol13060388>

SEARCH FOR GENE CLUSTERS OF *STREPTOMYCES CARPATICUS* RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) RESPONSIBLE FOR THE PRODUCTION OF BIOACTIVE SUBSTANCES

Bataeva Yu.V.¹, Grigoryan L.N.², Bataeva A.D.¹

¹ Russian State Agrarian University – MTAА, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Astrakhan Tatishchev State University», Tatishcheva st. 20a, Astrakhan, Russian Federation, 414056

Products obtained from conveyors are essential resource resources for pharmaceutical and agricultural preparations. Streptomycetes are the most common bacteria in the external environment with a high ability to synthesize other and valuable products with biological activity in medicine, food industry and agronomy. Modern methods of molecular biology allow adding genetic clusters of antimicrobial substances to the cell. As a result of the conducted research, strains of antibiotics were found in the cells, which are of great interest for plant growing.

Keywords: *Streptomyces, genomic analysis, antibiotics, gene clusters*

The genome of the type strain of *S. carpaticus* has not been sequenced to date. Since strain RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) is a biotechnologically promising producer of secondary metabolites, the genetic organization of secondary metabolite production clusters was analyzed. The starting unit in the biosynthesis of ansamycin antibiotics by streptomycetes is 3-amino-5-hydroxybenzoic acid (AHBA). The genome of strain RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) contains a sequence of

genes whose products control the AHBA biosynthesis pathway from UDP-glucose, consisting of 10 reactions. The biosynthetic pathway of biologically active substances in the genome of strain RCAM04697 (SCPM-O-B-9993) includes the creation of key metabolites such as isopentenyl pyrophosphate, geranyl-PP, farnesyl-PP and geranyl-geranyl-PP, which are precursors of many secondary metabolites in bacteria of the genus *Streptomyces*.

УДК 577.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА VIGS ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МОБИЛОМА *N. BENTHAMIANA*

Болотина А.А.^{1,2,а}, Меркулов П.Ю.^{1,2}, Казанцев М.Ю.^{1,2}, 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: "bolotina.a@yandex.ru"

Создание новых генотипов растений является приоритетной задачей селекции и напрямую зависит от ресурса в виде генетического разнообразия. Умение использовать мутагенный потенциал мобильных элементов (МЭ) может стать важным инструментом для получения исходного материала для селекции. В нашем исследовании метод вирус-индуцированного сайленсинга генов (VIGS) был применен для активации МЭ у *Nicotiana benthamiana*. Этот метод позволяет подавлять эпигенетические системы контроля, такие как РНК-направленное ДНК метилирование (RdDM), что приводит к релаксации механизма сайленсинга LTR-ретротранспозонов (LTR-RT). Целью нашего исследования было подавление гена *NRPD1*, одного из ключевых компонентов пути RdDM, с целью активации LTR-ретротранспозонов у *N. benthamiana*. Методом нанопорового секвенирования внехромосомных кольцевых ДНК (вкДНК) была подтверждена транспозиционная активность мобильных элементов в условиях теплового стресса и вирусного заражения.

Ключевые слова: *Nicotiana benthamiana, мобильные элементы, вирус-индуцированный сайленсинг генов, LTR-ретротранспозоны, тепловой стресс, нанопоровое секвенирование*

Перспективы возможности управления активностью МЭ, а также использования их мутагенного потенциала для создания новых генотипов растений, стимулируют разработку новых биотехнологических подходов [1, 2]. VIGS представляет собой один из методов, способных подавлять системы эпигенетического контроля активности МЭ [3]. *N. benthamiana*

широко используется как модель для VIGS благодаря особенностям его генома и близости к сельскохозяйственным культурам. Однако применение VIGS для активации мобильных элементов ограничено из-за недостаточной информации о его мобиломе.

С целью обнаружения активных мобильных элементов у *N. benthamiana* было проведено подавление

гена *NRPD1*, который играет важную роль в метилировании ДНК и контроле активности транспозонов. Мы использовали метод VIGS, основанный на векторе вируса погрешности табака (TRV), и провели агроинфильтрацию листьев растений. Для усиления транспозиционной активности был применен тепловой стресс. Выделение вДНК и их последующее нанопоровое секвенирование позволили провести детекцию транспозиционной активности мобильных элементов как в контрольных растениях, так и в обработанных тепловым стрессом.

Анализ полученных данных выявил, что подавление гена *NRPD1* вызывает значительное повышение активности LTR-ретротранспозонов. Впервые был идентифицирован активный мобильный элемент, названный нами «*Smoky*», который продемонстрировал высокую транспозиционную активность в условиях вирусного заражения и теплового стресса. Этот результат открывает новые возможности для изучения мобильных элементов в геноме *N. benthamiana* и создания новых подходов к управлению геномной изменчивостью растений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №22-64-00076.

Список литературы

1. Transposable Elements and Stress in Vertebrates: An Overview / A.M. Pappalardo, V. Ferrito, M.A. Biscotti [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2021. V. 22. № 4. P. 1970.

2. Deneweth J., Van de Peer Y., Vermeirssen V.J.B.g. Nearby transposable elements impact plant stress gene regulatory networks: a meta-analysis in *A. thaliana* and *S. lycopersicum* // BMC Genomics. 2022. V. 23. № 1. P. 18.

3. Kirov I. Toward Transgene-Free Transposon-Mediated Biological Mutagenesis for Plant Breeding // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24. № 23. P. 17054.

USING THE VIGS METHOD TO STUDY THE MOBILOME OF *N. BENTHAMIANA*

Bolotina A.A.^{1,2}, Merkulov P.Yu.^{1,2}, Kazantsev M.Yu.^{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

The creation of new plant genotypes is a priority task in breeding and directly depends on the resource of genetic diversity. The ability to harness mutagenic potential can become an important tool for obtaining initial material for breeding. In our study, we applied the virus-induced gene silencing (VIGS) method to activate TEs in *Nicotiana benthamiana*. This method allows the suppression of epigenetic control systems, such as RNA-directed DNA methylation (RdDM), leading to the relaxation of LTR retrotransposon (LTR-RT) silencing mechanisms. The goal of our research was to suppress the *NRPD1* gene, a key component of the RdDM pathway, in order to activate LTR retrotransposons in *N. benthamiana*. Using nanopore sequencing of extrachromosomal circular DNA (eccDNA), we confirmed the transpositional activity of TEs under conditions of heat stress and viral infection.

Keywords: *Nicotiana benthamiana*, transposable elements, virus-induced gene silencing, LTR retrotransposons, heat stress, nanopore sequencing

The potential to control TE activity and harness their mutagenic potential for creating new plant genotypes drives the development of innovative biotechnological approaches. VIGS is one method capable of suppressing the epigenetic control systems governing TE activity. *N. benthamiana* is widely used as a model for VIGS due to its genomic features and similarity to agricultural crops. However, the application of VIGS to activate transposable elements is limited by the lack of information about its mobilome.

To identify active transposable elements in *N. benthamiana*, we targeted the *NRPD1* gene, which plays a significant role in DNA methylation and transposon silencing. We used a VIGS vector based on the tobacco

rattle virus (TRV) and conducted agroinfiltration of *N. benthamiana* leaves. Heat stress was applied to enhance TE activity. Isolation of eccDNA followed by nanopore sequencing allowed the detection of TE transpositional activity in both control and heat-stressed plants.

Data analysis showed that suppression of the *NRPD1* gene significantly increased the activity of LTR retrotransposons. For the first time, we identified an active transposable element, which we named "Smoky," demonstrating high transpositional activity under viral infection and heat stress. These findings open new avenues for studying transposable elements in the *N.*

УДК 577.21

ГЕНОМНОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ РЫЖИКА ПОСЕВНОГО ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ХОЗЯЙСТВЕННО ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

Веселкин А.А.^а, Лебедева М.В., Ражина П.Л., Козенкова П.И., Таранов В.В.

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

Цель данного исследования – подбор условий для эффективного трансгеноза нескольких перспективных сортов рыжика отечественной селекции в перспективе их дальнейшего геномного редактирования.

Ключевые слова: *Camelina sativa*, CRISPR-Cas9 и геномное редактирование

Рыжик посевной (*Camelina sativa*) – однолетнее травянистое растение сем. *Brassicaceae*. Семена содержат до 42 % масла, которое традиционно используется в пищу. Рыжик отличается коротким вегетационным периодом (90 дней), а также способностью давать урожай при неблагоприятных условиях для других культурных растений (бедные почвы, засуха, заморозки и т.д.). Хотя раньше рыжик широко культивировался особенно в Северной Европе и России, в прошлом столетии он был повсеместно забыт, вытесненный другими масличными культурами. По этой причине в XX веке рыжик мало подвергался селекционной работе. Однако в XXI веке рыжиковое масло стало использоваться для создания биотоплива второго поколения (преимущественно авиакеросина). И сейчас, например, компания Lufthansa ежегодно для заправки своих самолетов использует более 7 млн т биокеросина из рыжикового масла. Интерес к культуре растет как среди производителей, так и селекционеров. В России за последние 15 лет были созданы 15 новых сортов рыжика. Но селекционная работа осложняется низкой генетической вариабельностью и гексаплоидностью вида. Эти трудности помогают преодолеть современные методы генной инженерии, в частности CRISPR-Cas9. За последние годы ряд зарубежных исследователей с помощью технологий геномного редактирования успешно получили формы *Camelina sativa* с качественно новыми хозяйственно ценными признаками [1]. Изменились жирнокислотный состав масла, содержание масла в семенах, их размер и общая семенная продуктивность. Для успешного геномного редактирования необходима эффективная трансформация, поэтому целью данного исследования стал подбор его условий на примере нескольких перспективных отечественных сортов рыжика.

При планировании эксперимента за основу был взят протокол агробактериальной трансформации методом погружения соцветий (floral dip), который показал свою эффективность на *Arabidopsis thaliana*, близком родственнике *C. sativa* [2]. Ключевыми параметрами этого подхода является выбор штамма *Agrobacterium tumefaciens*, концентрация органосиликонового ПАВ Silwet® L-77, который обеспечивает проникновение агробактерий в ткани растения, и время экспозиции. В некоторых случаях для увеличения эффективности могут применяться повторение процедуры 2-3 раза с интервалом в неделю и использование вакуума [3].

В нашей работе сравнивались два штамма агробактерий, AGL0 и EHA105, и две концентрации Silwet® L-77: 0.02 и 0.05 %. Трансформации подвергались растения 3 сортов ярового рыжика отечественной селекции: Омич, Исылкулец и Кристалл – по 4 растения для каждой повторности. Трансформация проводилась вектором, содержащим репортерную кассету RUBY [4], экспрессирующую гены, обеспечивающие синтез пигмента беталаина. Использование такого маркера позволяет быстро оценить эффективность трансформации каждого варианта – у трансгенных семян изменяется окраска с рыжего на красный. Отобранные трансгенные семена проращивали для получения растений нового поколения. Интересно, что у *C. sativa*, в отличие от *N. benthamiana* или *A. thaliana* [5], беталаин накапливается преимущественно в корнях и почти не виден в побегах, хотя ПЦР в режиме реального времени подтверждает наличие трансгенной вставки и в зеленых листьях.

Количество семян, полученных для разных вариантов эксперимента, составляло от 351 до 1529, что в основном зависело от сорта. Эффективность трансформации варьировала от 0.7% до 2.0 %, что сопоставимо с эффективностью трансформации рыжика

этим методом в других работах. Например, в первой опубликованной работе по трансгенезу *C. sativa* было получено 76 трансгенных семян из 6000 [6].

Максимальная эффективность была достигнута для сортов Кристалл и Исилькулец при использовании штамма EHA105 и Silwet® L-77 в концентрации 0.02 %.

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

Список литературы

1. Genetic Improvement of *Camelina sativa* (L.) Crantz: Opportunities and Challenges / M. Ghidoli, E. Ponzoni, F. Araniti [et al.] // *Plants*. 2023. V. 12. P. 570.

2. Clough S.J., Bent A.F. Floral dip: a simplified method for *Agrobacterium*-mediated transformation of *Arabidopsis thaliana* // *Plant J.* 1998. V. 16. № 6. PP. 735-743.

3. Functional Characterization of the Effects of CsDGAT1 and CsDGAT2 on Fatty Acid Composition in *Camelina sativa* / K.-R. Lee, Y. Yeo, J. Lee [et al.] // *J. Mol. Sci.* 2024. V. 25. P. 6944.

4. A reporter for noninvasively monitoring gene expression and plant transformation / Y. He, T. Zhang, H. Sun [et al.] // *Hortic. Res.* 2020. V. 7. P. 152.

5. Exploring the Potential Applications of the Non-invasive Reporter Gene RUBY in Plant Genetic Transformation / J. Yu, S. Deng, H. Huang [et al.] // *Forests*. 2023. V. 14. P. 637.

6. Lu C., Kang J. Generation of transgenic plants of a potential oilseed crop *Camelina sativa* by *Agrobacterium*-mediated transformation // *Plant Cell Rep.* 2008. V. 27. PP. 273-278.

7. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. URL: <https://gossortrf.ru/publication/reestry.php> (дата обращения 26.08.2024).

GENOMIC EDITING OF CAMELINA SATIVA TO IMPROVE ITS AGRICULTURALLY VALUABLE TRAITS

Veselkin A.A., Lebedeva M.V., Razhina P.L., Kozenkova P.I., Taranov V.V.

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

The aim of this study is to select conditions for effective transgenesis of several promising varieties of domestically bred camelina in the future for their further genomic editing.

Keywords: *Camelina sativa*, genomic editing and CRISPR-Cas9

Camelina sativa is an annual herbaceous plant of the Brassicaceae family. The seeds contain up to 42 % oil, which is traditionally used as food. Camelina has a short growing season (90 days), as well as the ability to yield a harvest under unfavorable conditions for other crops (poor soil, drought, frost, etc.). Although camelina was previously widely cultivated, especially in Northern Europe and Russia, in the last century it was widely forgotten, displaced by other oil crops. For this reason, camelina was little bred in the 20th century. However, in the 21st century, camelina oil began to be used to create second-generation biofuels (primarily jet fuel). And now, for example, Lufthansa uses more than 7 million tons of biokerosene from camelina oil annually to refuel its aircraft. Interest in the crop is growing among both producers and breeders. Over the past 15 years, 15 new varieties of camelina have been created in Russia. However, breeding work is complicated by low genetic variability and hexaploidy of the species. Modern methods of genetic engineering, particularly CRISPR-Cas9, help to overcome these difficulties. In recent years, several foreign researchers have successfully obtained *Camelina sativa* forms with qualitatively new

economically valuable traits using genome editing technologies [1]. The fatty acid composition of the oil, the oil content in the seeds, their size and total seed productivity has changed. Effective transformation is necessary for successful genome editing, so the aim of this study was to select its conditions using several promising domestic varieties of camelina. When planning the experiment, the protocol of *Agrobacterium*-mediated transformation by the floral dip method was taken as a basis, which has proven its effectiveness on *Arabidopsis thaliana*, a close relative of *C. sativa* [2]. The key parameters of this approach are the choice of the *Agrobacterium tumefaciens* strain, the concentration of the organosilicone surfactant Silwet® L-77, which ensures the penetration of agrobacteria into plant tissues, and the exposure time. In some cases, repeating the procedure 2-3 times at weekly intervals and using a vacuum can be used to increase efficiency [3].

In our work, we compared two strains of agrobacteria, AGL0 and EHA105, and two concentrations of Silwet® L-77: 0.02 and 0.05 %. Plants of 3 varieties of spring camelina of domestic selection were transformed: Omich, Isilkulets and Crystal - 4 plants for each

replicate. The transformation was carried out with a vector containing the RUBY reporter cassette [4], expressing genes that provide the synthesis of the betalain pigment. The use of such a marker allows one to quickly assess the transformation efficiency of each variant – the transgenic seeds change color from orange to red. The selected transgenic seeds were germinated to obtain a new generation of plants. Interestingly, in *C. sativa*, unlike *N. benthamiana* or *A. thaliana* [5], betalain accumulates mainly in the roots and is almost invisible in the shoots, although real-time PCR confirms the presence of the transgene insert in green leaves. The number of seeds obtained for different experimental variants ranged from 351 to 1529, which

mainly depended on the variety. The transformation efficiency varied from 0.7% to 2.0 %, which is comparable to the efficiency of camelina transformation by this method in other studies. For example, in the first published work on transgenic *C. sativa*, 76 transgenic seeds were obtained out of 6000 [6].

Maximum efficiency was achieved for the Crystal and Isilkulets varieties using the EHA105 strain and Silwet® L-77 at a concentration of 0.02 %.

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

УДК 636.5:636.082:577.2

ОЦЕНКА МЕЖВИДОВОЙ РЕКОМБИНАЦИИ СРЕДИ ПОТИВИРУСОВ, ПОРАЖАЮЩИХ ПАСЛЕНОВЫЕ КУЛЬТУРЫ

Гайсина Э.М.^{1,а}, Очирова Э.М.¹, Никитинская Е.Б.², Никитинский Д.А.², Пакина Е.Н.¹, 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 Общество с ограниченной ответственностью «Биоспарк», 108841, г. Москва, г. Троицк, ул. Промышленная, д. 2Б, Российская Федерация

e-mail: ^аgaysina_em@pfur.ru

В данной работе были изучены межвидовые рекомбинации среди различных видов потивирюсов, как возможного фактора адаптации вирусов к новым растениям.

Ключевые слова: потивирюсы, пасленовые культуры, генетическая рекомбинация

Потивирюсы (род *Potyvirus*, семейство *Potyviridae*, группа+ssRNA вирусов) поражают широкий круг хозяйственно-важных растений. Большинство из них зависят от вектора – в основном членистоногих (тлей), но некоторые виды и штаммы потивирюсов передаются через семена [1]. Изучение филогении потивирюсов показывает, что их геномы являются полифилетическими по происхождению, и существует значительное сходство между тремя фрагментами генома (С1, области RdRp, и Nib) потивирюсов с неродственными в остальном геноме родами вирусов [2]. Генетическая рекомбинация широко распространена у отдельных видов потивирюсов [2-4]. Популяции изученных вирусов имели до 64 % рекомбинантов. Таким образом, внутривидовая рекомбинация является важным фактором, определяющим эволюцию патогена [3]. Однако, по данным ранее проведенных исследований, менее 2 % штаммов потивирюсов были межвидовыми рекомбинантами [2, 3, 5]. Мы провели сравнение полногеномных последовательностей 23 видов потивирюсов, заражающих пасленовые культуры (сем. *Solanaceae* Juss., ном. cons., 1789),

доступных в Генбанке NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, дата обращения 5.09.2024) при помощи программы RDP4 Beta 4.97 [6]. Для каждого вида были выбраны наиболее полиморфные штаммы (всего 66 геномов). В качестве контроля был взят геном Turnip mosaic virus (штамм DSMZ PV-1453). В результате анализа были выявлены рекомбинации в геноме вирусов вида Chilli veinal mottle virus с донором фрагмента Potato virus V (образец ГенБанка MK756120.1), в геномах видов Wild tomato mosaic virus и Potato yellow blotch virus – с неизвестным донором, в геноме Tobacco vein mottling virus с донором Potato virus Y (штамм RNY2) и также с неизвестным донором, в геноме вида Tamarillo leaf malformation virus – с донором Potato yellow blotch virus (JX294310.1). Штамм вида Turnip mosaic virus DSMZ PV-1453 так же нес фрагмент генома, полученный от вида Wild tomato mosaic virus (штамм DSMZ PV-1454). Известно, что TMV является видом с широким кругом поражаемых растений [1], поэтому, совместное заражение пасленовых культур этими двумя вирусами вполне вероятно.

Межвидовые рекомбинации не были обнаружены в геномах вирусов видов Potato virus Y, Wild tomato mosaic virus, Peru tomato mosaic virus, Wild potato mosaic virus, Tobacco vein banding mosaic virus, Chilli veinal mottle virus, Potato virus A, Pepper severe mosaic virus, Tobacco mosqueado virus, Tomato necrotic stunt virus, Pepper yellow mosaic virus, Peru tomato mosaic virus, Chilli ringspot virus, Wild tomato mosaic virus, Pepper veinal mottle virus и Potato virus V. Таким образом, вида Potato yellow blotch virus,

Wild tomato mosaic virus являются наиболее вероятными донорами при межвидовой рекомбинации в пределах штаммов, но также возможен перенос фрагментов генома от Potato virus Y и V. Межвидовая рекомбинация среди потивирусов, поражающих пасленовые культуры может быть существенным фактором адаптации вирусов к новым растениям.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (Проект FSSF-2023–0015).

ASSESSMENT OF INTERSPECIFIC RECOMBINATION AMONG POTYVIRUSES INFECTING SOLANACEOUS CROPS

Gaisina E.M.¹, Ochirova E.M.¹, Nikitinskaya E.B.², Nikitinsky D.A.², Pakina E.N.¹, Ignatov A.N.¹

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

² Limited Liability Company «BioSpark», Promyshlennaya st. 2B, Moscow, Troitsk, Russian Federation, 108841

In this work we studied interspecific recombination among different species of potyviruses as a possible factor of virus adaptation to new plants.

Keywords: *potyviruses, solanaceous crops, genetic recombination*

Potyviruses (genus *Potyvirus*, family Potyviridae, +ssRNA viruses) affect a wide range of economically important plants. Most of these viruses are vector-dependent, mainly transmitted by arthropods (aphids), but some species or particular strains can be transmitted through seeds [1]. Studies of potyviruses phylogeny have shown that their genomes are originally polyphyletic, and there is considerable similarity between three genome fragments (CI, RdRp regions, and Nib) of potyviruses and other unrelated virus genera [2, 3]. Genetic recombination is widespread among certain species of potyviruses [2-4]. Populations of the such species had up to 64 % recombinants, thus intraspecific recombination is an important factor determining the pathogen evolution [3]. However, several previous studies have demonstrated that less than 2 % of potyvirus strains were interspecific recombinants [2, 3, 5]. We compared complete genomes of 23 potyvirus species infecting solanaceous crops (family Solanaceae Juss., nom. cons., 1789) available in the NCBI Genbank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>, accessed 5.09.2024) using the RDP4 Beta 4.97 programme [6]. The most polymorphic strains (66 genomes in total) were selected within each species. The genome of Turnip mosaic virus (TMV) DSMZ PV-1453 was used as an outgroup control. The analysis revealed recombination in the genome of *Chilli veinal mottle virus* with a *Potato virus V* as minor donor (GenBank accession MK756120.1), in the genomes of *Wild tomato mosaic virus* and *Potato yellow blotch virus* with unknown minor donors, in the

genome of *Tobacco vein mottling virus* with *Potato virus Y* as minor donor (strain RNY2), and also with the second unknown minor donor, in the genome of *Tamarillo leaf malformation virus* with *Potato yellow blotch virus* as minor donor (JX294310.1). The strain of *Turnip mosaic virus* DSMZ PV-1453 also carried a genome fragment derived from *Wild tomato mosaic virus* (strain DSMZ PV-1454). TMV is known to affect a wide range of plants [1], therefore, co-infection of solanaceous crops with these two viruses is common. Interspecific recombination was not detected in the genomes of viruses of *Potato virus Y*, *Wild tomato mosaic virus*, *Peru tomato mosaic virus*, *Wild potato mosaic virus*, *Tobacco vein banding mosaic virus*, *Chilli veinal mottle virus*, *Potato virus A*, *Pepper severe mosaic virus*, *Tobacco mosqueado virus*, *Tomato necrotic stunt virus*, *Pepper yellow mosaic virus*, *Peru tomato mosaic virus*, *Chilli ringspot virus*, *Wild tomato mosaic virus*, *Pepper veinal mottle virus*, and *Potato virus V*. Thus, the species *Potato yellow blotch virus*, *Wild tomato mosaic virus* are the most likely serve as minor donors for interspecific recombination. However, transfer of genome fragments from *Potato virus Y* and *Potato virus V* is also possible. Interspecific recombination among Potyviruses may be a significant factor in the adaptation of Potyviruses to affect new host plants within solanaceous crops.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of Russia (FSSF project 2023–0015).

ВАЛИДАЦИЯ ГЕНОВ РАДИАЦИОННОГО ГОРМЕЗИСА НА РАЗНЫХ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ СТАДИЯХ ЯЧМЕНЯ ПОСЛЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН

Горбатова И.В.^а, Казакова Е.А.^б

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: ^аgorbatova.irina.96@mail.ru, ^бelisabethafeb19@gmail.com

В ходе вегетационного эксперимента в тепличных условиях была проведена валидация результатов, полученных ранее в лабораторных условиях. Установлено, что кандидатные гены (гомологи генов *PM19L*, *CML31* и *AOS2*), участвующие в радиационной стимуляции проростков ячменя, играют важную роль в радиационном гормезисе на протяжении всего онтогенеза. У γ -стимулированных сортов изменение экспрессии исследуемых генов совпадало с динамикой роста и морфологическими параметрами растений.

Ключевые слова: адаптивные реакции, гормезис, радиационная стимуляция, γ -излучение, *Hordeum vulgare* L.

В современном мире ввиду изменения климата и уменьшения доступности пахотных земель довольно быстро нарастает проблема обеспечения продовольствием постоянно растущего населения. Спрос на продукцию растениеводства с каждым годом продолжает увеличиваться, при этом на продуктивность сельского хозяйства большое влияние оказывают стрессовые факторы, часто связанные с глобальным потеплением [1].

Облучение семян сельскохозяйственных растений низкими дозами γ -излучения может приводить к стимулирующим эффектам, проявляющимся на организменном уровне (радиационный гормезис), однако конкретные гены, отвечающие за этот процесс, на сегодняшний день остаются неисследованными.

Ранее коллективом лаборатории №8 «НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ были проведены множество исследований по расшифровке молекулярных механизмов радиационного гормезиса при действии низких доз ионизирующего излучения на семена ячменя и выявлению генов, связанных с формированием эффекта радиационной стимуляции [2–5]. Транскриптомный анализ зародышей облученных семян ячменя обыкновенного на ранних стадиях прорастания позволил выявить 17 генов кандидатных, изменение экспрессии которых может быть связано с формированием эффекта радиационной стимуляции. Далее был проведен анализ экспрессии 17

кандидатных генов стрессового ответа, по результатам которого гомологи генов *PM19L*, *CML39* и *AOS2* были выбраны в качестве возможных детерминант радиационного гормезиса [2].

В данной работе для валидации полученных результатов в вегетационном эксперименте было изучено влияние низкой дозы γ -облучения семян на динамику роста и экспрессию гомологов генов риса *PM19L*, *CML39* и *AOS2* восьми сортов ячменя. *PM19L* кодирует мембранный белок PM19L, который участвует в передаче сигналов абсцизовой кислоты (АБК). *CML31* кодирует кальций-связывающий белок CML31. Гомолог гена *AOS2* кодирует белок, который участвует в биосинтезе жасмоновой кислоты.

Материалы и методы

Объектом исследования является ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.).

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

Вегетационный эксперимент в теплице был поставлен на восьми сортах ячменя, предоставленных ФГБНУ «АНЦ «Донской» и различающихся по выраженности морфофизиологических изменений на γ -облучение семян дозой 20 Гр (рис. 1) [6].



Рисунок 1. Ранжирование сортов *H. vulgare* по радиочувствительности к γ -облучению семян

В лабораторных условиях были проанализированы морфологические показатели семидневных проростков 8-ми сортов ячменя и на основании этих данных выполнено ранжирование сортов по особенностям ответа на γ -облучение семян в дозе 20 Гр. По выраженности ответной реакции сорта были разделены по чувствительности к облучению [6].

Посадку семян осуществляли в пластмассовые вегетационные сосуды с почвой. Предварительно на дно каждого сосуда засыпали керамзит таким образом, чтобы он полностью покрывал дно. Керамзит сверху накрывали двумя слоями марли. На весах взвешивали по 5,5 кг сухой почвы, далее в почву добавляли 600 мл воды и перемешивали ее в тазу до однородно-влажного состояния. Подготовленную почву аккуратно набивали в подписанные сосуды с керамзитом и марлей, предварительно поместив в каждый сосуд аэрационную стеклянную трубку. В эксперименте использовали 48 вегетационных сосудов, по 6 для каждого сорта (3 с контрольными растениями и 3 с облученными). В каждый сосуд высевали по 30 семян. Всего в эксперименте было использовано 1440 семян.

Для облученных и контрольных растений оценивали скорость прохождения онтогенетических фаз, проводили пробоотбор образцов для оценки экспрессии генов-кандидатов радиационного гормезиса методом полимеразной цепной реакции с обратной транскрипцией (ОТ-ПЦР).

Результаты

Проведена оценка скорости прохождения онтогенетических фаз у восьми сортов ячменя в вегетационном эксперименте. Для сорта Фокс 1, который по результатам ранжирования выделен как наиболее γ -стимулированный, доза 20 Гр на многих фенологических стадиях оказывала стимулирующий эффект на динамику онтогенеза. У γ -ингибированного сорта Леон в тепличном эксперименте практически все стадии у облученных и контрольных растений начинались в один и тот же день. В целом, показано, что γ -облучение семян ячменя в дозе 20 Гр может изменить динамику онтогенеза исследуемых сортов.

Выполнена оценка экспрессии генов для исследуемых сортов. Установлено, что выявленные паттерны экспрессии различались между γ -стимулированными и γ -ингибированными сортами ячменя.

Таким образом, результаты оценки экспрессии, скоординированные с динамикой роста ячменя, подтвердили, что гены-кандидаты радиационной

стимуляции роста, ранее исследованные на проростках ячменя (гомологи генов *PM19L*, *CML31*, *AOS2*), играют важную роль в проявлении радиационного гормезиса на протяжении всего онтогенеза. У γ -стимулированных сортов экспрессия изучаемых генов была согласована с динамикой роста и морфофизиологическими параметрами растений.

Полученные результаты необходимы для создания новых продуктивных сортов ячменя с улучшенной стрессоустойчивостью.

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. Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security / K.V. Pixley [et al.] // *Molecular Plant*. 2023. V. 16. № 10. PP.1590-1611. DOI: 10.1016/j.molp.2023.09.003.
2. 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.Y. Volkova, G.T. Duarte, L. Soubigou-Taconnat [et al.] // *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. V. 206. №. 2. PP. 277-295.
3. Metabolic profiling of γ -irradiated barley plants identifies reallocation of nitrogen metabolism and metabolic stress response / P.Yu. Volkova, G. Clement, E.S. Makarenko [et al.] // *Dose-Response*. 2020. V. 18. № 1. P. 155932582091418.
4. Studying gene expression in irradiated barley cultivars: *PM19L*-like and *CML31*-like expression as possible determinants of radiation hormesis effect / I.V. Gorbatoва, E.A. Kazakova, M.S. Podlutskiy [et al.] // *Agronomy*. 2020. V. 10. № 11. P. 1837.
5. 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. V. 177. PP. 71-83.
6. Радиочувствительность сортов озимого и ярового ячменя по выраженности морфологического эффекта низкодозового гамма-облучения оригинальных семян / E.A. Казакова, E.C. Макаренко, M.C. Подлутский [и др.] // *Зерновое хозяйство России*. 2020. № 2(68). С. 23-28. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-68-2-23-28.

VALIDATION OF RADIATION HORMESIS GENES AT DIFFERENT PHENOLOGICAL STAGES OF BARLEY AFTER γ -IRRADIATION OF SEEDS

Gorbatoва I.V., Kazakova E.A.

During the vegetation experiment in greenhouse conditions, the results obtained earlier in the laboratory were reproduced. The experimental results confirmed that candidate genes involved in radiation stimulation, which were previously identified in barley seedlings (*PM19L-like*, *CML31-like*, and *AOS2-like*), play an important role in radiation hormesis throughout ontogenesis. In the gamma-stimulated varieties, the change in the expression of the studied genes coincided with the growth dynamics, yield parameters and morphological parameters of plants.

Keywords: *adaptive reactions, hormesis, radiation stimulation, gamma radiation, Hordeum vulgare L.*

УДК 578.52; 578.82

ИЗЫСКАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ ДЛЯ ПЦР-ДИАГНОСТИКИ ВИРУСА БОЛЕЗНИ АУЕСКИ

Горбунова М.Е.^а, Хаммадов Н.И., Громова Е.А., Додонова Е.А., Усольцев К.В.,
Шангараев Р.И.

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: ^аmaria.metax@bk.ru

Болезнь Ауески является заболеванием свиней, входящих в перечень инфекций, представляющих экономическую и социальную угрозу. Совершенствование системы противозoonотических мероприятий, в том числе и тестов при индикации данного заболевания является актуальной задачей. В настоящей работе проанализированы нуклеотидные последовательности различных штаммов и изолятов *Suid herpesvirus 1* – возбудителя болезни Ауески. Определены потенциально перспективные маркерные локусы от 121050 по 121200 п.н. (GenBank: E05619 (gIII protein)) и от 54370 по 54470 п.н. (GenBank: AY77517 (gp50 gene)), позволяющие проводить обнаружение искомого вируса методом ПЦР-РВ с учетом возможности визуализации реакции по технологии Taq Man.

Ключевые слова: *Suid herpesvirus 1, болезнь Ауески, локус, изолят, биоинформатика, генетический маркер для ПЦР*

Болезнь Ауески является заболеванием свиней, входящих в перечень инфекций, представляющих экономическую и социальную угрозу, мониторинг по которой в нашей стране ведется на постоянной основе. По данным ФГБУ ВНИИЗЖ ИАЦ Управления ветнадзора, с 2014 случаев заболевания среди свиней на территории РФ не выявлено, ситуация благополучная на фоне массовой профилактической вакцинации [1]. Болезнь Ауески не является особо опасным заболеванием в отличии от возбудителей бешенства [2], бруцеллеза [3] и других патогенов, но данное заболевание приобрело особую актуальность вследствие причинения значительного экономического ущерба свиноводству в случае возникновения эпизоотии.

Для лабораторной диагностики болезни Ауески применяют серологический (ИФА), молекулярно-биологический метод (ПЦР), биологическую пробу, а также другие иммунологические реакции (РНГА) [4], которые в свою очередь также имеют ряд существенных недостатков: невысокую чувствительность и возможность перекрестных реакций.

Для эффективной, достоверной прижизненной диагностики и качественного мониторинга всего

поголовья животноводческого хозяйства оптимально подходят методики, основанные на генетических исследованиях, а именно применение ПЦР. Однако ключевым вопросом создания эффективного инструмента для специфичного выявления нуклеиновых кислот вируса, как и других маркерных нуклеотидных последовательностей, является определение участков генома вируса размером от 20 до 50 нуклеотидов, находящихся друг от друга на расстоянии от 5 до 50 нуклеотидов, характеризующихся при этом максимальной гомологией для искомого вируса и максимальным показателем генетического полиморфизма с представителями гетерологичных биологических видов [5].

Целью исследования являлся поиск специфических локусов для индикации вируса болезни Ауески методом ПЦР-РВ.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись нуклеотидные последовательности различных штаммов и изолятов *Suid herpesvirus 1* – возбудителя болезни Ауески и гетерологичных нуклеотидных последовательностей,

характеризующихся максимальной гомологией с целевой нуклеотидной последовательностью искомого вируса.

Нуклеотидные последовательности генов изолятов возбудителя болезни Ауески и гетерологичных штаммов определены путем поисковых запросов баз данных ресурсов NCBI (Национального центра биологической информатизации). Определение встречаемости исследуемых нуклеотидных последовательностей в генетическом материале других организмов выполняли в программном инструменте nBLAST. Множественное выравнивание нуклеиновых последовательностей (целевого вируса и максимально гомологичного вируса) проводили в программном алгоритме AlignX, входящего в состав программы VectorNTI 9.1.

Результаты и их обсуждение

Для подбора генов и локусов ДНК, пригодных для использования при индикации вируса болезни Ауески из базы данных GenBank были сохранены семь нуклеотидных последователей возбудителя, которые по результатам BLAST-анализа характеризовались высокой степенью специфичности к искомому вирусу (отсутствие гомологии с гетерологичными организмами) – Y15446 (Pseudorabies virus gE gene); E05619 (Partial DNA sequence encoding Aujeszky disease virus gIII protein); AF176491 (Pseudorabies virus isolate PRV10649 glycoprotein C precursor (gC) gene, partial cds); AF176494 (Pseudorabies virus isolate PRV12481 glycoprotein C precursor (gC) gene, partial cds); MN590203 (Suid alphaherpesvirus 1 isolate AUJDOGFR510202009 glycoprotein C (UL44) gene, partial cds); MN443968 (Suid alphaherpesvirus 1 strain JX18-1 glycoprotein gC (UL44) gene, complete cds); Y14834 (Pseudorabies virus gp50 gene).

По результатам множественного выравнивания указанных выше нуклеотидных последовательностей были определены четыре наименее вариабельных локуса: область с 123701 по 123942 п.н. (gE gene); область с 54233 по 54370 п.н. (gIII protein, E05619); область с 121075 по 121283 п.н. (glycoprotein C) и область с 121285 по 121443 п.н. (gp50 gene).

Исходя из того, что при дизайне олигонуклеотидных затравок необходимо учитывать температуры

отжига праймеров, разница которых не должна превышать 1.0 °C, наиболее перспективными для дизайна олигонуклеотидных затравок для ПЦР-РВ являются участки от 121050 по 121200 п.н. (GenBank: E05619 (gIII protein)) и от 54370 по 54470 п.н. (GenBank: AY77517 (gp50 gene)).

Заключение

По результатам биоинформационного анализа нуклеотидных последовательностей изолятов вируса болезни Ауески были отобраны потенциально перспективные маркерные локусы: область с 123701 по 123942 п.н. (gE gene); область с 54233 по 54370 п.н. (gIII protein); область с 121075 по 121283 п.н. (glycoprotein C) и область с 121285 по 121443 п.н. (gp50 gene). Наиболее приемлемыми для дизайна олигонуклеотидных затравок для ПЦР-РВ с учетом возможности визуализации реакции по технологии Taq Man., являются участки от 121050 по 121200 п.н. (GenBank: E05619 (gIII protein)) и от 54370 по 54470 п.н. (GenBank: AY77517 (gp50 gene)).

Список литературы

1. Эпизоотическая ситуация в Российской Федерации 2022 год. ФГБУ ВНИИЗЖ АИЦ Управления ветеринарии г. Владимир [Электронный ресурс]. URL: https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/files/iac/iac_epizooticheskaya_situaciya_v_rf_2022_god.pdf, свободный. (дата обращения: 02.02.2024).
2. Ретроспективная оценка эпизоотолого-эпидемиологической характеристики бешенства в Республике Татарстан в 2010-2020 гг. / *Р.М. Ахмадеев [и др.]* // Ветеринарный врач. 2023. № 4. С. 27-32.
3. Разработка мультиплексной ПЦР-РВ тест-системы для выявления возбудителя бруцеллеза / *Е.А. Громова [и др.]* // Ветеринарный врач. 2024. № 3. С. 34-40.
4. Болезнь Ауески (обзор) / *Э.И. Элизбарашвили [и др.]* // Ветеринария. 2023. № 2. С. 15-20.
5. Конструирование специфических праймеров для ПЦР-диагностики классической чумы свиней / *Н.И. Хаммадов [и др.]* // Ветеринарный врач. 2024. № 3. С. 41-46.

THE SEARCH FOR GENETIC MARKERS FOR PCR DIAGNOSIS OF THE AUYESKI DISEASE VIRUS

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

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

Aujeski disease is a disease of pigs included in the list of infections that pose an economic and social threat. Improving the system of antiepidemiological measures, including tests for the indication of this disease, is an urgent task. In this paper, the nucleotide sequences of various strains and isolates of Suid herpesvirus 1, the causative agent of Aujeski disease, are analyzed. Potentially promising marker loci from 121050 to 121200 bp (GenBank: E05619 (gIII protein)) and from 54370 to 54470 bp (GenBank: AY77517 (gp50 gene)) have been identified, allowing for the detection of the desired virus by PCR-RV, taking into account the possibility of visualizing the reaction using Taq Man technology.

Keywords: *Suid herpesvirus 1, Aujeski disease, locus, isolate, bioinformatics, genetic marker for PCR*

Aujeski disease is a disease of pigs included in the list of infections that pose an economic and social threat, which is monitored on an ongoing basis in our country. Methods based on genetic research, namely the use of PCR, are optimally suited for effective, reliable lifetime diagnostics and high-quality monitoring of the entire livestock stock. However, the key issue of creating an effective tool for the specific detection of nucleic acids of the virus, as well as other marker nucleotide sequences, is the determination of sections of the virus genome, ranging in size from 20 to 50 nucleotides, located at a distance from each other from 5 to 50 nucleotides, characterized by the maximum homology for the desired virus, and the maximum indicator of genetic polymorphism with representatives of heterologous biological species. The aim of the study was to

search for specific loci for the indication of the Aujeski disease virus by PCR-RV. Based on the results of bioinformatic analysis of nucleotide sequences of isolates of the Aujeski disease virus (GenBank: Y15446 E05619, AF176491, AF176494, MN590203, MN443968, Y14834), potentially promising marker loci were selected: area from 123701 to 123942 bp (gE gene); area from 54233 to 54370 bp (gIII protein); area from 121075 according to 121283 BP (glycoprotein C) and the region from 121285 to 121443 BP (gp50 gene). The sites from 121050 to 121200 bp (GenBank: E05619 (gIII protein)) and from 54370 to 54470 bp (GenBank: AY77517 (gp50 gene)) are the most acceptable for the design of oligonucleotide primers for PCR-RV, taking into account the possibility of visualizing the reaction using Taq Man technology.

УДК 639.3.09

ИНДИКАЦИЯ ВИРУСА ИНФЕКЦИОННОГО НЕКРОЗА ГЕМОПОЭТИЧЕСКОЙ ТКАНИ ЛОСОСЕВЫХ РЫБ МЕТОДОМ ПЦР-РВ

Громова Е.А.^а, Осянин К.А., Миргазов Д.А., Горбунова М.Е., Додонова Е.А.

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: elizaveta-real@mail.ru

В рамках работы произведен биоинформационный анализ нуклеотидных последовательностей вируса инфекционного некроза гемopoэтической ткани с целью подбора маркерных локусов для его индикации. На основании проведенного множественного выравнивания подобраны и сконструированы две комбинации праймеров и зонда. С помощью *in silico* подхода установлено, что разработанные олигонуклеотиды являются специфичными и позволяют идентифицировать большинство изолятов IHNV.

Ключевые слова: *вирус инфекционного некроза гемopoэтической ткани лососевых рыб, ПЦР-РВ, генетические маркеры, праймеры*

Введение

Одним из опаснейших заболеваний лососевых рыб является инфекционный некроз гемopoэтической ткани (IHNV) [1]. Возбудитель данной болезни – РНК-содержащий вирус IHNV (Infectious hematopoietic necrosis virus), принадлежащий к роду *Novirhabdovirus* семейства *Rhabdoviridae*. Общими клиническими признаками IHNV являются потемнение окраски кожных покровов рыбы, вялость и ослабленная реакция на внешние раздражители, экзофтальм, бледные жабры, вздутие живота и точечные

кровоизлияния [2]. Циркуляция данного вируса в водных экосистемах наносит значительный экономический ущерб рыбному хозяйству, который складывается из высокой летальности промысловой рыбы, затрат на проведение карантинных ограничительных мероприятий, убоя всей рыбы на территории циркуляции вируса и ограничений для торговой реализации зараженной рыбы.

Диагностика IHNV, как правило, основана на выделении вируса в культуре клеток с последующей идентификацией вируса серологическими методами [3].

Однако для более быстрой и точной индикации возбудителей инфекционных заболеваний используются методы, основанные на полимеразной цепной реакции (ПЦР) [4, 5].

Цель исследования – анализ генетических маркеров вируса инфекционного некроза гемопоэтической ткани, оптимальных для использования при специфической ПЦР-индикации.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись нуклеотидные последовательности вируса инфекционного некроза гемопоэтической ткани, которые определяли путем поисковых запросов в базе данных GenBank.

Биоинформационный анализ геномов различных изолятов IHNV с последующим дизайном комбинации праймеров и зонда проводили согласно общим принципам, используемых нами ранее для возбудителей инфекционных заболеваний [5-7]. Множественное выравнивание нуклеиновых последовательностей осуществляли с помощью онлайн программ «Clustal Omega» и «BLASTn».

Результаты исследований и обсуждение

Согласно данным литературы, наиболее высоким потенциалом для идентификации максимального

количества известных штаммов IHNV обладают нуклеотидные последовательности генов G и N [1-3, 7]. С применением базы данных GenBank нами были определены полные и частичные последовательности данных генов, а также проведено их прямое сравнение. Установлено, что уровень гомологии нуклеотидных последовательностей генов G и N между штаммами IHNV варьирует от 98.96 % до 100 % и от 94 % до 100 %, соответственно. По результатам проведенного выравнивания нуклеотидных последовательностей гена G был подобран маркерный локус, локализованный в области от 68 до 226 нуклеотидов (относительно последовательности MF464272.1).

Что касается гена N, большинство последовательностей данного гена представлены в базе данных GenBank в виде неполных сиквенсов, что значительно сокращает диапазон поиска потенциальных генетических маркеров. Поэтому нами также было проведено множественное выравнивание полнотных последовательностей вируса IHNV, после чего была определена маркерная последовательность гена N, находящаяся в области от 176 до 294 нуклеотидов (относительно последовательности MK234585.1).

В пределах подобранных последовательностей генов G и N были сконструированы праймеры и зонды, оптимальные для специфической индикации большинства изолятов IHNV (таблица 1).

Таблица 1

Характеристика разработанных олигонуклеотидов

Мишень	Обозначение олигонуклеотидов	Канал детекции	Тип зонда и гасителя флуоресценции
G	IHNFG (прямой праймер) IHNGR (обратный праймер) IHNGP (зонд)	FAM	FAM -BHQ1
N	IHNNF(прямой праймер) IHNNR (обратный праймер) IHNNP (зонд)		

Данные олигонуклеотиды характеризовались следующими показателями: по содержанию ГЦ-пар для IHNV-G (F, R и Z) – 46 %, 54.6 и 53 %, IHNV-N (F, R и Z) – 46 %, 55 % и 59 %, соответственно; минимальное и максимальное значение температуры плавления составило от 55.3 °C до 60.7 °C.

Для контроля результата амплификации так же был создан положительный контроль, представляющий собой специфическую вставку (содержащую все маркерные локусы) в плазмидной ДНК.

Апробацию сконструированных для индикации IHNV праймеров и зондов проводили *in silico* с использованием полногеномных последовательностей из базы данных GenBank. Установили, что подобранные олигонуклеотидные затравки обладают высоким уровнем специфичности к искомым последовательностям генов G и N вируса IHNV, что свидетельствует в пользу их результативности при дальнейшем использовании в формате ОТ-ПЦР.

Выводы

Разработанные в рамках данного исследования праймеры и зонды могут быть использованы в качестве основы для построения двухлокусной ОТ-ПЦР-РВ тест-системы, пригодной для индикации IHNV при мониторинговых и диагностических исследованиях вирусных заболеваний лососевых рыб.

Список литературы

1. Cuenca A., Vendramin N., Olesen N.J. Analytical validation of one-step realtime RT-PCR for detection of infectious hematopoietic necrosis virus (IHNV) // Bulletin of The European Association of Fish Pathologists. 2020. № 40(6). PP. 261-272.

2. Universal reverse-transcriptase real-time PCR for infectious hematopoietic necrosis virus (IHNV) / M.K.

Purcell, R.L. Thompson, K.A. Garver [et al.] // Dis Aquat Organ. 2013. № 106(2). PP. 103-115.

3. Тарасова А.С., Перчун А.В., Мельников В.П. Применение полимеразной цепной реакции для выявления возбудителей некоторых особо опасных вирусных болезней рыб // Ветеринария сегодня. 2020. № 1 (32) С. 11-16.

4. Применение HRM-анализа кривых плавления, полученных после амплификации VNTR-локусов, для идентификации и дифференциации штаммов бруцелл / Е.А. Анисимова, Д.А. Миргазов, Е.А. Додонова [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. 2023. № 4. С. 42-49.

5. Подбор оптимальных условий постановки ПЦР для идентификации возбудителя бруцеллеза собак / Е.А. Анисимова, Е.А. Додонова, Д.А. Миргазов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 12(230). С. 55-59.

6. Разработка мультиплексной ПЦР-РВ тест-системы для выявления возбудителя бруцеллеза / Е.А. Громова, Д.А. Миргазов, Е.А. Додонова [и др.] // Ветеринарный врач. 2024. № 3. С. 34-40.

7. Генетические маркеры для ПЦР-индикации вируса инфекционного некроза гемопоэтической ткани лососевых рыб / Е.А. Громова, К.А. Осянин, Е.А. Додонова [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 5. С. 88-94.

INDICATION OF INFECTIOUS HEMATOPOIETIC NECROSIS VIRUS OF SALMON FISH BY THE RT-PCR

Gromova E.A., Osyenin K.A., Mirgazov D.A., Gorbunova M.E., Dodonova E.A.

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

As part of the work, a bioinformatic analysis of the nucleotide sequences of the infectious hematopoietic necrosis virus was carried out in order to select marker loci for its indication. Based on the multiple alignment carried out two combinations of primers and probes were selected and designed to detect infectious hematopoietic necrosis virus of salmonids in the format of a polymerase chain reaction in real time, combined with reverse transcription. Using the *in silico* approach, it was found that the developed oligonucleotides are specific and allow identifying most IHNV isolates.

Keywords: *infectious hematopoietic necrosis virus of salmon fish, RT-PCR, genetic markers, primers*

During the bioinformatics analysis, we selected the nucleotide sequences of the G and N genes with the highest potential for identifying the maximum number of known IHNV strains.

According to the results of the alignment of the nucleotide sequences of the G and N gene, marker loci were selected, localized in the region from 68 to 226 nucleotides (relative to the sequence MF464272.1) and from 176 to 294 nucleotides (relative to the sequence MK234585.1), respectively. Based on the marker sequences for the N and G genes, primers and probes were constructed.

To control the amplification result, a positive control was created, which is a specific insert (containing all marker loci) in plasmid DNA.

The primers and probes designed for IHNV indication were tested *in silico* using the above-mentioned genome-wide sequences of this virus, as well as the reference genome IHNV – NC_001652. It was found that the selected oligonucleotide seeds have a high level of specificity to the desired sequences of the G and N genes of the IHNV virus, which indicates in favor of their effectiveness when further used in the RT-PCR format.

УДК 633.1:631.527.11:577.112.083:577.112.827

ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛОКУСОВ НМW-GS ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

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

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 учреждение науки Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук, 127276, г. Москва, ул. Ботаническая, д. 4, Российская Федерация

³ 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: agruzdev82mtz@mail.ru

Высокомолекулярные субъединицы глютеинов (High Molecular Weight Glutenin Subunits, HMW-GS), являющиеся наиболее значимыми запасными белками зерна мягкой пшеницы, находят свое применение как надежные генетические маркеры хлебопекарных качеств и могут быть использованы в популяционно-генетических исследованиях за счет высокого их полиморфизма. В ходе настоящего исследования проведена идентификация и изучен состав HMW-GS у растений 61 образца яровой мягкой пшеницы. На основании распределения частот аллелей локусов, кодирующих высокомолекулярные глютеины, получены показатели, говорящие о небольшом разнообразии и высоком сходстве групп образцов из разных регионов, что свидетельствует об обеднении генофонда мягкой пшеницы.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница, популяционная генетика, запасные белки, высокомолекулярные глютеины, электрофорез

По некоторым данным неуклонно снижается генетическое разнообразие возделываемых сортов пшеницы [1]. Возможно, это связано с тем, что на современном этапе своей истории мягкая пшеница практически исчерпала свой потенциал для повышения продуктивности, адаптивности и устойчивости к биотическим и абиотическим факторам. Следует также отметить, что в ходе селекционного процесса направленно или случайно в коммерческих сортах закрепляются аллели генов, определяющие высокую хозяйственную ценность генотипа. К тому же для разных эколого-географических регионов эти аллели могут быть совершенно разными. В связи с этим важно понимать, как распределяются частоты аллелей глютеин-кодирующих локусов в разных регионах возделывания пшеницы, чтобы качественные характеристики новых сортов оставались на высоком уровне и при этом сохранялось генетическое разнообразие, являющееся залогом высокой адаптивности и пластичности.

Запасные белки мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) представлены широким спектром протеинов, важнейшими из которых являются высокомолекулярные субъединицы глютеинов (High Molecular Weight Glutenin Subunits, HMW-GS). Локусы, кодирующие высокомолекулярные глютеины (*Glu-A1*, *Glu-B1* и *Glu-D1*), имеют множественный аллелизм и проявляют кодоминантный характер наследования, что позволяет использовать их в качестве молекулярных маркеров для решения широкого круга задач [2], особенно в популяционно-генетических исследованиях. К тому же существует тесная связь отдельных аллельных вариантов локусов HMW-GS с технологическими качествами зерна и муки мягкой пшеницы [3].

Настоящее исследование посвящено изучению генетического разнообразия сортов и линий яровой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения на основе полиморфизма локусов высокомолекулярных глютеинов и установлению генетического сходства групп образцов этой культуры из разных регионов земного шара.

В рамках настоящего исследования с использованием метода электрофореза в полиакриламидном геле в присутствии додецилсульфата натрия (SDS-PAGE) проведена идентификация HMW-GS у 61 образца яровой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения. Наиболее широко в исследовании представлены образцы из Международного центра улучшения кукурузы и пшеницы (CIMMYT, Мексика) – 20 образцов. Также были изучены 19 образцов из различных российских селекционных учреждений, 14 – из Канады и 8 – из европейских селекционных центров. Экстракцию и фракционирование высокомолекулярных субъединиц глютеинов проводили в соответствии с протоколом SDS-PAGE, описанным [4] в модификации [5]. Номенклатура HMW-GS пшеницы приведена в соответствии с [6]. Расчет внутривидового разнообразия (H) и показателя сходства популяций (r) проводили по формулам Л.А. Животовского [7, 8]. Степень генетического разнообразия (H) рассчитывали по формуле, предложенной Nei [9].

По результатам исследования у 28 изученных образцов пшеницы идентифицирован аллель *a* локуса *Glu-A1*, ответственный за синтез субъединицы 1, 38 образцов несли аллель *Glu-A1b* (субъединица 2*), а 3 образца – *Glu-A1c* (нуль аллель). Аллель *a* (7) локуса *Glu-B1* найден у одного растения Мексиканского образца № 151, *Glu-B1b* (7+8) – у 21 образца, *Glu-B1c* (7+9) – у 37 образцов, *Glu-B1f* (13+16) – у 2 образцов, *Glu-B1h* (14+15) – у 3 образцов, *Glu-B1i* (17+18) – у 3 образцов. Аллели *a* (2+12) и *d* (5+10) локуса *Glu-D1* идентифицированы у 23 и 44 образцов, соответственно. Таким образом, в ходе исследования был идентифицирован весь пул наиболее ценных для хлебопечения аллелей – *Glu-A1a*, *Glu-A1b*, *Glu-B1b*, *Glu-B1f*, *Glu-B1i* и *Glu-D1d* [3]. Помимо прочего, в ходе исследования установлена высокая однородность изучаемого материала. Тем не менее 13 образцов (21.3 %) из числа изученных представлены двумя или более биотипами с преобладанием одного из них. Также по одному изученному растению образцов

BW90, Мексиканский образец № 79 и Ласка являлись гетерозиготами, причем растение Мексиканского образца № 79 было гетерозиготой сразу по двум локусам *Glu-A1* и *Glu-D1*, а образцы Ласка и BW90 только по локусам *Glu-A1* и *Glu-B1*, соответственно.

Несмотря на большую номенклатуру идентифицированных аллелей высокомолекулярных глютенинов, на основе расчетных популяционно-генетических показателей можно заключить, что изученные образцы обладают невысоким генетическим разнообразием по этим локусам, наблюдается превалирование одного-двух аллелей по каждому локусу. К тому же образцы различного эколого-географического происхождения демонстрируют высокое генетическое сходство между собой. Таким образом, тезис о снижении генетического разнообразия мягкой пшеницы в ходе селекционной работы с этой культурой находит свое подтверждение.

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

Список литературы

1. Мартынов С.П., Добротворская Т.В., Пухальский В.А. Динамика генетического разнообразия сортов озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), районированных на территории России в 1929–2005 гг. // Генетика. 2006. Т. 42. № 10. С. 1359-1370.

2. Белки семян как маркеры в решении проблем генетических ресурсов растений, селекции и

семеноводства / А.В. Конарев, В.Г. Конарев, Н.К. Губарева, Т.И. Пенева // Цитология и генетика. 2000. Т. 34. № 2. С. 91-104.

3. Lukow O.M., Payne P.I., Tkachuk R. The HMW glutenin subunit composition of Canadian wheat cultivars and their association with bread-making quality // Journal of the Science of Food and Agriculture. 1989. V. 46. № 4. PP. 451-460.

4. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin / N.K. Singh [et al.] // J. Cereal Sci. 1991. V. 14. PP. 203-208.

5. 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. V. 50. PP. 669-679.

6. Payne P.I., Lawrence G.J. Catalogue of alleles for the complex gene loci, *Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1* which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat // Cereal Res. Commun. 1983. V. 11. PP. 29-35.

7. Животовский Л.А. Показатель сходства популяций по полиморфным признакам // Журнал общей биологии. 1979. Т. 40. № 4. С. 587-602.

8. Животовский Л.А. Показатель внутривидового разнообразия // Журнал общей биологии. 1980. Т. 41. № 6. С. 828-836.

9. Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations // Proceedings of the national academy of sciences. 1973. V. 70. № 12. PP. 3321-3323.

POPULATION-GENETIC ANALYSIS OF HIGH MOLECULAR WEIGHT GLUTENIN LOCI IN SPRING BREAD WHEAT

Gruzdev I.V.¹, Moskalyov E.A.², Rubets^{1,2}, Kirov I.V.^{1,3}

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

²Federal State Budgetary Institution for Sciences the Main Botanical Garden named after N.V. Tsitsin of Russian Academy of Sciences, Botany st. 4, Moscow, Russian Federation, 127276

³Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, 141701

High molecular Weight glutenin Subunits (HMW-GS), which are the most significant reserve proteins of bread wheat grain, find their application as reliable genetic markers of baking qualities and can be used in population genetic studies due to their high polymorphism. In the course of this study, the HMW-GS composition was identified and studied in plants of 61 accessions of spring bread wheat. Based on the frequency distribution of alleles of loci encoding high molecular weight glutenins, parameters indicating a low diversity and high similarity of groups of samples from different regions were obtained, which indicates the depletion of the gene pool of bread wheat.

Keywords: *spring bread wheat, population genetics, storage proteins, high molecular weight glutenin subunits, electrophoresis*

According to some reports, the genetic diversity of cultivated wheat varieties is steadily decreasing. In this regard, it is important to understand how the frequencies of alleles of gluten-coding loci are distributed in different regions of wheat cultivation so that the

qualitative characteristics of new varieties remain at a high level, while maintaining genetic diversity, which is the key to high adaptability and plasticity.

The storage proteins of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) are represented by a wide range of proteins,

the most important of which are high molecular weight glutenin subunits (HMW-GS). The loci encoding high molecular weight glutenins (*Glu-A1*, *Glu-B1* and *Glu-D1*) have multiple allelism and exhibit codominant inheritance, which allows them to be used as molecular markers for solving a wide range of tasks, especially in population genetic studies. In addition, there is a close relationship of individual allelic variants of HMW-GS loci with the technological qualities of grain and bread wheat flour.

The present study is devoted to the study of the genetic diversity of varieties and lines of spring bread wheat, of various ecological and geographical origin,

based on the polymorphism of high-molecular glutenin loci and the establishment of genetic similarity of groups of samples of this crop from different regions of the globe.

Despite the large range of identified alleles of high-molecular-weight glutenins, based on calculated population-genetic indicators, it can be concluded that the studied accessions have low genetic diversity at these loci, there is a prevalence of one or two alleles at each locus. In addition, accessions of various ecological and geographical origin demonstrate high genetic similarity among themselves.

УДК 632.911.2:579.64:632.3.01/.08

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПЦР-ТЕСТОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВОЗБУДИТЕЛЯ БАКТЕРИАЛЬНОГО УВЯДАНИЯ *CLAVIBACTER INSIDIOSUS*

Доморацкая Д.А.^{1,2,a}, Игнатъева И.М.¹, Кононова Е.П.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений», 140150, Московская обл., г.о. Раменский, р.п. Быково, ул. Пограничная, д. 32, 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: adanadomoratskaya@mail.ru

В статье описаны основные этапы разработки и апробации авторских праймеров (C10603F/R, C10703F/R) и зондов (C10603P, C10703P) для идентификации возбудителя бактериального увядания *Clavibacter insidiosus* (далее – *C. insidiosus*). Для двух праймерных систем, нацеленных на ПЦР-мишень плазмиды rCl1, подобраны унифицированные условия амплификации и состава реакционных смесей, определены критерии эффективности ПЦР в режиме «реального времени» (далее – ПЦР-РВ). Исследование на основе молекулярно-генетического анализа проводили на уже имеющемся в лабораториях стандартном оборудовании для ПЦР с использованием штамма *C. insidiosus* CFBP2404. В результате апробации разработанных праймерных систем установлено, что достоверная и своевременная идентификация *C. insidiosus* с применением ПЦР-РВ позволит выявлять патоген в экспортируемом зерне кормовых и злаковых культур. После получения патента на разработанные авторами праймеры и зонды ПЦР-РВ будет рекомендован к включению в схему диагностики российских методических рекомендаций по выявлению и идентификации *C. insidiosus* в качестве отборочного теста.

Ключевые слова: люцерна, экспорт, латентная инфекция, геном, ПЦР-мишень, плазида, ПЦР в режиме «реального времени»

Люцерна является одной из ведущих экспортных кормовых культур России. В связи с ее экспортной привлекательностью растут как посевные площади, так и урожайность. Возбудитель бактериального увядания люцерны *C. insidiosus* – угроза стабильному производству значимой кормовой сельскохозяйственной культуры во всем мире. Согласно литературным данным, бактериоз встречается во многих странах, в том числе и на территории Российской Федерации [1]. При этом ввоз семенной продукции люцерны находится под строгим карантинным контролем в таких странах как: Египет, Марокко, Тунис, Аргентина, Бразилия, Чили, Мексика, Уругвай, Турция и

Китай. Всего по коду ТН ВЭД 1209 21 000 0 в 2023 году было экспортировано 1929 т семян люцерны [2].

Помимо определения распространенности на территории РФ *C. insidiosus*, учета ущерба, нанесенного им урожаю, а также создания превентивных мер борьбы, в первую очередь необходимо разработать методы быстрого обнаружения латентной инфекции, определения особенностей ее развития и эффективной диагностики фитопатогена [2].

Одной из основных и наиболее сложных задач при разработке диагностических методов на основе ПЦР является поиск нуклеотидной

последовательности, соответствующей участку генома *C. insidiosus*, подходящей для ее использования в качестве ПЦР-мишени.

В мировой практике для идентификации *C. insidiosus* используют три специфичных классических ПЦР-теста, нацеленные на три типа плазмид pC11 (663 н.п.), pC12 (506 н.п.) и pC13 (699 н.п.) [1]. Между тем распределение плазмид среди штаммов *C. insidiosus* неоднозначно, некоторые из штаммов содержат лишь одну плазмиду из трех. Так, например, было установлено, что референсный геном ATCC10253 не содержит последние 2 плазмиды, а все ранее изученные штаммы *C. insidiosus* (LNPV0.51, NCPPB1110, CFBP2404, DAR 26781 и т.д.) содержат плазмиду pC11 [3]. При этом в диагностическом протоколе РМ 7/99(2) *C. insidiosus* при тестировании растений с симптомами предложены ПЦР-РВ с мишенью в геноме – участком спейсерного гена rRNA 16S-23S и участком генома бактерии IS1122 [1, 4].

В связи со всем вышесказанным, целью исследования стала разработка ПЦР-РВ, которая бы позволяла проводить качественную диагностику *C. insidiosus* и в дальнейшем могла быть включена в качестве отборочного метода идентификации патогена из экстракта растительного материала кормовых и злаковых культур.

При разработке специфичных для *C. insidiosus* праймеров использовали подход обнаружения ДНК бактерий в семенах кормовых и злаковых культур с помощью молекулярно-генетической идентификации разных участков генома фитопатогена. Выбранные файлы (геном ATCC10253, плазмиды pC11, pC12 и pC13), связанные с данными геномами, были обработаны в программе UniPro UGENE 49.1.

Для определения показателя аналитической специфичности (далее – АС) ПЦР-теста подготавливали 1 образец целевого вредного организма (концентрация 10^6 КОЕ) *C. insidiosus* – CFBP2404 и 49 образцов сходных нецелевых организмов (из бактериологической коллекции фитопатогенных штаммов) относящихся к бактериям рода *Clavibacter*. После постановки ПЦР определяли показатели АС ПЦР-РВ.

На первом этапе исследования в лаборатории бактериологии ИЛЦ ФГБУ «ВНИИКР» был проведен поиск специфичных праймеров для *C. insidiosus* на основе классической ПЦР с использованием коммерческой смеси для амплификации «5X Screen Mix» («Евроген», РФ). Испытания проводили на амплификаторе «Т 100 Thermal Cycler Bio-Rad» (Bio-Rad, США) с использованием штамма *C. insidiosus* CFBP2404. После проведения гель-электрофореза результаты интерпретировали с помощью программы «Image Lab». В результате апробации двух разработанных пар праймеров было

подтверждено, что праймеры Ci0603F/R и Ci0703F/R амплифицируют продукты 262 н.п и 151 н.п. мишени в геноме плазмиды pC11 *C. insidiosus*.

На втором этапе исследования полученные после выравнивания пары праймеров, апробация которых показала удовлетворительный результат в соответствии с заданными критериями, а размер ампликона не превышал 300 н.п., использовали для подбора зонда с целью разработки ПЦР-РВ для идентификации фитопатогена. При подборе зондов на последовательности, амплифицируемые с праймерами Ci0603F/R и Ci0703F/R, учитывали GC-состав (60 %), температуру отжига (превышение температуры отжига зондов по сравнению с температурой отжига праймеров минимум на 10 °С) и длину зондов (25-28 н.п.). Олигонуклеотиды синтезировали в ЗАО «Евроген» (Россия).

На третьем этапе исследования была проведена апробация разработанных зондов Ci0603P и Ci0703P к специфичным праймерам Ci0603F/R и Ci0703F/R для *C. insidiosus*. Состав реакционной смеси и условия амплификации унифицировали. Смесь реактивов для постановки одной реакции объемом 25 мкл содержала: 5 мкл – 5× Реакционная смесь для ПЦР-РВ, 1 мкл – прямой праймер, 1 мкл – обратный праймер, 0.5 мкл – зонд (FAM), 2 мкл – ДНК, 15.4 мкл – вода для ПЦР, 0.1 мкл – ВПК (HEX). Температурно-временные параметры ПЦР-РВ для праймеров Ci0603F/R и Ci0703F/R и зондов Ci0603P и Ci0703P включали: первичную денатурацию 95 °С – 5 мин; далее 45 циклов (95 °С – 15 с, 60 °С – 40 с). Исследования проводили на амплификаторе BioRad CFX Opus 96 с использованием коммерческой смеси для амплификации «5X qPCRmix-HS» («Евроген», РФ) и штаммом исследуемой бактерии CFBP2404.

При определении показателя аналитической чувствительности (далее – АЧ) ПЦР-тестов приготавливали стандартную базовую суспензию возбудителя с концентрацией 10^8 КОЕ/мл для приготовления серии десятикратных разведений. После посева 100 мкл суспензий на чашках на питательной среде YDC определяли КОЕ. После посева приготавливали экстракты люцерны с различным уровнем зараженности. Всего было приготовлено семь 10-кратных разведений в трехкратной повторности. В качестве отрицательного контроля использовали экстракт люцерны, свободный от возбудителя бактериоза. После выделения ДНК, постановки ПЦР-РВ и подсчета КОЕ определяли показатели АЧ ПЦР-РВ.

На рисунке 1 представлены графики, демонстрирующие результаты анализа значений пороговых циклов (до 35 цикла), полученных в ходе испытаний при определении показателей АЧ ПЦР-РВ с использованием разработанных зондов Ci0603P и Ci0703P к праймерам Ci0603F/R и Ci0703F/R.

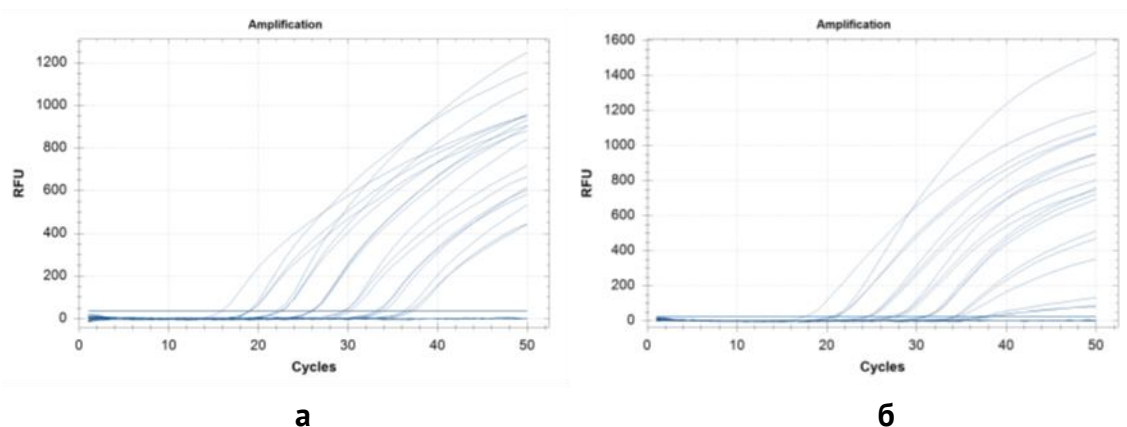


Рисунок 1. Значения пороговых циклов при определении показателей АЧ ПЦР-РВ: Ci0603F/R/P, Ignateva et al., 2024 (а), Ci0703F/R/P, Ignateva et al., 2024 (б)

Для определения показателя аналитической специфичности (далее – АС) ПЦР-тестов подготавливали 1 образец целевого вредного организма (концентрация 10^6 КОЕ) *C. insidiosus* – CFBR2404 и 41 сходных нецелевых организмов (из бактериологической коллекции фитопатогенных штаммов) относящихся к бактериям рода *Clavibacter*. После постановки ПЦР определяли показатели АС ПЦР-РВ.

В результате определения критериев эффективности тестов (АЧ и АС) с использованием разработанных зондов Ci0603P и Ci0703P к праймерам Ci0603F/R и Ci0703F/R подтверждена их видоспецифичность, а уровень аналитической чувствительности для двух ПЦР-тестов составил 102 КОЕ/мл.

В результате разработки ПЦР-РВ установлено, что положительным результатом является значение уровня флуоресценции кривых накопления до 35 циклов (согласно пороговым значениям при определении показателей аналитической чувствительности). В результате апробации разработанных праймерных систем определены показатели аналитической чувствительности и аналитической специфичности ПЦР-тестов, что в дальнейшем позволит проводить достоверную и своевременную идентификацию фитопатогена в экспортируемом зерне кормовых и злаковых культур на основе молекулярно-генетического анализа на уже имеющемся в лабораториях стандартном оборудовании для ПЦР. После

получения патента на разработанные авторами праймеры и зонды, ПЦР-РВ будут рекомендованы к включению в схему диагностики российских методических рекомендаций по выявлению и идентификации *C. insidiosus* в качестве отборочных тестов.

Список литературы

1. EPPO Standards. Diagnostics. PM 7/99 (2) *Clavibacter insidiosus* // EPPO Bulletin. 2022. № 7/99(2). PP. 67-86.
2. Игнатьева И.М., Доморацкая Д.А., Кононова Е.П. Модификация методов экстракции возбудителя бактериального увядания *Clavibacter insidiosus* из растительного материала кормовых культур // Сборник тезисов докладов. СПб.: ФГБНУ ВИЗР, 2024. С. 126. ISBN 978-5-6051655-2-1.
3. Complete genome sequence of *Clavibacter michiganensis* subsp. *insidiosus* R1-1 using PacBio single-molecule real-time technology / Y. Lu, D.A. Samac, J. Glazebrook, C.A. Ishimaru // Genome Announcements. 2015. V. 3(3). P. e00396-15. DOI: <https://doi.org/10.1128/genomeA.00396-15>.
4. Kamasa J., Krawczyk K. An application of PCR for detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *insidiosus* in Lucerne seeds // Progress in Plant Protection. 2007. V. 47(2). PP. 128-131.

NEW DIAGNOSTIC PCR-TEST DEVELOPMENT FOR BACTERIAL WILT OF LUCERNE PATHOGEN *CLAVIBACTER INSIDIOSUS* DETECTION

Domoratskaya D.A.^{1,2}, Ignatyeva I.M.¹, Kononova E.P.¹

¹All-Russian Plant Quarantine Centre, Pogradichnaya st. 32, Ramenskii, Bykovo, Moscow region, Russian Federation, 140150

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

This study describes main stages of the development and testing of new primers (Ci0603F/R, Ci0703F/R) and probes (Ci0603P, Ci0703P) to identify the pathogen of bacterial wilt *Clavibacter insidiosus* (hereinafter *C. insidiosus*). For two primer systems aimed at the PCR target of the pCl1 plasmid, unified amplification conditions and the composition of reaction mixtures were selected, and criteria for the effectiveness of «real-time» PCR (hereinafter Rt-PCR) were determined. The testing based on molecular genetic analysis was carried out on standard PCR equipment already available in our laboratory using the *C. insidiosus* CFBP2404 strain. As a result of validation of the developed primer systems, it was found that reliable and timely identification of *C. insidiosus* using Rt-PCR will allow detecting the pathogen in exported grain of forage and cereal crops. After obtaining a patent for the primers and probes developed by the authors, Rt-PCR will be recommended for inclusion in the diagnostic scheme of the Russian diagnostic protocol for the identification and identification of *C. insidiosus* as a screen test.

Keywords: *lucerne, export, latent infection, genom, PCR-target, plasmid, «real-time» PCR*

УДК 631.523

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛЯДВЕНЦА С ПОМОЩЬЮ SRAP-МАРКЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Душкин В.А.^а, Шамустакимова А.О.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.П. Вильямса», 141055, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1, Российская Федерация
e-mail: *tan-8090@mail.ru, vniikormov@mail.ru

Представлены результаты изучения межвидового и внутривидового генетического полиморфизма в коллекции образцов лядвенца рогатого и Крылова на основе молекулярно-генетического анализа с использованием SRAP-маркеров.

Ключевые слова: *лядвенец рогатый, лядвенец Крылова, ПЦР-анализ, генотипирование, SRAP-маркеры*

Лядвенец (*Lotus L.*) – перекрестноопыляемая, многолетняя бобовая культура, характеризуется высокой продуктивностью и устойчивостью к абиотическим и эдафическим факторам [1]. Благодаря способности к азотфиксации способна накапливать от 150 до 300 кг/га атмосферного азота. Культура распространена недостаточно широко, хотя является перспективной для пастбищного и сенокосного использования во многих регионах Нечерноземной зоны [2-4]. Современные методы ДНК-анализа расширяют возможности для отбора перспективных линий и генотипов при создании новых сортов лядвенца рогатого [5].

Цель исследования состояла в молекулярно-генетической характеристике сортов лядвенца рогатого (*Lotus corniculatus L.*) и селекционного материала лядвенца Крылова (*Lotus krylovii Schischk. Et Serg L.*) с помощью SRAP-маркерной системы.

Материалы и методы

Объектом исследования служили 7 сортов лядвенца рогатого: Луч, Чепрасовский, Смоленский 1, Изумруд, Изис, Empire, Leo и 3 образца лядвенца Крылова, полученные от селекционеров ФНЦ «ВИК им. В.П. Вильямса».

Для выделения геномной ДНК использовался модифицированный SDS-метод [6]. Навеска для

каждого образца состояла из 30 семидневных проростков. Амплификация ДНК проводилась в термоциклере «С1000 Thermal Cycler» (Bio-Rad, США). Реакционная ПЦР-смесь объемом 20 мкл содержала 1.5x Taq Turbo buffer, 0.5x dNTP mix, 2.5U Taq-ДНК полимеразы, 30 нг ДНК, а также по 0.5 мкМ каждого праймера (все компоненты указаны на 1 реакцию). Полученные ПЦР-продукты разделяли в LE2-агарозном геле с концентрацией 1.6 %. Размеры ампликонов в изучаемых коллекциях рассчитывали с использованием программы Image Lab v 6.0.1 (Bio-Rad Laboratories, США), а показатели генетического разнообразия определяли с помощью ПО PopGen 32 [7].

Результаты и обсуждение

SRAP-анализ основан на амплификации экзон-интронных участков генома или открытых рамок считывания (ORF) с помощью комбинации двух неспецифических праймеров [8]. По результатам предварительного анализа из 31 пары SRAP-праймеров было отобрано 5 информативных, выявляющих уникальные по размерам ампликоны и специфические ДНК-профили. При использовании данных праймеров получили 165 воспроизводимых бэндов, 11 из которых – уникальные. Пара праймеров ME1-EM5 позволила амплифицировать 3 отличающихся фрагмента у

образца *Б-1*: 293, 553 и 1150 пар нуклеотидов (п.н.). В свою очередь, с комбинацией ME3-EM3 выделены 3 ПЦР-продукта у двух образцов: *Чепрасовский* – 131 п.н. и *Б-1* (247 и 1073 п.н.). С праймерами F9-R14 обнаружено 2 уникальных продукта, у сорта *Изумруд* (547 п.н.) и образца *Г-1* (670 п.н.). Сочетание праймеров F11 и R14 позволило выявить 3 ампликона у 3-х

сортов: *Луч* (206 п.н.), *Изумруд* (877 п.н.) и *Empire* (560 п.н.). С праймерами F11-R9 удалось амплифицировать различающиеся ДНК-профили. На основе генетических дистанций Нея была построена UPGMA-дендрограмма генетического сходства (рис. 1).

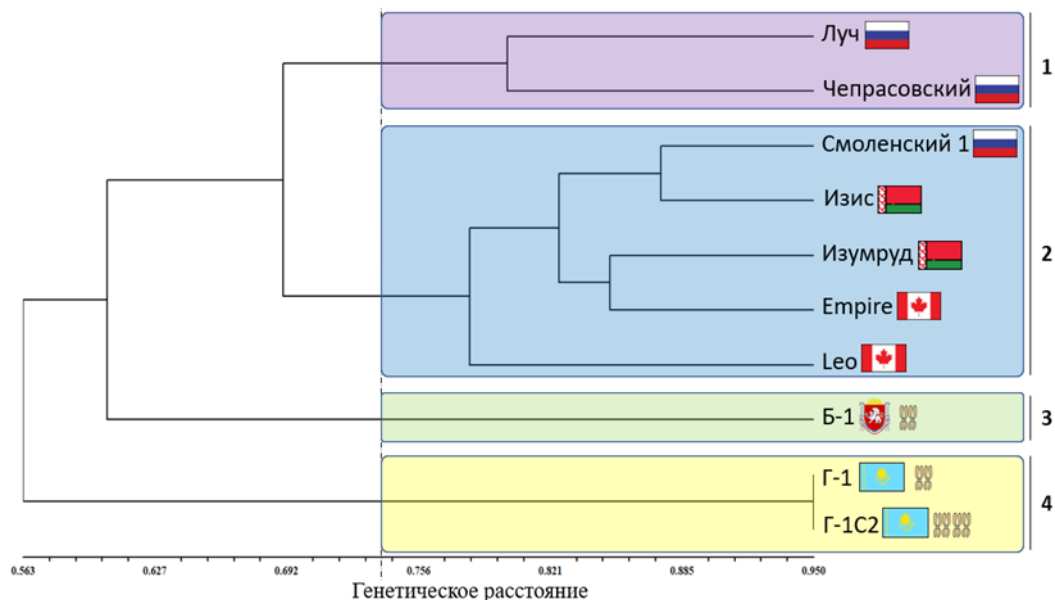


Рисунок 1. UPGMA-дендрограмма генетического сходства между анализируемыми образцами лядвенца. *L. corniculatus*: Луч, Чепрасовский, Смоленский 1, Изис, Изумруд, Empire и Leo; *L. krylovii*: образцы Б-1, Г-1 и Г-1С2

Дендрограмма разделила изучаемые образцы на четыре кластера. Первый включал в себя 2 сорта лядвенца рогатого Луч и Чепрасовский, оригинатором которых является ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». Во втором кластере объединились 5 сортов лядвенца рогатого с разделением по 3-м группам: российский сорт *Смоленский 1* с сортом белорусской селекции *Изис*; сорта белорусской и канадской селекции *Изумруд* и *Empire*; и отдельно расположился Канадский сорт *Leo*. Третий кластер состоял из диплоидного образца дикорастущей популяции лядвенца Крылова из северного Крыма – *Б-1*. Четвертый кластер включал две дикорастущие популяции лядвенца Крылова второго поколения из северного Казахстана: диплоидный образец *Г-1* и этот же образец, но переведенный на тетраплоидный уровень – *Г-1С2*.

Результаты проведенных исследований показали, что с помощью маркерной системы SRAP удалось выявить уникальные фрагменты для 6 образцов из 9 анализируемых (Луч, Чепрасовский, Изумруд, Empire, Б-1 и Г-1). UPGMA-дендрограмма генетического сходства позволила разделить образцы лядвенца на 4 кластера в зависимости от видовой принадлежности и регионов произрастания. Результаты приведенного исследования показали, что система SRAP-маркирования является эффективной для молекулярно-генетического анализа лядвенца рогатого

и лядвенца Крылова при определении видовой и сортовой принадлежности образцов.

Список литературы

1. Кшникаткина А.Н., Аленин П.Г. Семенная продуктивность нетрадиционных кормовых культур в зависимости от приемов возделывания // Нива Поволжья. 2012. № 1. С. 32-38.
2. *Lotus corniculatus* L. – перспективный вид рода *Lotus* L. / О.Н. Змеева, Н.Э. Коломиец, Н.Ю. Абрамец, Р.А. Бондарчук // Химия растительного сырья. 2017. № 4. С. 5-14.
3. Рекашус Э.С. Структура урожая семян лядвенца рогатого в зависимости от сорта и типа опыления // Адаптивное кормопроизводство. 2020. № 1. С. 23.
4. Evaluation of *Lotus corniculatus* L. accessions from different locations at different altitudes reveals phenotypic and genetic diversity / G. Merkouropoulos, Z. Hilioti, E.M. Abraham, M. Lazaridou // Grass and Forage Science. 2017. Т. 72. № 4. С. 851-856.
5. Кшникаткина А.Н., Еськин В.Н. Формирование высокопродуктивных агрофитоценозов лядвенца рогатого (*Lotus corniculatus*) // Нива Поволжья. 2009. № 1. С. 22-28.
6. Эффективный способ выделения ДНК для ПЦР-анализа из «балк-образцов» проростков /

И.А. Клименко [и др.] //Адаптивное кормопроизводство. 2021. Т. 3. № 47. С. 29-48.

7. Yeh F.C., Boyle T.J.B. Population Genetic Analysis of Co-Dominant and Dominant Markers and Quantitative Traits // Belgian Journal of Botany. 1997. V. 129 P. 157.

8. 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. V. 103. № 2. С. 455-461.

MOLECULAR AND GENETIC ANALYSIS OF LOTUS USING SRAP MARKER SYSTEM

Dushkin V.A., Shamustakimova A.O.

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

The results of interspecific and intraspecific genetic polymorphism study in collection of *Lotus corniculatus* and *L. krylovii* samples based on molecular and genetic analysis using SRAP markers are presented in this article.

Keywords: *Lotus corniculatus*, *Lotus krylovii*, PCR analysis, genotyping, SRAP markers

УДК 636.2.033:575.174

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧАСТОТ ДНК-ПОЛИМОРФИЗМОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ И ХОЗЯЙСТВЕННО ВАЖНЫМИ ПРИЗНАКАМИ, В ГЕНОМЕ АБЕРДИН-АНГУССКОЙ ПОРОДЫ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА ПО ДАННЫМ ПОЛНОГЕНОМНОГО СЕКВЕНИРОВАНИЯ

Игошин А.В.^{1а}, Ромашов Г.А.¹, Черняева Е.Н.², Елаткин Н.П.², Юдин Н.С.¹, Ларкин Д.М.^{1,3}

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 Общество с ограниченной ответственностью «Мираторг-Генетика», 121205, г. Москва, муниципальный округ Можайский, тер. инновационного центра Сколково, ул. Нобеля, д. 5, Российская Федерация

³ Королевский ветеринарный колледж, NW1 OTU, Лондон, Великобритания
e-mail: ^aalexmarlboro@inbox.ru

Генетический состав породы и ее генетические отличия от других пород определяют ее облик и характерные особенности, включая экономически-важные признаки и встречаемость патологий. К настоящему времени выявлены множество локусов, контролирующих наиболее значимые фенотипы, что успешно используется в мировой практике для маркер-ассоциированной селекции в целях улучшения свойств пород. Целью работы являлся анализ частот известных каузативных полиморфизмов ДНК у разводимой в России абердин-ангусской породы крупного рогатого скота на основании данных полногеномного секвенирования и сравнения частот этих полиморфизмов с мировыми породами и зарубежными популяциями ангусов. Наши результаты показывают схожесть частот большинства аллелей внутри российских и зарубежных популяций ангусов, а также связь между представленностью аллелей и наличием определяемых ими фенотипических признаков. Были найдены и превышения по частотам ряда нежелательных аллелей в российских популяциях ангусов, на которые стоит обратить внимание при селекционной работе с породами. Таким образом, наша работа указывает на конкретные генетические варианты, которые могут быть использованы для улучшения мясных пород скота, разводимых в Российской Федерации.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, абердин-ангусская порода, полногеномное секвенирование, SNP, селекция, хозяйственно важный признак

Известно, что распространенные типы генетических вариантов, такие как однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), вставки и делеции нуклеотидов могут оказывать «полезное» или «вредное» влияние на здоровье и продуктивность сельскохозяйственных животных. Секвенирование генома *Bos taurus* вызвало всплеск исследований генетического разнообразия пород крупного рогатого скота (КРС) и его связи с хозяйственно важными признаками, адаптациями и заболеваниями, что открыло возможности для использования полученных знаний при создании пород с необходимыми качествами и улучшения существующих пород. Согласно базе данных OMIA [1], в настоящее время известны гены, контролирующие 272 признака КРС, включая ряд заболеваний. Для 175 из них уже были выявлены каузативные мутации в кодирующих и некодирующих областях ДНК. С помощью такого подхода можно идентифицировать мутации в раннем возрасте для своевременной выбраковки животных или эмбрионов [2]. В то же время стоит учитывать, что «вредная» мутация может оказаться «полезной» для другого хозяйственно важного признака [3]. Идентификация аллелей генов, связанных с хозяйственно важными признаками, позволила проводить маркер-ориентированную селекцию по ним [4].

Российская популяция абердин-ангусской породы до сих пор была исследована на наличие лишь нескольких, наиболее распространенных мутаций, ассоциированных с хозяйственно важными признаками и здоровьем [5]. Целью работы являлся анализ спектра и частот известных каузативных полиморфизмов ДНК у разводимой в России абердин-ангусской породы КРС на основании данных полногеномного секвенирования и сравнения частот этих полиморфизмов с мировыми породами и зарубежными популяциями ангусов для определения вариантов, по которым могла бы вестись селекция.

Список клинически и экономически значимых для КРС однонуклеотидных полиморфизмов, вставок и делеций был составлен на основе информации из базы данных OMIA [1]. Исходные данные ресеквенирования («fastq»-файлы) 46 особей российской популяции абердин-ангусской породы (далее – ангус) были предоставлены ООО «МИРАТОРГ-ГЕНЕТИКА». Часть этих животных были импортированы из США и Австралии. В работе также использовали данные по SNP, вставкам и делециям у мировых пород проекта «1000 геномов быков» («1000 Bull Genomes Project») [6], охватывающие результаты ресеквенирования более 5000 особей, относящихся к более чем 180 породам или популяциям, включая 401 животное абердин-ангусской породы из Австралии, Канады, Новой Зеландии, США и других стран.

Удаление последовательностей адаптеров из необработанных парных прочтений проводили при помощи программы Trimmomatic-0.39. Очищенные прочтения были выровнены на референсную последовательность ARS-UCD1.2 с помощью BWA-MEM v.0.7.17. Файлы, содержащие выравненные

последовательности («.sam»-файлы), затем были преобразованы в «.bam»-формат и отсортированы при помощи программы SAMtools v.1.8. Далее, библиотеки, принадлежащие одному и тому же животному, были объединены в один пул с помощью модуля «MergeSamFiles» пакета Picard v.2.18.2. Дубликаты были отмечены с помощью модуля «MarkDuplicates» вышеназванной программы. Рекалибровка качества оснований была выполнена с помощью модулей «BaseRecalibrator» и «PrintReads» пакета GATK v.3.8. Идентификация полиморфизмов и объединение полученных gVCF-файлов были выполнены с помощью модулей «HaplotypeCaller» и «GenotypeGVCFs» программы GATK v.3.8, соответственно. Извлечение SNP, инсерций и делеций из полногеномных VCF-файлов проводили с помощью утилиты Tabix, используя координаты полиморфизмов из ранее сформированного списка. Полученные VCF-файлы, содержащие выбранные полиморфизмы, были использованы для подсчета частот альтернативных аллелей в выборках с помощью программы PLINK 2.0.

Наличие различий по частотам аллелей между выборками проверяли с помощью точного теста Фишера используя функцию «fisher.test()» языка R. Были выполнены два типа сравнений: 1) между разводимой в России абердин-ангусской породой и совокупной выборкой остальных мировых пород; 2) только между российской популяцией и зарубежной популяцией абердин-ангусской породы. Для поправки на множественные сравнения использовали метод, реализованный в функции «qvalue()» языка R.

Сформированный нами список клинически и экономически значимых полиморфизмов содержал 193 SNP и 63 инсерции/делеции. Наиболее значимое различие с мировой выборкой по частотам аллелей наблюдалось по SNP rs109688013 в гене рецептора меланокортина-1 *MC1R*, носители альтернативного аллеля С которого имеют черный окрас шерсти [7]. У зарубежных и отечественных ангусов, имеющих черную масть, частота аллеля С достигала 0.973 и 0.989, в то время как в остальных мировых породах – 0.339.

Как отечественные, так и зарубежные популяции ангусов имели с высокой (0.89-0.95) частотой аллель rs43703011-G гена бета-казеина *CSN2*. Вариации гена *CSN2* по ряду несинонимичных позиций определяют его аллели – A1, A2, A3, B, C и т.д. Нуклеотид G SNP rs43703011, присутствует у нескольких аллелей гена *CNS2*, самый распространенный из которых – A2. Так называемое A2-молоко считается более предпочтительным для употребления, в связи с лучшим усвоением и меньшими нежелательными эффектами со стороны пищеварительной системы человека [8]. Поскольку ангусы являются мясной породой и не используются для производства молока, наблюдаемое у них преобладание нуклеотида G вряд ли может быть связано с селекцией на улучшение молочных качеств. Наиболее правдоподобным объяснением является отбор на показатели мясной продуктивности. Показано, что носительство аллеля A2 повышает дневной привес и вес при отъеме у

немецких ангусов и симменталов [9]. Таким образом, повышение частоты аллеля rs43703011-G, а, следовательно, и аллеля A2 гена *CSN2*, может быть полезно для улучшения не только молочных, но и мясных пород.

По двум SNP rs41255587 и rs109221039 в гене *CAST* зарубежные популяции ангусов имеют более высокую представленность аллелей, повышающих нежность мяса. Данный признак является важной гастрономической характеристикой и его улучшение включено в программы по совершенствованию зарубежных мясных пород [10]. В то же время нам неизвестно о ведении широкой селекционно-племенной работы такого рода в России, что вероятно и обуславливает наблюдаемые различия между выборками. Таким образом, российская популяция ангусов имеет потенциал для улучшения мясных качеств путем селекции по локусу *CAST*.

Нами было выявлено четыре SNP (rs43703015, rs43703016, rs43703017 и rs110014544), определяющих аллели гена каппа-казеина *CSN3* и статистически значимо ($q < 0.05$) различающихся по частотам аллелей в российской и зарубежной выборках ангусов. Данные полиморфизмы ассоциированы с молочными признаками, в частности, с концентрацией каппа-казеина в молоке и коагуляционными свойствами молока, что важно для сыроделия. При этом влияние аллелей *CSN3* на продуктивность мясного скота малоизучено. Исследования не выявили какой-либо связи между аллелями *CSN3* и мясными признаками [11]. Таким образом, наблюдаемые отличия могут быть приурочены эффекту основателя, либо отбору на хозяйственно важные признаки, имеющие пока еще не выявленную ассоциацию с полиморфизмами в гене *CSN3*.

Принимая во внимание частотные различия на номинальном уровне значимости ($p < 0.05$), можно дополнительно отметить миссенс-замену V311A (BTA26:34340886T > C) в гене *NHLRC2*, которая приводит в гомозиготе к нотомелии – разновидности полимелии, при которой дополнительная конечность располагается вдоль или около срединной линии спины [12]. Почти трехкратное превышение содержания у отечественных ангусов по сравнению с зарубежными аллеля BTA26:34340886-C может быть, как следствием эффекта основателя или дрейфа генов в целом, а также менее интенсивных усилий по элиминации данного варианта в российском стаде.

Таким образом, проведенный анализ показал распределение аллельных частот для наиболее важных с точки зрения клинической значимости и хозяйственной ценности полиморфизмов ДНК, присутствующих в российской популяции абердин-ангусской породы. Данные настоящего исследования могут быть востребованы при проведении селекционно-племенной работы по улучшению отечественных мясных пород КРС.

Работа выполнена при поддержке бюджетного проекта № FWNR-2024-0012.

Список литературы

1. OMIA (Online Mendelian Inheritance in Animals): an enhanced platform and integration into the Entrez search interface at NCBI / J. Lenffer, F.W. Nicholas, K. Castle [et al.] // *Nucleic Acids Research*. 2006. V. 34. P. D599-601. doi:10.1093/nar/gkj152.
2. Скрининг на носительство мутаций, детерминирующих развитие наследственных заболеваний у племенного крупного рогатого скота / В.П. Терлецкий, Б.А. Буралхиев, Е.С. Усенбеков [и др.] // *Актуальные вопросы ветеринарной биологии*. 2016. № 3. С. 3-7.
3. Balancing selection of a frame-shift mutation in the *MRC2* gene accounts for the outbreak of the Crooked Tail Syndrome in Belgian Blue Cattle / C. Fasquelle, A. Sartelet, W. Li [et al.] // *PLoS Genetics*. 2009. V. 5(9). P. e1000666. doi:10.1371/journal.pgen.1000666.
4. Marker-assisted selection vis-à-vis bull fertility: coming full circle – a review / V.S. Raina, A. Kour, A.K. Chakravarty, V. Vohra // *Molecular Biology Reports*. 2020. V. 47(11). PP. 9123-9133. doi:10.1007/s11033-020-05919-0.
5. The molecular bases study of the inherited diseases for the health maintenance of the beef cattle / E. Konovalova, O. Romanenkova, O. Kostyunina, E. Gladyr // *Genes (Basel)*. 2021. V. 12(5). P. 678. doi:10.3390/genes12050678.
6. Hayes B.J., Daetwyler H.D. 1000 Bull Genomes Project to Map Simple and Complex Genetic Traits in Cattle: Applications and Outcomes // *Annual Review of Animal Biosciences*. 2019. V. 7. PP. 89-102. doi:10.1146/annurev-animal-020518-115024.
7. The role of melanocyte-stimulating hormone (MSH) receptor in bovine coat color determination / H. Klungland, D.I. Vage, L. Gomez-Raya [et al.] // *Mammalian Genome*. 1995. V. 6(9). PP. 636-639. doi:10.1007/BF00352371.
8. Effects of milk containing only A2 beta casein versus milk containing both A1 and A2 beta casein proteins on gastrointestinal physiology, symptoms of discomfort, and cognitive behavior of people with self-reported intolerance to traditional cows' milk / S. Jianqin, X. Leiming, X. Lu [et al.] // *Nutrition Journal*. 2016. V. 15. P. 35. doi:10.1186/s12937-016-0147-z.
9. Associations between maternal milk protein genotypes with preweaning calf growth traits in beef cattle / L.G. Hohmann, C. Weimann, C. Scheper [et al.] // *Journal of Animal Science*. 2020. V. 98(10). P. skaa280. doi:10.1093/jas/skaa280.
10. Tatum J.D. Pre-Harvest Cattle Management Practices for Enhancing Beef Tenderness. Colorado State University, 2006.
11. Effects of *CSN3* and *LGB* gene polymorphisms on production traits in beef cattle / R.A. Curi, H.N. de Oliveira, M.A. Gimenes [et al.] // *Genetics and Molecular*

Biology. 2005. V. 28(2). PP. 262-266. doi:10.1590/S1415-47572005000200015.

12. Developmental Duplications (DD): Elucidation of the underlying molecular genetic basis of polymelia

phenotypes in Angus cattle / J.E. Beever, B.M. Marron, P.F. Parnell [et al.] // In: Proc. XXVIII World Buiatrics Congress. Cairns, 2014.

COMPARATIVE ANALYSIS OF ALLELE FREQUENCIES OF DNA POLYMORPHISMS ASSOCIATED WITH DISEASES AND ECONOMICALLY IMPORTANT TRAITS IN THE GENOME OF THE ABERDEEN-ANGUS CATTLE BREED ACCORDING TO WHOLE-GENOME SEQUENCING DATA

Igoshin A.V.¹, Romashov G.A.¹, Chernyaeva E.N.², Elatkin N.P.², Yudin N.S.¹, Larkin D.M.³

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

²LLC «Miratorg-Genetika», Nobel st. 5, Moscow, Mozhaisky Municipal District, ter. Skolkovo Innovation Center, Russian Federation, 121205

³Royal Veterinary College, Royal College Street, NW1 0TU, London, United Kingdom

A breed's genetic makeup, including its genetic differences from other breeds, determines its appearance and characteristics, including economically important traits and resistance to pathologies. To date, many loci controlling significant phenotypes have been identified, and successfully used in the world practice of marker-assisted selection to improve breed properties. This study aimed to analyze the frequencies of known causative DNA polymorphisms in the Aberdeen-Angus cattle breed in Russia using whole-genome sequencing data and comparing the frequencies of these polymorphisms with world breeds and foreign populations of Angus. Our results indicate similarities in frequencies for most of such alleles between populations of Russian and foreign Angus, as well as the relationship between the causative allele prevalence and the presence of phenotypic traits under the effect. We also found an excess of some undesirable alleles in the Russian Angus populations, which should be paid attention to when designing breeding programs. Thus, our work points to specific genetic variants that could be used to improve the performance of meat cattle breeds in the Russian Federation.

Keywords: cattle, Aberdeen-Angus breed, whole-genome sequencing, SNP, selection, economically important trait

So far, Angus cattle breed in Russia have been investigated for the presence of only a few, the most common mutations associated with economically important traits and health. Our objective was to analyze the frequencies of known causative DNA polymorphisms in the Angus cattle breed in Russia using genome sequencing data. Additionally, we aimed to compare the frequencies of these polymorphisms with those found in worldwide breeds or foreign Angus populations.

The list of single-nucleotide polymorphisms (SNPs), insertions and deletions, clinically and economically important for cattle, was compiled based on the information from the OMIA database. Raw sequencing data of 46 individuals of the Russian population of the Aberdeen-Angus breed were provided by LLC «Miratorg-Genetika». We used data on DNA polymorphisms in more than 180 worldwide breeds from the «1000 Bull Genomes» Project, including the 401 Angus animals from Australia, USA etc.

Our list of clinically and economically important polymorphisms contained 193 SNPs and 63 insertions/deletions. The most significant allele frequency difference from the global sample was observed for the SNP rs109688013 in the melanocortin-1 receptor gene

MC1R. In foreign and Russian Angus populations, the frequency of the C allele coding for black colour reaches 0.973 and 0.989, while in other worldwide breeds, it is 0.339.

For two SNPs rs41255587 and rs109221039 in the CAST gene, foreign Angus populations have a higher representation of alleles that increase meat tenderness. This is an important gastronomic feature and its improvement is included in the breeding programs of foreign beef breeds. At the same time, we are not aware of extensive breeding attempts of this kind in Russia, which is probably the reason for the observed differences between the samples. Therefore, the Russian Angus populations have the potential for the improvement of meat quality by selection for CAST alleles.

The frequency of V311A missense substitution (BTA26:34340886T>C) in the *NHLRC2* gene differs between the foreign and Russian Angus populations at the nominal significance level ($p < 0.05$). In homozygotes, it leads to notomelia, a type of polymelia in which the additional limb is located along or near the midline of the back. An almost three-fold increase in the BTA26:34340886-C allele frequency in Russian Angus compared to foreign ones may be a consequence of the founder effect or gene drift, as well as less

intensive efforts to eliminate this variant in the Russian herds.

Our analysis showed the allele frequency distribution for the most clinically and economically important DNA polymorphisms present in the Russian Angus cattle breed. The data of this study may be useful in cattle

breeding programs aimed at improving the existing meat cattle breeds.

The work was supported by the budget project No FWNR-2024-0012.

УДК 631.52

НА ПУТИ К ПРЕОДОЛЕНИЮ БАРЬЕРА ТРАНСГЕНЕРАЦИОННОГО НАСЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОДХОДА TE-STORM

Камараули Е.Д.^{1,2,а}, Власова А.В.^{1,2}, Перевозчиков Д.В.^{2,3}, 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: kamarauli.ed@phystech.edu

Индуктирование инсерций мобильных элементов, способных наследоваться в поколении, в настоящий момент представляется очень непростой и актуальной задачей в виду слабого представления о механизмах регуляции транспозонов, происходящих в клетках зародышевых линий. Возможность направленной активации мобилома, особенно в генеративных органах, ограничена множественными клеточными барьерами, а также методами, способными их преодолеть, поэтому разработка соответствующих подходов крайне необходима. TE-storm представляет собой абсолютно новый подход направленной активации мобильных элементов, способный инициировать инсерции транспозонов в меристеме.

Ключевые слова: *мобильные элементы, трансгенерационное наследование инсерций, TE-storm*

В последние годы наблюдается растущий интерес к использованию мобильных элементов в генетических исследованиях и биотехнологии, в том числе для получения генетического разнообразия сельскохозяйственных культур, так как транспозиции мобильных элементов за многие тысячелетия привели к появлению новых генотипических и фенотипических вариантов растений [1].

В связи с важностью изучения и применения мобильных элементов в прикладных целях, необходимы методы индукции их перемещения и появления новых инсерций. Однако соматическая активация мобилома не гарантирует наследование полученных вставок – для передачи новых мутаций потомству необходимо наличие инсерций в зародышевых клетках [2]. На сегодняшний день не очень понятны механизмы защиты клеток зародышевой линии от перемещения мобильных элементов, что затрудняет направленный процесс активации мобилома, что делает инсерционный мутагенез в клетках меристемы актуальным вопросом для изучения.

TE-storm – разработанный нами подход, основанный на вирусном подавлении генов, отвечающих за блокировку активности транспозонов, и

последующем влиянии стрессовых условий (повышенная температура) для запуска жизненного цикла мобильных элементов. С помощью данного метода возможно получение новых инсерций не только в соматических тканях, но и в генеративных органах – нами были получены растения *Arabidopsis thaliana* с новыми инсерциями ретротранспозона ONSEN, которые наследовались через поколение. Главной особенностью и сложностью данного метода является синхронизация момента наибольшего распространения вируса по растению и воздействия теплового стресса, благодаря чему возможна активация меристематических инсерций мобильных элементов.

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

Список литературы

1. Dubin M. J., Scheid O. M., Becker C. Transposons: a blessing curse // Current opinion in plant biology. 2018. V. 42. PP. 23-29.

2. Kirov I. Toward Transgene-Free Transposon-Mediated Biological Mutagenesis for Plant Breeding //

TOWARDS OVERCOMING THE TRANSGENERATIONAL INHERITANCE BARRIER USING THE TE-STORM APPROACH

Kamarauli E.D.^{1,2}, Vlasova A.V.^{1,2}, Perevozchikov D.V.^{2,3}, 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 – MTAА, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

Inducing insertions of mobile elements capable of inheritance in a generation is currently a very challenging and urgent task due to the poor understanding of the mechanisms of transposon regulation occurring in germline cells. The possibility of targeted activation of the mobilome, especially in generative organs, is limited by multiple cellular barriers as well as by methods capable of overcoming them, so the development of appropriate approaches is urgently needed. TE-storm represents a completely new approach of directed activation of mobile elements capable of initiating transposon insertions in the meristem.

Keywords: *mobile elements, insertion transgenerational inheritance, TE-storm*

УДК 577.29

БИОСЕНСОРЫ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ РНК ВИРУСА ТАБАЧНОЙ МОЗАИКИ

Капустина С.И.

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

e-mail: sveta.kapustina7.05@gmail.com

Вирус табачной мозаики (ВТМ) – распространенный вирус растений, влияющий на урожайность и устойчивость к другим фитопатогенам ввиду поражения защитного клеточного слоя. ВТМ поражает широкий спектр растений, поэтому мониторинг здоровья растений и ранняя диагностика заболеваний растений крайне важны для снижения экономических и социальных потерь. Традиционные методы обнаружения РНК ВТМ достаточно дорогостоящие, сложны в эксплуатации, менее чувствительны и специфические по сравнению с новыми биосенсорными технологиями. Биосенсоры открывают большие перспективы для раннего обнаружения ВТМ, что имеют важное исследовательское и практическое значение.

Ключевые слова: *вирус табачной мозаики, растения, биосенсор, электрохимический биосенсор, флуоресцентный биосенсор, ранняя диагностика фитопатологий, биосенсорика фитопатогенов*

Вирус табачной мозаики (ВТМ) состоит примерно из 2130 одинаковых копий белков оболочки, которые спирально организуются вокруг молекулы рибонуклеиновой кислоты. В результате формируется жесткая нанотрубка длиной около 300 нм с внешним диаметром канала 18 нм и внутренним – 4 нм. Этот вирус способен инфицировать множество растений, особенно из семейства пасленовых, таких как табак, томат и болгарский перец, вызывая характерные мозаичные узоры на листьях разных оттенков зеленого. При этом ВТМ не представляет опасности для млекопитающих [1]. Ранняя и точная диагностика растений,

инфицированных ВТМ, является важным шагом в разработке эффективных методов контроля ВТМ [2].

В настоящее время разработано несколько методов обнаружения молекул нуклеиновых кислот, такие как методы молекулярной гибридизации нуклеиновых кислот, полимеразная цепная реакция в реальном времени (ОТ-ПЦР), генные чипы (ДНК-микрочипы), поверхностный плазмонный резонанс и электрофорез в полиакриламидном геле, иммуноферментный анализ (ИФА), методы иммуноблоттинга, изотермические методы амплификации, секвенирование следующего поколения (NGS), связанных со

сложностью эксплуатации, высокой стоимостью или необходимостью привлечения специалистов [2, 3].

За последние несколько лет был достигнут значительный прогресс в разработке инструментов с высокой специфичностью и низкими пределами обнаружения для обнаружения ВТМ. Биосенсоры широко изучались из-за высокой чувствительности, хорошей специфичности, быстрого времени отклика, простоты эксплуатации и низкой стоимости. Стратегии биосенсорного обнаружения патогенов основаны на биологическом распознавании с использованием

различных рецепторов, таких как антитела, ДНК-зонды, фаги и другие.

Биосенсоры включают в себя биометрический компонент и преобразователь. Элемент биораспознавания обеспечивает специфичность работы сенсора благодаря селективным биохимическим взаимодействиям. В зависимости от типа преобразователя биосенсоры можно классифицировать на электрохимические, оптические и другие биосенсоры. Детектирование РНК ВТМ возможно при помощи электрохимических и флуоресцентных биосенсоров (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение аналитических возможностей биосенсоров для обнаружения ВТМ

Тип биосенсора	Модификация	Диапазон и предел обнаружения ВТМ	Источник
Флуоресцентный биосенсор	на основе хитозана и ARGET-ATRP	0.1 пМ - 10 нМ LOD = 1.14 фМ	[2]
Электрохимический биосенсор	на основе клик-химии и радикальной полимеризации с фотоиндуцированным переносом атома (photoATRP)	0.1 пМ - 10 нМ LOD = 3.5 фМ	[4]
Электро-хемилюминесцентный биосенсора	на основе клик-химии и ARGET-ATRP	0.1 пМ - 10 нМ LOD = 2.61 фМ	[5]
Электрохимический биосенсор	на основе ARGET-ATRP с рециркулирующей мишенью с помощью DSN	0.01 пМ до 10 нМ LOD = 2.9 фМ	[3]

Все рассмотренные биосенсоры продемонстрировали превосходные аналитические возможности в модельных и реальных образцах, что имеет большой потенциал для практического применения. Кроме того, сконструированные биосенсоры можно расширить для обнаружения других молекул нуклеиновых кислот. Методы биосенсорной детекции РНК ВТМ показывали высокую чувствительность, превосходную селективность, стабильность и хорошую воспроизводимость в оптимальных условиях с пределом обнаружения (LOD). В рассмотренных случаях флуоресцентный биосенсор на основе хитозана и ARGET-ATRP имеет наименьшее значение LOD, что делает этот биосенсор наиболее чувствительным ввиду того, что структура полисахарида и стратегия ARGET-ATRP позволяют осуществлять двойное усиление сигнала путем маркировки РНК ВТМ полимерами флуоресцина. Хитозан усиливает отклик и обеспечивает биосенсору высокую биосовместимость и разлагаемость.

Таким образом, разработка биосенсоров, обладающих высокой чувствительностью, селективностью, стабильностью и воспроизведением, остается сложной и актуальной задачей. Биосенсоры имеют широкий потенциал в применении в высокочувствительной детекции РНК-вирусов растений.

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Список литературы

1. Field-effect biosensor using virus particles as scaffolds for enzyme immobilization / A. Poghossian [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2018. V. 110. PP. 168-174.
2. Highly sensitive fluorescence detection of tobacco mosaic virus RNA based on polysaccharide and ARGET ATRP double signal amplification / H. Wang [et al.] // *Talanta*. 2023. V. 257. P. 124360.
3. An electrochemical biosensor based on ARGET ATRP with DSN-assisted target recycling for sensitive detection of tobacco mosaic virus RNA / Y. Zhang [et al.] // *Bioelectrochemistry*. 2022. V. 144. P. 108037.
4. Photoinduced atom transfer radical polymerization combined with click chemistry for highly sensitive detection of tobacco mosaic virus RNA / P. Li [et al.] // *Talanta*. 2021. V. 235. P. 122803.
5. Construction of electrochemiluminescence biosensor via click chemistry and ARGET-ATRP for detecting tobacco mosaic virus RNA / X. Guo [et al.] // *Analytical Biochemistry*. 2022. V. 655. P. 114834.

BIOSENSORS FOR DETECTION OF TOBACCO MOSAIC VIRUS RNC

Kapustina S.I.

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

Tobacco mosaic virus (TMV) is a common plant virus that affects yield and resistance to other phytopathogens by affecting the protective cell layer. CMV affects a wide range of plants, so monitoring plant health and early diagnosis of plant diseases is essential to reduce economic and social losses. Conventional methods for the detection of HTM RNA are quite expensive, difficult to operate, less sensitive and specific compared to new biosensor technologies. Biosensors offer great prospects for early detection of HTMs, which have important research and practical significance.

Keywords: *Tobacco mosaic virus, plants, biosensor, electrochemical biosensor, fluorescent biosensor, early diagnosis of phytopathologies, phytopathogen biosensors*

Analytical methods provide a new approach to the detection of TMV RNA.

Biosensors provide a versatile and efficient solution for highly sensitive and selective detection of TMV RNA.

Fluorescent biosensor showed the best results for the detection of TMV RNA.

Biosensor detection offers a new solution for early diagnosis of plant diseases caused by tobacco mosaic virus.

УДК 595.7:591.2

ЭКСПРЕССИЯ ГЕНОВ ИММУННОГО ОТВЕТА У КОЛОРАДСКОГО ЖУКА ПРИ МЕТАМОРФОЗЕ И В ОТВЕТ НА ГРИБНУЮ ИНФЕКЦИЮ

Косман Е.С.^а, Ярославцева О.Н., Роцкая У.Н., Носков Ю.Н., Крюков В.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систематики и экологии животных Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, г. Новосибирск, ул. Фрунзе, д. 11, Российская Федерация
e-mail: ^аvereshchagina86@gmail.com

Иммунные реакции насекомых могут зависеть от многочисленных факторов, в том числе от стадии развития насекомого. Развитие у колорадского жука проходит в различных средах, которые отличаются специфическими микробными сообществами. Личинки колорадского жука в старших возрастах и во время окукливания демонстрируют повышение устойчивости к энтомопатогенным грибам, но механизмы этого изменения недостаточно изучены. Мы изучили изменения экспрессии генов, связанных с иммунитетом в покровных тканях личинок и куколок колорадского жука методом количественной ПЦР. У куколок наблюдалась повышенная регуляция факторов транскрипции путей Toll, IMD и Jak-Stat. В то же время у куколок усиливалась экспрессия генов эффекторов (лектинов и антимикробных пептидов). Это может наблюдаться как в ответ на развитие инфекции, вызванной *Metarhizium robertsii*, так и из-за изменений в метаболизме насекомых перед окукливанием. Мы считаем, что усиление регуляции генов, связанных с иммунной системой у куколок, является адаптацией, вызванной миграцией личинок в почву, где высока вероятность контактов с энтомопатогенными грибами.

Ключевые слова: *Leptinotarsa*, микоз, *Metarhizium*, экспрессия генов, иммунитет

Иммунные реакции насекомых и восприимчивость к патогенным микроорганизмам меняются в процессе онтогенеза [1, 2]. Важную роль в формировании этих реакций могут играть как сам процесс метаморфоза, так и среда обитания, в которой они происходят. Каждая среда обитания (например, растение, опавшие листья или почва) содержит определенное сообщество микроорганизмов, включая энтомопатогенные грибы, такие как *Beauveria* и *Metarhizium* [3, 4]. Заражение насекомых этими грибами в естественных и антропогенных экосистемах чаще всего происходит в опавшей листве и почве [3]. С этой

точки зрения представляют интерес изменения в иммунитете хозяина на стадиях завершения кормления и ухода в почву.

Колорадский жук *Leptinotarsa decemlineata* – один из самых опасных вредителей картофеля. Известно, что энтомопатогенные грибы могут оказывать значительное влияние на естественную регуляцию его популяций и используются для биологической борьбы с этим вредителем [5, 6]. Однако изменения молекулярных механизмов, таких как регуляция иммунных сигнальных путей, в течение этого периода остаются слабо изученными.

Среди иммунных сигнальных путей насекомых выделяют каскад Toll, связанный с защитой от грамположительных бактерий и грибов, путь IMD в основном связанный с защитой от грамотрицательных бактерий и Jak-Stat – преимущественно от вирусов [7]. Тем не менее, пути IMD и Jak-Stat также активируются у насекомых в ответ на микозы, и подавление или химическое ингибирование каскадов IMD и Jak-Stat приводит к повышенной восприимчивости к грибам [8, 9].

Ингибиторы металлопротеиназ насекомых (IMPI) являются одними из ключевых противомикозных соединений, инактивирующих грибные протеиназы [10]. Рициноподобные β-лектины (RBL) родственны лектинам С-типа и могут участвовать в защите насекомых от энтомопатогенов [11]. Одорант-связывающие пептиды (OBPs), функционируют в широком спектре физиологических процессов и могут изменять экспрессию в ответ на грибные инфекции [12]. Понимание механизмов, которые работают против энтомопатогенов у колорадского жука, позволит улучшить методы биологического контроля над этим вредителем.

В настоящей работе мы изучали изменения экспрессии генов у личинок последнего возраста и куколок колорадского жука, связанных с иммунными сигнальными путями (Toll, IMD и Jak-Stat), а также с продукцией IMPI, OBPs, и лектинов С-типа в тканях кутикулы. Были исследованы образцы кутикулы личинок и куколок здоровых жуков и зараженных

энтомопатогенным грибом *Metarhizium robertsii*. Для заражения использовался Штамм P-72 *M. robertsii* (генбанк № KP172147), насекомых на 15 сек погружали в суспензию с Tween-20 с концентрацией конидий $3,5 \times 10^6$ конидий/мл). Для каждой временной точки 24 часа и 72 часа после заражения и каждой контрольной группы были взяты 6 биологических повторностей; одна повторность включала ткани кутикулы личинок или куколок, взятых от 5 насекомых. кПЦР проведен по общепринятым методикам. В качестве референсных были использованы следующие гены: 60S рибосомальные белки L4 и L18 (*rp 4* и *rp 18*) и ADP-фактор рибозилирования 4 (*arf19*). В качестве целевых генов использованы транскрипционные факторы Toll, IMD и Jak-Stat путей (*dorsal/dif*, *nfkappab* и *stat*, соответственно), ингибитор металлопротеиназ (*impi*), ген рицинового лектина (*LdrbLk*), одорант-связывающего пептида (*obp*) и антимикробных пептидов (*attacin*, *acaloleptin*). Экспрессию генов рассчитывали методом $2^{\Delta\Delta C_q}$ при помощи Bio-Rad CFX Manager (Bio-Rad).

Установлено, что у куколок значительно повышена базовая экспрессия генов Toll, IMD и Jak-Stat путей (*dorsal/dif*, *nfkappab* и *stat*), а также генов металлопротеиназ и генов эффекторов – лектинов и антимикробных пептидов (рис. 1, 2). Кроме того, в ответ на инфекцию *M. robertsii* куколки значительно сильнее реагировали подъемом экспрессии *Ldrblk* и *obp* на начальных этапах микоза (рис. 2).

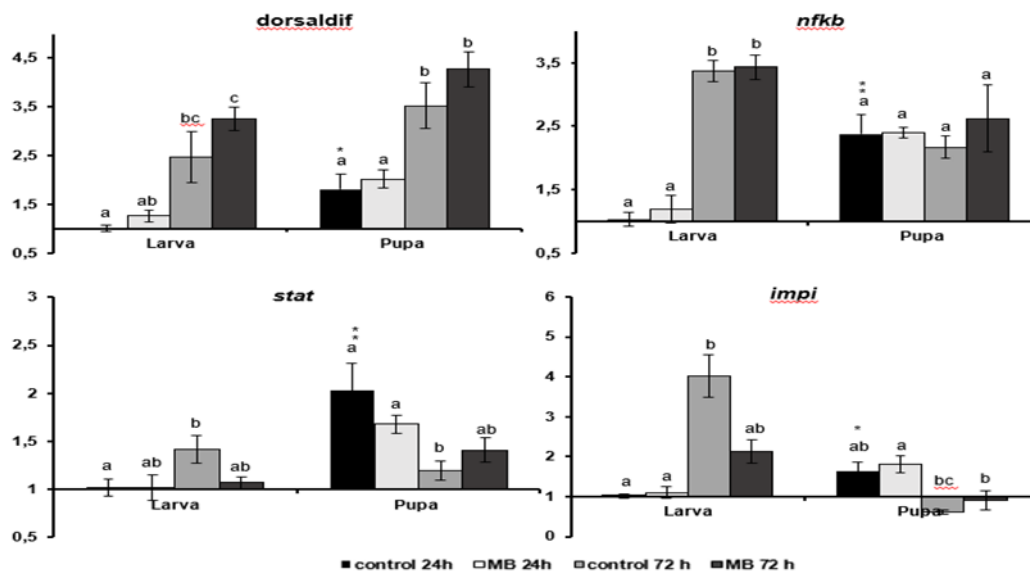


Рисунок 1. Относительная экспрессия генов транскрипционных факторов путей иммунного ответа Toll (транскрипционный фактор *dorsaldif*), Jak-Stat (транскрипционный фактор *stat*), IMD (транскрипционный фактор *nfkappab*) и ингибитора металлопротеиназ (транскрипционный фактор *impi*) в кутикуле личинок и куколок колорадского жука после 24 часов и 72 часов заражения *M. robertsii*.

Данные нормализованы по отношению к экспрессии трех референсных генов *rp4*, *rp18* и *arf19*.

Ось Y показывает изменение относительно личинок (Control).

Разные буквы указывают на значительные различия между вариантами (тест Данна, $P < 0.05$)

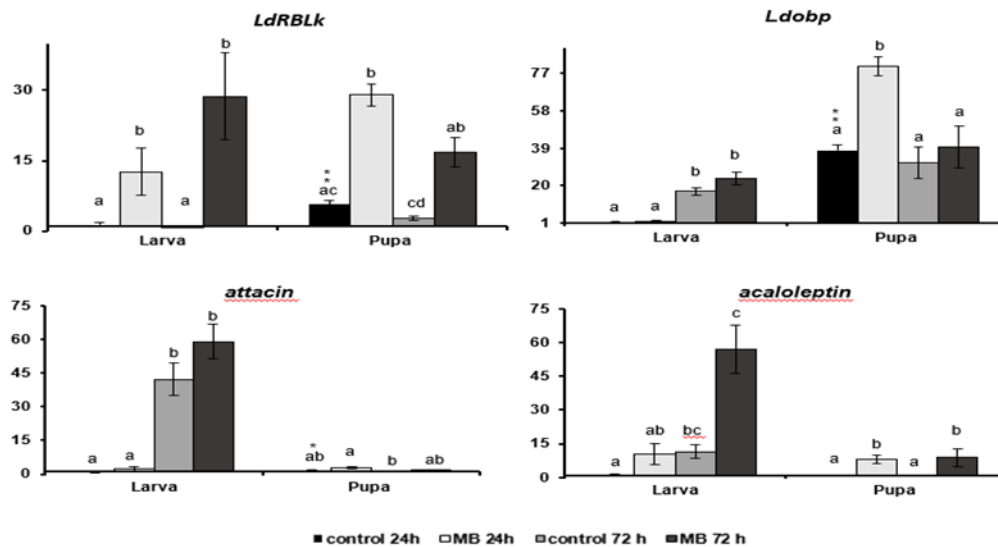


Рисунок 2. Относительная экспрессия транскрипционных факторов гена рицинового лектина (*LdRBLk*), одорант-связывающего пептида (*Ldobp*) и антимикробных пептидов (*attacin*, *acaloleptin*) в кутикуле личинок и куколок колорадского жука после 24 часов и 72 часов заражения *M. robertsii*. Данные нормализованы по отношению к экспрессии трех референсных генов *rp4*, *rp18* и *arf19*. Ось Y показывает изменение относительно личинок (Control). Разные буквы указывают на значительные различия между вариантами (тест Данна, $P < 0.05$)

Таким образом, более высокая устойчивость куколок к грибной инфекции коррелирует с повышенной экспрессией генов, связанных с антигрибной защитой в кутикуле.

Мы предполагаем, что более высокая экспрессия генов, связанных с иммунитетом у куколок колорадского жука, связана с миграцией личинок в почву, где существует высокий риск взаимодействия с энтомопатогенными грибами. Это представление согласуется с усилением клеточного иммунитета и защиты покровов у личинок в период окукливания [13].

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-14-00309 (рук. Крюков В.Ю.).

Список литературы

1. Critchlow J.T., Norris A., Tate A.T. The legacy of larval infection on immunological dynamics over metamorphosis // *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 2019. V. 374. P. 20190066.
2. Tate A.T., Graham A.L. Dynamic Patterns of Parasitism and Immunity across Host Development Influence Optimal Strategies of Resource Allocation // *Am. Nat.* 2015. V. 186. PP. 495-512.
3. Jaronski S.T. Soil ecology of the entomopathogenic Ascomycetes: A critical examination of what we (think) we know / In *Use of Entomopathogenic Fungi in Biological Pest Management*; Ekesi S., Maniania N.K., Eds.; Research Signpost Inc.: Kerala, India, 2007. PP. 91-143. ISBN 978-81-308-0192-6.
4. Scheepmaker J., Butt T. Natural and released inoculum levels of entomopathogenic fungal biocontrol

agents in soil in relation to risk assessment and in accordance with EU regulations // *Biocontrol Sci. Technol.* 2010. V. 20. PP. 503-552.

5. Potential for microbial biological control of coleopteran and hemipteran pests of potato / S.P. Wright [et al.] // *In Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology 3 (Special Issue 1)*; Tennant P., Benkeblia N., Eds.; Global Science Book: Ikenobe, Japan, 2009. PP. 25-38.

6. Weber D.C., Blackburn M.B., Jaronski S.T. Biological and behavioral control of potato insect pests / *In Insect Pests of Potato*, 2nd ed.; Alyokhin A., Rondon S.I., Gao Y., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2022. PP. 231-276.

7. Entomopathogenic fungi: New insights into host-pathogen interactions / T.M. Butt [et al.] // *In Advances in Genetics*; Lovett B., St. Leger R.J., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2016. V. 94. PP. 307-364. ISBN 9780128046944.7.

8. JAK/STAT signaling pathway-mediated immune response in silkworm (*Bombyx mori*) challenged by *Beauveria bassiana* / T. Geng, D.-D. Lv, Y.-X. Huang [et al.] // *Gene*. 2016. V. 595. PP. 69-76.

9. The *Aedes aegypti* IMD pathway is a critical component of the mosquito antifungal immune response / J.L. Ramirez [et al.] // *Dev. Comp. Immunol.* 2018. V. 95. PP. 1-9.

10. Vilcinskis A. Coevolution between pathogen-derived proteinases and proteinase inhibitors of host insects // *Virulence*. 2010. V. 1. PP. 206-214.

11. Identification of the Ricin-B-Lectin LdRBLk in the Colorado Potato Beetle and an Analysis of Its Expression in Response to Fungal Infections / U. Rotskaya, V. Kryukov, E. Kosman [et al.] // J. Fungi. 2021. V. 7. P. 364.

12. Wei Z., Ortiz-Urquiza A., Keyhani N.O. Altered Expression of Chemosensory and Odorant Binding

Proteins in Response to Fungal Infection in the Red Imported Fire Ant, *Solenopsis invicta* // Front. Physiol. 2021. V. 12.

13. Changes in antifungal defence systems during the intermoult period in the Colorado potato beetle / O.G. Tomilova, O.N. Yaroslavtseva, M.D. Ganina [et al.] // J. Insect Physiol. 2019. V. 116. PP. 106-117.

EXPRESSION OF IMMUNE RESPONSE GENES IN THE COLORADO POTATO BEETLE DURING METAMORPHOSIS AND IN RESPONSE TO A FUNGAL INFECTION

Kosman E.S., Yaroslavtseva O.N., Rotskaya U.N., Noskov Y.N., Kryukov V.Yu.

Institute of Systematics and Ecology of Animals Siberian Branch of RAS, Frunze st. 11, Novosibirsk, Russian Federation, 630091

Insect immune responses depend on numerous factors, including the stage of insect development. The Colorado potato beetle develops in various environments that differ in specific microbial communities. Pupae and last-instar larva of the Colorado potato beetle observed a strong increase in resistance to entomopathogenic fungi, but mechanisms of this change are insufficiently understood. We studied changes in the expression of immunity related genes in the integument of pupae and during last-instar larvae period by quantitative PCR. By the pupal stage, there was an upregulation of transcription factors from the Toll, IMD, and Jak-Stat pathways, as well as genes encoding for metalloprotease inhibitors, odorant-binding proteins, and the gene LdRBLk encoding β -lectin. Most of these genes can be activated in response to a topical infection with *Metarhizium robertsii* and due to changes in the insect's metabolism prior to pupation. We believe that the upregulation of the immune system genes in pupae is an adaptive response caused by the migration of larvae to soil, where there is a high probability of encountering entomopathogenic fungi.

Keywords: *Leptinotarsa*, gene expression, mycosis, immunity, *Metarhizium*

УДК 582.288

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И pH СРЕДЫ НА ЭКСПРЕССИЮ ГЕНОВ СЕМЕЙСТВА СУПЕРОКСИДДИСМУТАЗ У *BEAUVERIA BASSIANA*

Крылова П.С.^{1,a}, Шестерикова Е.М.², Ханова А.С.², Блинова Я.А.², Бондаренко В.С.², Фролова Н.А.², Бондаренко Е.В.²

¹ 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

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: ^a polli1201@mail.ru

Работа посвящена оценке транскрипционной активности четырех генов семейства супероксиддисмутаз в зависимости от температуры инкубации и pH среды в малоизученном штамме *Beauveria bassiana*, выделенном из имаго сибирского шелкопряда. Гриб инкубировали при температурах 15, 20, 25 и 30 °C и pH 5,5; 6,0; 6,5 и 7,0 в трех биологических повторностях для каждого экспериментального условия. Методом ПЦР в реальном времени оценивали активность генов семейства Sod. Различные значения pH оказали статистически значимое влияние только на Sod4 (при t = 25 °C). Выявлена положительная корреляция между экспрессией гена и уровнем pH для Sod4 при 25 °C и отрицательная для Sod2 при 20 °C. Выявлена нелинейная зависимость экспрессии Sod2 от температуры и pH. Вне зависимости от температуры и pH экспрессия всех четырех исследованных генов положительно коррелировала между собой.

Ключевые слова: *Beauveria bassiana*, микоинсектицид, энтомопатоген, супероксиддисмутазы, экспрессия генов, влияние абиотических факторов

Использование энтомопатогенных грибов в качестве биологических инсектицидов может способствовать повышению эффективности защиты лесных и сельскохозяйственных насаждений от насекомых-вредителей. Аскомицет *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin входит в состав биологического пестицида для защиты растений от широкого круга вредителей, однако, следует отметить, что для заражения необходима высокая инфекционная нагрузка (2-6 млрд спор/г препарата), и эффективность препарата сильно зависит от температуры и влажности, что ограничивает его применение. Таким образом, актуальной задачей остается получение новых вирулентных штаммов *B. bassiana* с меньшей зависимостью от климатических факторов. Известно, что устойчивость к абиотическим факторам определяется, среди прочих, эффективной работой антиоксидантной системы, одними из основных компонентов которой являются супероксиддисмутазы (семейство Sod) [1, 2]. Для выбора мишеней для генетического редактирования и получения в будущем новых штаммов, целью данной работы было провести оценку транскрипционной активности генов семейства супероксиддисмутаз в зависимости от температуры инкубации и pH среды.

В работе использовался малоизученный штамм гриба *B. bassiana*, выделенный из имаго сибирского шелкопряда [3]. Гриб выращивался на среде (глюкоза – 20,0; NaNO₃ – 2,0; K₂HPO₄ – 1,0; MgSO₄ – 0,5; KCl – 0,5; агар – 20,0 и вода дистиллированная – до 1000 мл) с pH 5,5; 6,0; 6,5 и 7,0 при температурах 15, 20, 25 и 30 °C в трех биологических повторностях для каждого экспериментального условия. Тотальную

РНК выделяли при помощи набора «Лира» (Биолаб-микс, Россия) по протоколу производителя. Концентрацию и качество РНК измеряли на спектрофотометре «NanoDrop ONEc» (Thermo Scientific, США). После экстракции 1 мкг тотальной РНК обрабатывали ферментом DNase I (Thermo Scientific, США). кДНК синтезировали при помощи «MMLV RT» (Евроген, Россия) по протоколу производителя. Транскрипционную активность генов семейства Sod (Sod1, 2, 4, 5 [1, 2]) оценивали методом ПЦР в реальном времени с нормализацией данных по 4 референтным генам (два гена 18S рРНК, ген гликопротеида Bgpd и актлина) [2, 4]. ПЦР в реальном времени проводили на приборе «ДТпрайм» (ДНК-Технология, Россия). Каждый образец измеряли в двух технических повторностях. В качестве единиц измерения относительной транскрипционной активности целевых генов использовали значения $2^{\Delta C_p}$ ($2^{(C_{p \text{ реф}} - C_{p \text{ тарг}})}$, где $C_{p \text{ реф}}$ – средняя C_p референтных генов; $C_{p \text{ тарг}}$ – C_p целевого гена) [5]. Статистический анализ выполнен в среде программирования R, версия 4.4.1 с применением непараметрического дисперсионного анализа (критерий Крускала-Уоллеса с апостериорным тестом Данна с поправкой на множественность FDR). Корреляцию оценивали с использованием непараметрического критерия Спирмена.

Выявлена статистически значимая положительная корреляция между экспрессией гена и уровнем pH для: Sod4 при 25 °C ($\rho=0.64$; $p=0.006$) и отрицательная для Sod2 при 20 °C ($\rho=-0.64$; $p=0.01$).

Между уровнями экспрессии исследуемых генов выявлена статистически значимая положительная корреляция разной степени силы (рис. 2).

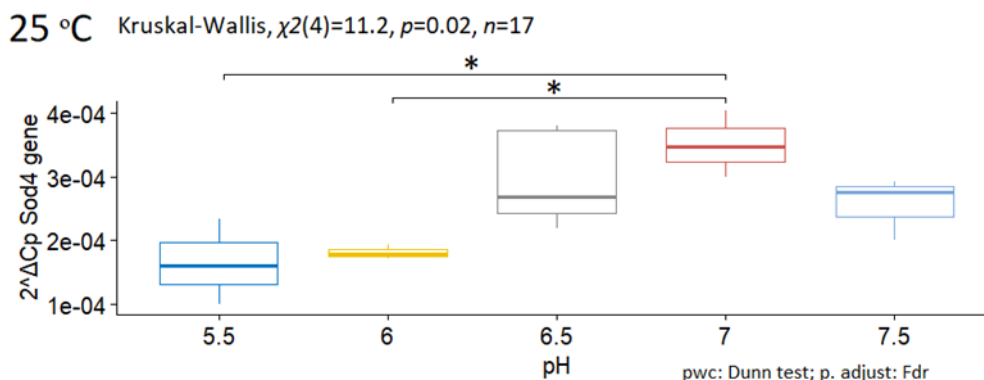


Рисунок 1. Уровень экспрессии гена Sod4 в группе инкубации 25 °C в зависимости от pH среды.

* – статистически значимые различия при $p \leq 0.05$
(критерий Крускала-Уоллеса с апостериорным тестом Данна)

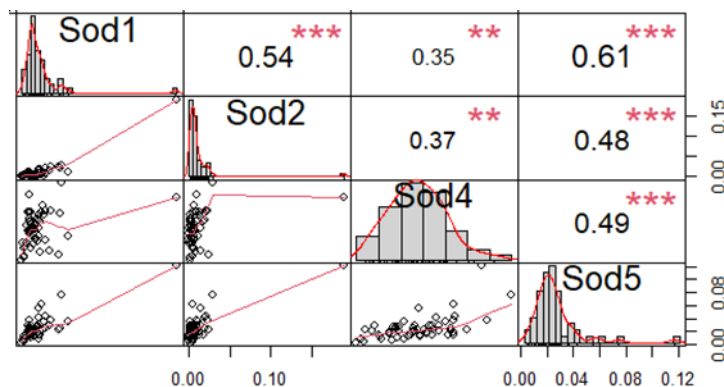


Рисунок 2. Матрица корреляций между уровнями экспрессии генов семейства Sod. Цифрами представлены коэффициенты корреляции Спирмена при ** – $p \leq 0.01$; *** – $p \leq 0.001$

Супероксиддисмутазы превращают супероксид в H_2O_2 и участвуют в обеспечении роста и развития *B. bassiana*, а также в устойчивости к стрессу и вирулентности [1, 2]. В этом плане значимую роль играет Sod2 – цитозольная марганецсодержащая супероксиддисмутаза, сверхэкспрессия которой ассоциируется со стрессоустойчивостью и вирулентностью [1]. В нашем эксперименте наблюдалась нелинейная зависимость экспрессии Sod2 от температуры и pH: наибольшие медианные значения экспрессии этого гена отмечены при температуре 20 °C и pH=5.5 (0.029 отн. ед.), а наименьшие (0.001 отн. ед.) – при температуре 25 °C и pH=5.5; 6.0; 7.5 и 30 °C при pH=5.5. Выявлены пониженные количества транскриптов митохондриальной железосодержащей супероксиддисмутазы Sod4 при pH среды менее 6.5 в образцах с оптимальной температурой инкубации (25 °C). Вне зависимости от температуры и pH экспрессия всех четырех исследованных генов положительно коррелировала между собой.

В дальнейшем для лучшего понимания активности антиоксидантной системы *B. bassiana* при воздействии различных факторов среды будет проведен сравнительный анализ уровней экспрессии генов семейств супероксиддисмутаз и каталаз.

Исследования проведены в рамках Государственного задания «Исследования воздействия радиации на процессы жизнедеятельности растений, животных и микроорганизмов на генетическом, молекулярном и клеточном уровне с применением современных методов» (№ 5ф.6.3), НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ.

Список литературы

1. A new manganese superoxide dismutase identified from *Beauveria bassiana* enhances virulence and stress tolerance when overexpressed in the fungal pathogen / X.-Q. Xie, J. Wang, B.-F. Huang, S.-H. Ying, M.-G. Feng // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. V. 86(5). PP. 1543-1553. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2437-2>.
2. Catalases play differentiated roles in the adaptation of a fungal entomopathogen to environmental stresses / Z.-L. Wang, L.-B. Zhang, S.-H. Ying, M.-G. Feng // *Environmental Microbiology*. 2013. V. 15(2). PP. 409-418. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2012.02848.x>.
3. Чемезова А.А., Майкова О.О. Видовая идентификация энтомопатогенного гриба с помощью молекулярно-генетического анализа // 12-я Международная школа молодых ученых «Системная Биология и Биоинформатика», SBB-2020 (Новосибирск, 14-20 сентября, 2020 год). Новосибирск, 2020. С. 104. DOI 10.18699/SBB-2020-88.
4. Mitogen-Activated Protein Kinase hog1 in the Entomopathogenic Fungus *Beauveria bassiana* Regulates Environmental Stress Responses and Virulence to Insects / Y. Zhang, J. Zhao, W. Fang [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology*. 2009. V. 75(11). PP. 3787-3795. <https://doi.org/10.1128/AEM.01913-08>.
5. Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of Relative Gene Expression Data Using Real-Time Quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ Method // *Methods*. 2001. № 4 (25). PP. 402-408.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PH ON THE EXPRESSION OF THE SUPEROXIDE DISMUTASE FAMILY GENES IN *BEAVERIA BASSIANA*

Krylova P.S.¹, Shesterikova E.M.², Khanova A.S.², Blinova Ya.A.², Bondarenko V.S.², Frolova N.A.², Bondarenko E.V.²

¹ Russian State Agrarian University – MTAА, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

The transcriptional activity of four superoxide dismutase genes was assessed depending on the incubation temperature and pH of the medium in a strain of *Beauveria bassiana* isolated from the imago of the Siberian silkworm. The fungus was incubated at temperatures of 15, 20, 25 and 30 °C and pH 5.5; 6.0; 6.5 and 7.0 in three biological replicates for each experimental condition. The activity of the Sod family genes was estimated by real-time PCR. Different pH values showed a statistically significant effect only on Sod4 (at t = 25 °C). A statistically significant positive correlation was found between gene expression and pH for Sod4 at 25 °C and a negative one for Sod2 at 20 °C. A nonlinear dependence of Sod2 expression on temperature and pH was revealed. Regardless of temperature and pH, the expression of all four genes studied positively correlated with each other.

Keywords: *Beauveria bassiana*, mycoinsecticide, entomopathogen, Superoxide dismutase, gene expression, influence of abiotic factors

The object of the study was the ascomycete *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin, which is used as a biological pesticide for plant protection against a wide range of insect pests. However, infection requires a high infection load (2-6 billion spores/g formulation) and optimal climatic conditions. Resistance to abiotic factors is determined, among others, by the efficient operation of the antioxidant system, the main components of which include superoxide dismutases (Sod family). The aim of this work was to evaluate the transcriptional activity of superoxide dismutase family

genes in *Beauveria bassiana* depending on the incubation temperature and pH.

pH value significantly affected only Sod4 expression under the 25 °C incubation group. A statistically significant positive correlation between gene expression and pH level was found for Sod4 at 25 °C ($\rho=0.64$; $p=0.006$) and negative for Sod2 at 20 °C ($\rho=-0.64$; $p=0.01$). A non-linear dependence of Sod2 expression on temperature and pH was revealed. Regardless of temperature and pH, the expression of all four genes positively correlated with each other.

УДК 575.224.29

ДЕТЕКЦИЯ И ГЕНОМНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИНСЕРЦИЙ РЕТРОТРАНСПОЗОНОВ В ГЕНОМЕ РАПСА (*B. NAPUS*)

Латыпова А.А., Тюрин К.Н., Киров И.В.

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: info@mipt.ru, biotech@iab.ac.ru

Транспозоны играют ключевую роль в адаптации растений за счет геномной изменчивости, поэтому они представляют особый интерес для исследователей эволюционных процессов и разработчиков новых методов в агробиотехнологии. В рамках исследования были детектированы инсерции LTR ретротранспозонов в 11 сортах рапса различных экотипов. Также были выявлены особенности распределения инсерций ретротранспозонов семейства ANTARES, обнаруженных при активации перемещения транспозонов в образцах рапса. В том числе обнаружены инсерции в участках белок-кодирующих участках и участках мРНК. Распределение инсерций ANTARES варьируется в зависимости от экотипа рапса, что подчеркивает их значимость в генетической изменчивости *B. napus* и указывает на возможную роль этого семейства в фенотипической вариации рапса. Данная работа вносит вклад в понимание механизмов генетической изменчивости сортов рапса, а также открывает новые перспективы для использования транспозонов в биотехнологии и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: ретротранспозоны, *Brassica napus*, инсерционные полиморфизмы, биоинформатика

Транспозоны – это мобильные элементы генома (МЭ), получившие свое название за способность к транспозиции, то есть к перемещению. Транспозоны составляют значительную (до 80 %) часть генома

некоторых растений, в частности кукурузы [1]. При своем перемещении (транспозиции) МЭ зачастую становятся источниками мутаций, изменения экспрессии генов и хромосомных перестроек, что делает их одним из важнейших источников генотипической и фенотипической изменчивости [2, 3]. Особый интерес привлекли транспозоны, чьи inserции оказали влияние на сельскохозяйственно значимые признаки, включая экотип растения, окраску плода или его химический состав. Так, анализ пангенома *Brassica rapa* (репы) показал, что inserции МЭ влияли на гены, важные для окультуривания [4].

В настоящей работе была проведена детекция inserций и делеций ретротранспозонов в *Brassica napus* и оценено фенотипическое проявление таких

полиморфизмов в 11 сортах *B. napus*. (табл. 1) Детекция была проведена с помощью пайплайнов обработки данных секвенирования (SPLITREADER [5], TEPID [6]), которые были предварительно протестированы на данных *Arabidopsis thaliana* (рис. 1). Обнаруженные в сортах *B. napus* inserции LTR ретротранспозонов были расположены как в периферических регионах, так и в плечах хромосом, хотя плечи были слегка обогащены inserциями (рис. 2). Также была отмечена разница в активности транспозиции между субгеномами *B. napus*, что подчеркивает перспективность исследования совместного влияния аллополиплоидии и перемещения МЭ на организацию генома.

Таблица 1

Экотипы, географическое положение и идентификаторы исследованных образцов сортов *B. napus*

Cultivar	SRA accession	Ecotype	Geo	Biosample accession
Westar	SRR9207856	spring-type	Canada	SAMN11956387
Tapidor	SRR9300308	winter-type	France	SAMN11956335
No2127	SRR9320499	spring-type	Germany	SAMN11956312
Quinta	SRR9291510	winter-type	China	SAMN11956249
Shengli	SRR9302977	semi-winter-type	China	SAMN11956225
Zheyu7	SRR9313688	semi-winter-type	China	SAMN11956220
Gangan	SRR9304968	semi-winter-type	China	SAMN11956204
Ningyou7	SRR8740815	semi-winter-type	China (Wuhan)	SAMN11124344
Express617	SRR10382371	winter-type	Germany	SAMN13175265
ZS11	SRR9208060	semi-winter-type	China	SAMN11956108
Zy821	SRR7080894	winter-type	China	SAMN08998757

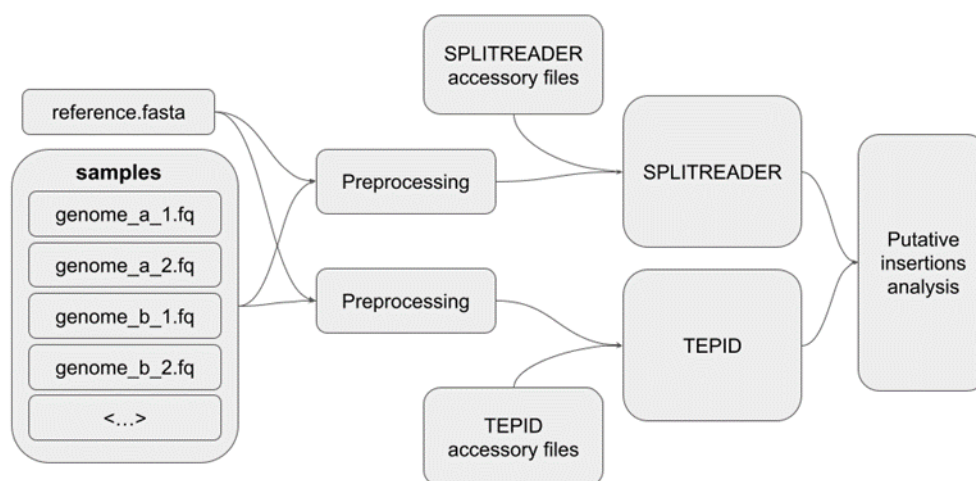


Рисунок 1. Схема обработки данных и применения пайплайнов для анализа inserционных полиморфизмов

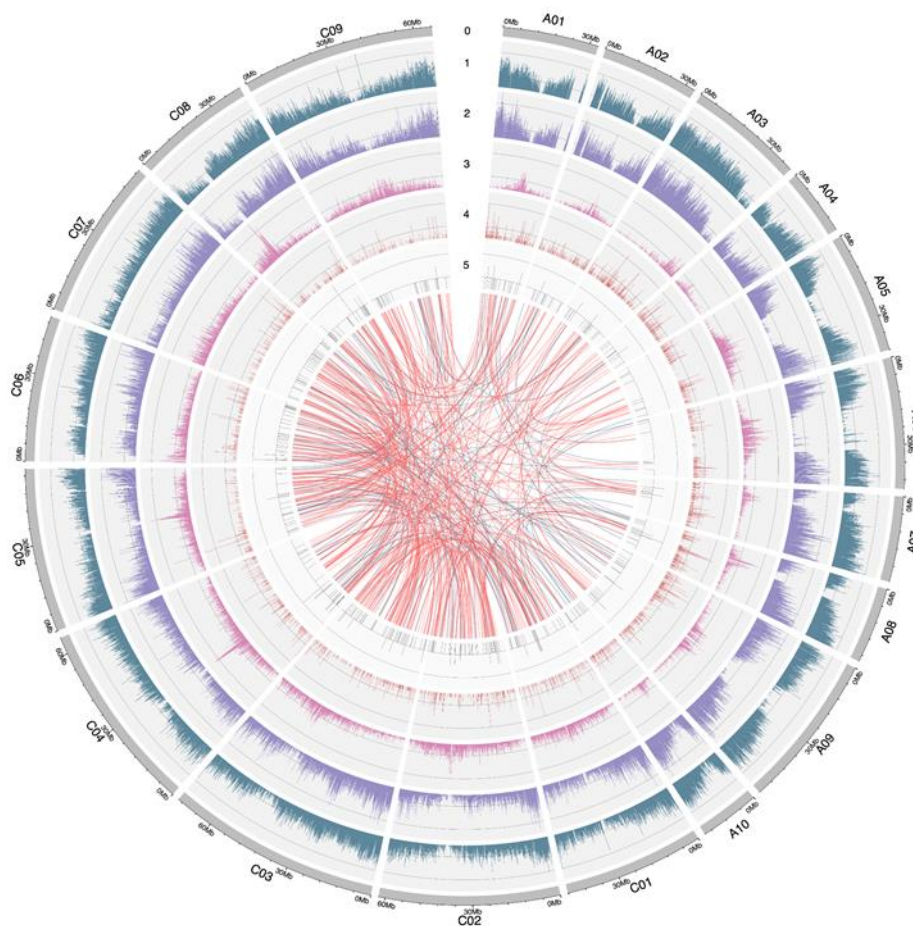


Рисунок 2. Хромосомное распределение элементов генома *B. napus*, окно 100kb.

Трек **0** – хромосомы референсного генома; **1** – плотность референсных участков мРНК; **2** – плотность референсных CDS; **3** – плотность референсных LTR ретротранспозонов; **4** – плотность инсерций ретротранспозонов ANTARES (см. Раздел 5); **5** – плотность инсерций LTR ретротранспозонов, а также линии их транспозиции в сортах Westar (синий) и No2127 (красный)

Среди LTR ретротранспозонов особое внимание было уделено ANTARES – семейству, обнаруженному при активации перемещения транспозонов в сорте ANTARES. По количеству инсерций ретротранспозоны этого семейства делятся на активные и неактивные, причем среди активных ANTARES неполноразмерные транспозоны без PBS (primer binding site) и TSD (target site duplication) генерируют больше инсерций, чем полноразмерные. Как и инсерции LTR ретротранспозонов в целом, инсерции ANTARES слегка смещены в плечи хромосом (рис. 2). Инсерции ANTARES также могут играть значительную роль в фенотипических отличиях сортов рапса, так как они пересекаются с позициями генов: 21.13 % инсерций пересекаются с участками мРНК, при этом 1.84 % инсерций попадают непосредственно в кодирующие участки. Функционально эти гены разнообразны, но наблюдается обогащение по генам, ассоциированным с цветением, транспортом неорганических ионов, метаболизмом, в особенности с процессами катаболизма сахаров и соединений серы, а также биосинтезом фенилпропаноидов. Также было отмечено, что распределение инсерций ANTARES среди

сортов разных экотипов неоднородно: в полуозимых сортах число инсерций статистически значимо меньше числа инсерций в яровых сортах.

Проведенное исследование вносит вклад в понимание геномной организации и роли транспозонов в растениях. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения генетической изменчивости и адаптации растений, а также для разработки подходов биологического мутагенеза в сельском хозяйстве.

Список литературы

1. The B73 Maize Genome: Complexity, Diversity, and Dynamics / P.S. Schnable, D. Ware, R.S. Fulton [et al.] // Science. 2009. V. 326. The B73 Maize Genome. № 5956. PP. 1112-1115.
2. Belyayev A. Bursts of transposable elements as an evolutionary driving force // Journal of Evolutionary Biology. 2014. V. 27. № 12. PP. 2573-2584.
3. Lisch D. How important are transposons for plant evolution? // Nature Reviews Genetics. 2013. V. 14. № 1. PP. 49-61.

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

5. Baduel P., Quadrana L., Colot V. Efficient Detection of Transposable Element Insertion Polymorphisms

Between Genomes Using Short-Read Sequencing Data // Plant Transposable Elements: Methods and Protocols. New York, NY: Springer US, 2021. PP. 157-169.

6. Population scale mapping of transposable element diversity reveals links to gene regulation and epigenomic variation / T. Stuart, S.R. Eichten, J. Cahn [et al.] // eLife. 2016. V. 5. P. e20777.

DETECTION AND GENOMIC ORGANIZATION OF RETROTRANSPOSON INSERTIONS IN THE RAPE (*B. NAPUS*) GENOME

Latypova A.A., Tyurin K.N., Kirov I.V.

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

Transposons play a key role in plant adaptation through genomic variability; therefore, they are of particular interest to researchers of evolutionary processes and developers of new methods in agrobiotechnology. During the study, LTR retrotransposon insertions were detected in 11 rapeseed samples of different ecotypes. The distribution features of ANTARES family retrotransposon insertions detected during the transposition activation in rapeseed samples were also revealed. This included the detection of insertions at protein-coding regions and mRNA sites. For ANTARES, the distribution of insertions was shown to vary across rapeseed ecotypes, highlighting their importance in *B. napus* genetic variation and indicating a possible role for this family in rapeseed phenotypic variation. This work contributes to the understanding of plant genetic variability and adaptation, which opens new perspectives for the use of transposons in biotechnology and agriculture.

Keywords: *retrotransposons, Brassica napus, transposon insertion polymorphisms, bioinformatics*

In the present study, we detected insertions and deletions of retrotransposons in *Brassica napus* and evaluated the phenotypic manifestation of such polymorphisms in 11 *B. napus* cultivars. The detection was performed using NGS data processing pipelines (SPLITREADER [1], TEPIID [2]), which were previously tested on *Arabidopsis thaliana* data. The LTR retrotransposon insertions detected in *B. napus* cultivars were located in both pericentromeric regions and chromosome arms, although the arms were slightly enriched in insertions. Among the LTR retrotransposon families, ANTARES, which was initially detected by transposition activation in laboratory rapeseed samples, received special attention. Retrotransposons in this family are divided into active and inactive transposons based on the number of insertions, and among active ANTARES, incomplete transposons without PBS (primer binding site) and TSD (target site duplication) generate more insertions than full-length transposons. ANTARES insertions may also play a significant role in phenotypic differences among *B. napus* varieties because they

overlap with gene positions: 21.13 % of the insertions overlap with mRNA sites, with 1.84 % of the insertions falling directly into coding regions. It was also noted that the distribution of ANTARES insertions among varieties of different ecotypes is heterogeneous: in semi-winter varieties, the number of insertions is statistically significantly lower than the number of insertions in spring varieties.

References

1. Baduel P., Quadrana L., Colot V. Efficient Detection of Transposable Element Insertion Polymorphisms Between Genomes Using Short-Read Sequencing Data // Plant Transposable Elements: Methods and Protocols. New York, NY: Springer US, 2021. PP. 157-169.

2. Population scale mapping of transposable element diversity reveals links to gene regulation and epigenomic variation / T. Stuart, S.R. Eichten, J. Cahn [et al.] // eLife. 2016. V. 5. P. e20777.

ОЦЕНКА СОРТОВОЙ ЧИСТОТЫ *CAMELINA SATIVA* L. НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНО-МАРКЕРНОГО АНАЛИЗА

Минина Е.В.^а, Логинова Н.Н., Вересова П.Д., Базанов Т.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр лубяных культур», 170041, г. Тверь, Комсомольский пр-кт, д. 17/56, Российская Федерация

e-mail: ^а ev.smirnova@fncl.ru

Одной из важных задач селекционеров и семеноводческих хозяйств является сохранение сортовой чистоты сельскохозяйственных растений. С развитием генетических технологий ДНК-маркеры стали ценным инструментом в селекционных программах растений и могут использоваться для оценки качества посевного материала. Данное исследование рассматривает возможность использования молекулярно-генетических маркеров для быстрой оценки сортовой чистоты как одного из основных параметров семенного материала. В работе было исследовано 17 сортов рыжика посевного (*Camelina sativa* L.), включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации. Образцы подвергались SSR-анализу методом ПЦР с мечеными праймерами. Полученные результаты выявили, что генетическая однородность изученного сортового материала рыжика посевного находилась в зависимости от времени создания сорта. Использованные SSR-маркеры показали эффективность для контроля сортовой чистоты рыжика посевного.

Ключевые слова: рыжик посевной, молекулярные маркеры, SSR-маркеры, ПЦР, сортовая чистота генетическая однородность

Одним из ключевых элементов современного сельскохозяйственного производства является сохранение и подтверждение сортовой чистоты на всех этапах селекции, семеноводства и производства технических культур [1]. Сортовая чистота, определяемая по совокупности морфологических и иных характеристик, позволяет подтвердить соответствие образца заявленному сорту. Одним из способов ее определения может стать оценка генетической однородности посевного материала. Возникновение генетической неоднородности возможно по ряду причин, таких как переопыление, мутации, наличие механических примесей, технологических нарушений в процессе уборки урожая и т.д. [2, 3], что приводит к снижению сортовой чистоты с каждым последующим поколением [1].

Современные методы могут дополнить традиционные методы определения сортовой принадлежности технических культур на основе морфологических и биохимических признаков [4]. В настоящее время широкое применение нашли методы, основанные на ДНК-маркерном анализе.

Для определения генетической однородности сортов одними из наиболее информативных ДНК-маркеров являются SSR-маркеры (простые повторяющиеся последовательности, SSR – simple sequence repeat). Они основаны на полиморфизме микросателлитных последовательностей генома и получили широкое распространение благодаря своей воспроизводимости, многоаллельной природе и доминантному наследованию. Метод SSR-маркирования успешно применяется для установления сортовой идентификации и может использоваться для

определения сортовой чистоты различных сельскохозяйственных культур [2], в том числе рыжика посевного, на любой стадии развития растения, даже когда морфологическое определение сорта еще невозможно.

Рыжик посевной (*Camelina sativa* L.) – это однолетнее масличное самоопыляющееся растение, при этом доля перекрестного опыления составляет от 10 до 25 % [5]. В качестве масличной сельскохозяйственной культуры рыжик посевной становится все более востребованным в России из-за его широкого спектра применения (от пищевой промышленности до производства биотоплива), способности заменить традиционные масличные культуры и легкости возделывания [6, 7].

Целью работы являлось изучение генетической однородности сортов рыжика посевного с помощью SSR-маркеров.

В качестве объекта исследований было использовано 17 сортов рыжика посевного: Адамас, Адонис, Барон, Карат, Козырь, Пензяк, Передовик (озимые сорта) и Велес, Вилла, ВНИИМК-520, Дебют, Екатеринбургский, Исилькулец, Кристалл, Омич, Ужурский, Юбиляр (яровые сорта) различного временного и географического происхождения, включенных в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации. Образцы для исследования были взяты из коллекции ФГБНУ ФНЦ ЛК.

ДНК выделяли из листьев (50-100 мг) четырехнедельных растений с использованием СТАВ-метода. Каждый исследуемый сорт был представлен индивидуальными пробами ДНК десяти растений каждого сорта.

Аmplификацию фрагментов ДНК проводили с помощью набора из 8 пар SSR-праймеров, которые были мечены флуоресцентными красителями и произведены ООО «НПФ Синтол» (Россия). Реакционная смесь ПЦР объемом 25 мкл содержала: 20 нг исследуемой ДНК, прямой и обратный праймер (оптимальные количества определялись экспериментально), 200 мкМ dNTP, 2.5 мкМ MgCl₂ и 1 единицу Taq-полимеразы.

ПЦР-продукты были денатурированы формамидом и разделены с помощью капиллярного электрофореза на генетическом анализаторе НАНОФОР 05

(ООО «НПФ Синтол»). Анализ результатов осуществляли по наличию или отсутствию в образце аллелей определенной длины в конкретном локусе. Образцы, показывавшие одинаковые данные SSR-анализа, принимались как гомогенные представители сорта.

В результате исследования была определена генетическая однородность между индивидуальными образцами изученного семенного материала сортов-образцов рыжика посевного, представленная в таблице 1.

Таблица 1

Генетическая однородность исследованных образцов рыжика посевного

№	Сорт	Год включения в реестр	Генетическая однородность, %
Озимый рыжик			
1	Пензяк	2002	50
2	Козырь	2012	60
3	Передовик	2014	60
4	Карат	2015	50
5	Барон	2016	70
6	Адамас	2017	60
7	Адонис	2020	80
Яровой рыжик			
1	ВНИИМК-520	1994	40
2	Ужурский	1996	40
3	Исилькулец	1996	40
4	Омич	2007	50
5	Юбиляр	2011	60
6	Екатерининский	2011	50
7	Дебют	2013	50
8	Вилла	2017	60
9	Велес	2018	70
10	Кристалл	2018	70

При анализе полученных данных было выявлено, что ранее созданные сорта рыжика посевного как озимого, так и ярового характеризуются в среднем более низким уровнем однородности.

Сравнение и сопоставление данных об однородности семенного материала сортов рыжика посевного выявило особенность – однородность сорта снижается со временем его создания. Снижение однородности может быть связано с наличием факультативного опыления, приводящего к переопылению, и естественного мутагенеза. Таким образом, наблюдается тенденция к снижению однородности со временем.

Проведенное исследование показало, что метод SSR-маркирования является простым в использовании и позволяет быстро и эффективно оценивать сортовую чистоту семян рыжика посевного. В дальнейшем этот метод может применяться в процессах селекции для решения проблем в области генетической устойчивости и стабильности чистоты сортов.

Список литературы

1. Katagi A., Patil R.M., Prashant P. Tools for genetic purity testing of horticultural crops-a review // HortFlora Research Spectrum. 2014. V. 3(2). PP. 108-113.
2. Molecular Techniques for Testing Genetic Purity and Seed Health / V. Santhy [et al.] // Seed Science and Technology. 2023. PP. 365-389.
3. Сидоров И.И., Клименков Ф.И., Клименкова И.Н. Сортосвая чистота посевного материала – главная задача сельскохозяйственного производства // Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: матер. XIII международ. науч. конф. (Брянск, 21-25 марта 2016 года). Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2016. Часть II. С. 55-60.
4. Идентификация и паспортизация сортов кормовых трав (клевера лугового, люцерны изменчивой, посевной и хмелевидной) на основе ДНК-маркеров / И.А. Клименко [и др.]. М.: Угреша Т, 2020. 35 с.

5. Исходный материал для селекции ярового рыжика (*Camelina sativa* (L.) Crantz) по содержанию масла и белка в семенах в различных экологогеографических условиях / Н.Г. Конькова [и др.] // Масличные культуры. 2020. № 2(182). С. 44-50.

6. Кшникаткина А.Н., Прахова Т.Я., Крылов А.П. Агроэкологическое изучение масличных культур

семейства Brassicaceae в условиях Среднего Поволжья // Нива Поволжья. 2018. № 1(46). С. 54-60.

7. Гулидова В.А. Изучение элементов технологии ярового рыжика в лесостепи Центрального Черноземья // Аграрный вестник Урала. 2021. № 2(205). С. 33-40.

EVALUATION OF VARIETAL PURITY OF *CAMELINA SATIVA* L. BASED ON MOLECULAR-MARKER ANALYSIS

Minina E.V., Loginova N.N., Veresova P.D., Bazanov T.A.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops», Komsomolsky prospect 17/56, Tver, Russian Federation, 170041

One of the important tasks of breeders and seed farms is a maintenance of the varietal purity of agricultural plants. With the development of genetic technologies, molecular genetic markers have become a valuable tool in plant breeding programs and can be used to assess the quality of seed material. This study considers the possibility of using molecular genetic markers for rapid assessment of varietal purity as one of the main parameters of seed material. In this work, 17 varieties of *Camelina sativa* L. included in the State Register of Breeding Achievements of the Russian Federation were researched. The samples were subjected to SSR analysis by PCR with labeled primers. The results revealed that the genetic homogeneity of the studied varietal material of *Camelina sativa* depended on the variety creation time. The used SSR markers showed efficiency for monitoring the varietal purity of *Camelina sativa*.

Keywords: *camelina, molecular markers, SSR-markers, PCR, varietal purity, genetic homogeneity*

One of the key elements of modern agricultural production is the maintenance of the varietal purity at all stages of selection, seed production and production of industrial crops. Molecular genetic methods for determining the varietal affiliations of oil crops, including camelina as one of the promising universal oil self-pollinating crops, are more effective than traditional ones. Among them, SSR markers are widely used due to their accuracy, reproducibility, multi-allelic nature and dominant inheritance.

The aim of the work was to study the genetic homogeneity of 17 camelina varieties using SSR markers.

The conducted study revealed the dependence of the genetic homogeneity of the studied varieties of camelina on the creation time – the varietal homogeneity decreases with the creation time of variety. This fact may be due to the presence of facultative pollination and natural mutagenesis.

The SSR-marking method is easy to use and allows for a quick and effective assessment of the varietal purity of camelina varieties. In prospect, this method can be used in breeding processes to solve problems in the field of genetic resistance and stability of varietal purity.

УДК 633.63:632

ОЦЕНКА ТРАНСКРИПЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ГЕНОВ *PR1* И *WRKY40* *BETA VULGARIS* L. ПРИ БИОТИЧЕСКОМ СТРЕССЕ

Можаровская Л.В.^{1,а}, Майсеня С.В.^{2,б}

¹ Государственное научное учреждение «Институт леса Национальной академии наук Беларуси», 246001, г. Гомель, ул. Пролетарская, д. 71, Республика Беларусь

² Республиканское унитарное предприятие «Опытная научная станция по сахарной свекле», 222603, г. Несвиж, ул. Озерная, д. 1, Республика Беларусь

e-mail: ^аmilamozh@yandex.by, ^бmajseniya@bk.ru

В рамках исследования разработаны структуры ДНК-маркеров и олигонуклеотидных праймеров для ПЦР-диагностики гена *PR1* и фактора транскрипции *WRKY40*. Проведена оценка транскрипционной активности генов *PR1* и *WRKY40* листового аппарата сахарной свеклы при поражении церкоспорозом.

Ключевые слова: : *Beta vulgaris*, биотический стресс, ДНК-маркер, *PR1*, *WRKY40*, устойчивость

Сахарная свекла (*Beta vulgaris* L.) является важнейшей продовольственной культурой. Основным лимитирующим фактором, влияющим на урожайность культуры, являются болезни инфекционной природы. В связи с этим в селекции сахарной свеклы для повышения продуктивности и качества продукции существенное значение имеет отбор устойчивых форм. В настоящее время наиболее перспективным диагностическим инструментом для проведения скрининга сортов и линий сахарной свеклы на устойчивость к болезням листового аппарата является использование молекулярно-генетического анализа на основе ДНК-маркеров, детерминирующих факторы резистентности к фитопатогенным микроорганизмам. В качестве основных факторов защиты в реакциях на биотический стресс выступают гены устойчивости (R-гены) и ассоциированные с патогенезом (PR-гены), а также факторы транскрипции, участвующие в их регуляции [1].

В настоящем исследовании на основе анализа нуклеотидных последовательностей базы данных EST GenBank NCBI для *Beta vulgaris* Sugar Beet Group и с использованием программы NCBI Primer BLAST были разработаны структуры ДНК-маркеров и олигонуклеотидных праймеров для ПЦР-диагностики *PR1* гена и фактора транскрипции *WRKY40*. Сконструированные праймеры характеризовались следующей структурой: ДНК-маркер *PR1* – F – 5'-TGCCATGCACA AAAATTACCA-3', R – 5'-GGCTGCCACTTGATCATCCC-3', ожидаемый размер продукта – 102 н.о.; *WRKY40* – F – 5'-TGCTGTTCGAAGCTGAAGCGT-3', R – 5'-GGCTGATGGTGAGCCTCTT-3', ожидаемый размер продукта – 250 н.о. На основе ОТ-ПЦР-РВ и метода измерения относительной экспрессионной активности с использованием генов-нормализаторов (*ubi*, *EF1*) проведена оценка транскрипционной активности генов *PR1* и *WRKY40* в условиях биотического стресса. Для этого проводилась ПЦР-диагностика растений сахарной свеклы, пораженных *Cercospora beticola* (возбудитель болезни листового аппарата сахарной свеклы – церкоспороза), выращенных на искусственном инфекционном фоне. Препараты кДНК

для постановки ОТ-ПЦР-РВ получали из листовых пластинок. По результатам проведенного исследования для гена *PR1*, участвующего в защитных реакциях при патогенезе, установлена повышенная экспрессия для группы растений с симптоматикой церкоспороза (наличие характерной пятнистости листовых пластинок). Напротив, относительный уровень экспрессии транскрипционного фактора *WRKY40* был повышен для группы растений варианта с отсутствием симптомов болезни. Таким образом, повышенная экспрессия транскриптов генов *PR1* предположительно может являться маркером патогенетического состояния растений. В литературе для семейства генов транскрипционных факторов *WRKY* показано участие в сложных регуляторных сетях защитных генов, приводящее к ответным реакциям растений на биотический стресс, вызванный различными типами патогенов [2-4]. Отмеченная повышенная функциональная активность гена транскрипционного фактора *WRKY40* в условиях инфицирования сахарной свеклы патогеном *C. beticola*, может свидетельствовать о потенциальной роли транскрипционного фактора *WRKY40*, в формировании устойчивых растений.

Список литературы

1. Effect plant disease resistance genes: Recent applications and future perspectives / A. Shehzadi [et al.] // J. Innov. Bio-Res. 2017. V. 1(1). PP. 86-103.
2. Physical and functional interactions between pathogen-induced Arabidopsis *WRKY18*, *WRKY40*, and *WRKY60* transcription factors / X. Xu [et al.] // The Plant Cell. 2006. V. 18(5). PP. 1310-1326.
3. A novel WRKY transcription factor is required for induction of *PR-1a* gene expression by salicylic acid and bacterial elicitors / M.C. van Verk [et al.] // Plant Physiology. 2008. V. 146(4). PP. 1983-1995.
4. Differential regulation and interaction of homologous WRKY 18 and WRKY 40 in *Arabidopsis allotetraploids* and biotic stress responses / J. K. Abeyasinghe [et al.] // The Plant Journal. 2019. V. 97(2). PP. 352-367.

ASSESSMENT OF TRANSCRIPTIONAL ACTIVITY OF *PR1* AND *WRKY40* GENES IN *BETA VULGARIS* L. UNDER BIOTIC STRESS

Mozharovskaya L.V.¹, Maisenya S.V.²

¹ State Scientific Institution «Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus», Proletarskaya st. 71, Gomel, Republic of Belarus, 246001

As part of the study, the structures of DNA markers and oligonucleotide primers for PCR diagnostics of the *PR1* gene and the *WRKY40* transcription factor were developed. The transcriptional activity of *PR1* and *WRKY40* genes of sugar beet leaf apparatus under cercospora leaf spot was assessed.

Keywords: *Beta vulgaris*, biotic stress, DNA marker, *PR1*, *WRKY40*, resistance

УДК 619:611.018:615.014.41:576. 809.33

КАРИОЛОГИЧЕСКАЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ КУЛЬТУР КЛЕТОК ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИТОКИНОВ

Нестерова И.А., Плотникова Э.М.^а

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: ^аadiya2397031@mail.ru

Показан высокий уровень кариологической стабильности перевиваемых клеточных линий, выращенных на цитокинодержательной питательной среде. Модальный класс метафазных пластинок клеток MDBK, выращенных с добавлением цитокинов, составил 46-50 хромосом. Количественных разброс хромосом в метафазных пластинках клеток ВНК-21-13/02 составил 36-70. Таким образом, клеточные линии сохраняли исходные особенности генотипа в течение 20 последовательных пассажей. В результате проведенных исследований установлено, что модальный класс хромосомных пластинок соответствует паспортным требованиям к исследуемым культурам клеток.

Ключевые слова: кариология, культура клеток, цитокины, метафазные пластинки

Введение

В ветеринарной вирусологии перевиваемые линии клеток (ПЛК) являются наиболее удобной моделью для выделения и идентификации многих вирусов. Эффективность использования ПЛК в производстве вакцинных и диагностических препаратов определяется их биологическими свойствами, основными из которых являются чувствительность к широкому спектру вирусных патогенов, возможность всестороннего контроля клеточного субстрата [1]. Рост масштабов производства диагностических и лечебно-профилактических препаратов требуют усовершенствования технологии культивирования клеток. Поэтому весьма привлекательным выглядит использование различных факторов роста и подбор оптимальной среды, которая влияет на деление клеток [2]. На сегодняшний день широкое распространение получили цитокины, которые охватывают ряд определенных полипептидов [3]. Последние представляют собой систему информации клеток как в качестве сигнальных молекул, так и в качестве факторов роста и ингибирования, и они выполняют определенную задачу. Однако поддерживаемые клеточные культуры в коллекции должны сохранять исходные особенности генотипа [4]. Использование клеток с отсутствием идентификационных характеристик ставит под сомнение объективность полученных результатов. С этой целью широко используются методы цитогенетических исследований, позволяющие

контролировать генетическое постоянство клеток по характеристике и набору хромосом [5].

С учетом актуальности проблемы, целью работы явилось изучение кариологических свойств культуры клеток MDBK, ВНК-21-13/02, выращенных на цитокинодержательной среде.

Материалы и методы

В работе по изучению генетического постоянства в качестве тест-культур клеток использовали перевиваемые клеточные линии ВНК-21-13/02 (клетки почки новорожденного сирийского хомячка) и MDBK (клетки почки эмбриона крупного рогатого скота) из коллекции ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ». В качестве потенциальных стимуляторов роста культивируемых клеток *in vitro* использовали различные концентрации препаратов цитокинов (IL-6, G-CSF (гранулоцитарно-макрофагальный колониестимулирующий фактор), Санкт-Петербург). Перевиваемые линии культур клеток культивировали по общепринятой методике [5] в стандартных условиях.

Для выращивания культуры клеток применяли питательную среду DMEM с глутамином, содержание глюкозы 4.5 г/л («ПанЭко»). В ростовую культуральную среду добавляли сыворотку крови КРС в концентрации 10 %, антибиотики (бензилпенициллина натриевой соли, стрептомицина сульфата, канамицина сульфата, амфотерицин В по 100 Ед/мл). Для снятия клеток со стекла при их пересевах

использовали раствор трипсин-версена (1:3). Клетки инкубировали в культуральных флаконах (матрасах) при 37 °С в атмосфере 5 % CO₂. Культуральные питательные среды и растворы, а также сыворотки крови животных готовили в лаборатории нашего Центра.

Контроль на стерильность исследуемой культуры клеток проводился путем посева клеточной суспензии на МПА, МПБ, среды Сабуро, Китта-Тарроци, ТПС-агар и ТПС-бульон. Для изучения общей морфологии и кариологии клеточной культуры LEK использовался микроскоп NikonType 120.

Препараты для рутинного цитогенетического исследования перевиваемых линий клеток готовили стандартным колхициновым методом с последующей окраской 2%-ным водным раствором Гимза по общепринятой методике [6].

Кариологическое исследование клеток проводили на стадии активной пролиферации культуры

клеток, накапливая клетки в стадии митоза путем инкубирования в среде с колхицином (0.05 мкг/мл среды) в течение двух часов.

Для определения модального класса и интервала изменчивости по числу хромосом в перевиваемых линиях клеток анализировали по 100 метафазных пластинок на уровне 20 пассажа.

Результаты исследований

В результате кариологического исследования клеток по определению модального класса и интервала изменчивости по числу хромосом было проанализировано 600 метафазных пластинок.

Результаты проведенного по стандартной методике кариологического анализа путем подсчета хромосом в метафазных пластиках представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Распределение хромосом в метафазных пластинках культуры клеток MDBK

Вид цитокина	% метафазных пластинок определенного класса							
	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75
IL-6	9	18	36	15	11	6	3	2
G-CSF	5	13	32	27	12	5	3	3
СККРС	10	23	34	19	6	1	4	3

Из данных таблицы видно, что число хромосом в клетках, выращенных в цитокинсодержащей среде, колеблется от 36-75. Полученные данные показывают, что модальный класс метафазных пластинок клеток MDBK, выращенных в присутствии сыворотки крови крупного рогатого скота, составил 46-50 хромосом, а содержание метафазных пластинок с этим модальным классом – 34 %. Модальный класс метафазных пластинок клеток MDBK, выращенных на

цитокинсодержащей среде, составил 46-50 хромосом, а содержание метафазных пластинок с этим модальным классом – 36 % (IL-6) и 32 % (G-CSF).

В следующей серии опытов изучали изменения на хромосомном уровне культуры клеток ВНК-21-13/02, выращенных на среде DMEM с добавлением цитокинов (IL-6, G-CSF). Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2

Распределение хромосом в метафазных пластинках культуры клеток ВНК-21-13/02

Вид цитокина	% метафазных пластинок определенного класса							
	36-40	41-45	46-50	51-55	56-60	61-65	66-70	71-75
IL-6	25	39	16	7	5	4	4	1
G-CSF	27	41	19	6	4	2	1	1
СККРС	23	40	15	8	6	5	3	1

Из данных таблицы видно, что количественный разброс хромосом в метафазных пластинках клеток ВНК-21-13/02, выращенных на цитокин-содержащей среде, колеблется от 36-70. По полученным данным видно, что модальный класс метафазных пластинок клеток ВНК-21-13/02, выращенных в присутствии сыворотки крови крупного рогатого скота, составил 41-45 хромосом при количестве метафазных пластинок с этим модальным классом – 40 %. Модальный класс метафазных пластинок клеток MDBK, выращенных на цитокинсодержащей среде, составил также 41-45 хромосом, а содержание метафазных пластинок с этим модальным классом – 39 % (IL-6) и 41 % (G-CSF).

В результате проведенных исследований установлено, что модальный класс хромосомных пластинок соответствует паспортным требованиям к исследуемым культурам клеток.

Таким образом, следует отметить высокий уровень кариологической стабильности перевиваемой культуры клеток MDBK, ВНК-21-13/02 в процессе длительного культивирования после воздействия цитокинов.

В течение 20 последовательных пассажей культура сохранила свои основные цитоморфологические характеристики и ростовые свойства. Монослой состоял из эпителиоподобных, плотно прилегающих

друг к другу клеток, пролонгированной формы без зернистости цитоплазмы. Клетки при пересеве с коэффициентом 1 : 2 - 1 : 3 формировали конфлюэнтный монослой на 3-4 сутки культивирования. В настоящее время опыты продолжаются.

В результате проведенных исследований на вышеречисленных бактериальных средах было установлено, что культуры клеток MDBK, ВНК-21-13/02 оказались стерильными.

Таким образом, цитокинстимулированные перевиваемые линии клеток почек крупного рогатого скота сохранили исходные для популяции морфологические признаки, свойства и особенности генотипа, указывающие на их чистоту.

Заключение

Ростовые, цитоморфологические свойства и кариологическая характеристика клеток линии: MDBK, ВНК-21-13/02 на протяжении не менее 20 непрерывных циклов стационарного культивирования при отработанных технологических режимах являются стабильными.

Перевиваемые линии клеток MDBK, ВНК-21-13/02 соответствуют предъявляемым к ним требованиям и могут быть использованы в исследовательской и диагностической работе для наращивания вирусной массы с целью получения вакцинных

препаратов для профилактики вирусных заболеваний животных.

Список литературы

1. Совершенствование и стандартизация технологических процессов, методов контроля и управления качеством противовирусных вакцин / В.И. Еремец, А.Я. Самуйленко, Н.К. Еремец [и др.] // Ветеринарный врач. 2011. № 3. С.4-7.

2. Вопросы стандартизации клеток-продуцентов для биотехнологии / А.П. Орлов [и др.] // Биотехнология. 2017. Т. 33/ № 3. С. 81-87.

3. Роговский В.С., Матюшин А.И., Шимановский Н.Л. Влияние уролитина А на профиль продукции цитокинов различными опухолевыми клеточными линиями // Химиико-фармацевтический журнал. 2023. Т.57. № 4. С.17-21.

4. Establishment, characterization and cryopreservation of Fars native goat fetal fibroblast cell lines / D. Mehrabani [et al.] // Asian Pacific Journal of Reproduction. 2016. V. 5. № 3. PP. 247-251.

5. Дьяконов Л.П., Ситьков В.И. Животная клетка в культуре. М.: «Компания Спутник+», 2009. 656 с.

6. Moorhead P.S. The serial cultivation of human diploid cell strains // Exp. Cell Res. 1960. PP. 585-621.

KARYOLOGICAL AND MORPHOLOGICAL STABILITY OF CELL CULTURES UNDER THE INFLUENCE OF CYTOKINES

Nesterova I.A., Plotnikova E.M.

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

Cell cultures in collections must preserve their original properties and genotypical characteristics, indicating their purity. The purpose of this study was to study the karyological properties of cell culture after exposure to cytokines. The growth, cytomorphological properties, and karyological characteristics of the transplanted lines were stable for at least 20 continuous cycles of stationary cultivation. The cell lines can be used to increase the viral mass in order to obtain vaccines for the prevention of viral diseases in animals.

Keywords: *karyology, cell culture, cytokines, metaphase plates*

УДК 579.64: 632.3.01/.08: 632.913.1

РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ БАКТЕРИЙ СЕМЕЙСТВА MICROBACTERIACEAE НА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ В КОЧУБЕЕВСКОМ РАЙОНЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Оболенский Р.Р.^{1,2,а}, Словарева О.Ю.^{1,3,б}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский центр карантина растений», 140150, Московская обл., г.о. Раменский, р.п. Быково, ул. Пограничная, д. 32, 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 автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация

e-mail: ^a 7812romalist@mail.ru, ^b slovareva.olga@gmail.com

В данном исследовании проведена идентификация бактериального сообщества посевов ячменя озимого и пшеницы озимой Кочубеевского района Ставропольского края. Идентификацию бактерий проводили посредством секвенирования ампликонов, полученных в результате ПЦР с парой праймеров 27f/907r. В результате исследованы 12 образцов зерновых культур, выделено и идентифицировано 8 бактериальных изолятов, из которых 34 принадлежали семейству Microbacteriaceae. Среди них присутствовали такие виды, как *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Clavibacter michiganensis*, *Microbacterium hydrocarbonoxydans* и *Rathayibacter festucae*. Частота встречаемости бактерий семейства Microbacteriaceae на исследованных образцах составила 66.7 %.

Ключевые слова: бактериозы зерновых культур, микробиом пшеницы, *Triticum L.*, ПЦР, секвенирование, фитосанитария, карантин растений, идентификация фитопатогенов

Введение

Семейство Microbacteriaceae включает в себя обширный перечень бактерий, выделяемых из различных источников, в том числе из злаков. Среди них встречаются фитопатогенные виды, такие как *Rathayibacter tritici*, *Rathayibacter rathayi*, *Clavibacter tessellarius* и *Curtobacterium flaccumfaciens*.

Возбудитель желтого слизистого бактериоза пшеницы *Rathayibacter tritici* (Carlson & Vidaver) вызывает болезни таких ценных зерновых культур, как пшеница и ячмень. При полном поражении колосьев пшеницы желтым слизистым бактериозом семена не образуются. При частичном поражении может наблюдаться потеря зерна до 70 % [1]. Патоген входит в Единый перечень карантинных объектов Евразийского экономического союза, а также является карантинным объектом для Туниса, Соединенных Штатов Америки, Узбекистана, Грузии и Молдовы [2].

Еще один представитель рода *Rathayibacter*, *Rathayibacter rathayi* (Smith) поражает пшеницу, рожь и ежу сборную (*Dactylis glomerata* L.). Симптомы поражения *R. rathayi* включают образование галлов или гуммоза в метелках ежи сборной [3]. Бактерия регулируется фитосанитарными требованиями импортеров российского зерна – Китая, Камеруна, Мали, Колумбии, а также Венесуэлы [2].

Патогенная бактерия *Clavibacter tessellarius* (Carlson & Vidaver) способна вызывать заболевания пшеницы [4], в связи с чем регулируется фитосанитарными требованиями Мексики [2]. Тяжесть вызываемого бактериоза не установлена, как и ареал возбудителя на территории РФ.

Вид *Curtobacterium flaccumfaciens*, а именно его патовар *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens* (Hedges) Collins & Jones, часто выделяется из злаков [5], но степень его вредности для злаковых культур нуждается в изучении.

Кроме перечисленных видов, из зерновых культур выделяют и других представителей семейства Microbacteriaceae, патогенные свойства которых либо не изучались (например, бактерии рода *Agreia*),

или существуют сомнения касательно их патогенности в отношении злаков (например, *Clavibacter michiganensis*).

Ставропольский край занимает третье место по производству зерна в РФ среди других субъектов [6], поэтому изучение фитопатогенных бактерий на посевах зерновых культур в указанном регионе имеет важное значение для контроля бактериозов.

Цель исследования заключалась в оценке распространенности бактерий семейства Microbacteriaceae на примере зерновых культур в Кочубеевском районе Ставропольского края.

Материалы и методы

Материалами исследований являлись 10 образцов растений пшеницы и 2 образца растений ячменя, собранных в Кочубеевском районе Ставропольского края.

Из каждого образца готовили аналитическую пробу, измельчая 5-10 г растительных тканей и гомогенизируя их в 20 мл фосфатно-солевого буфера (на 1 л дистиллированной воды 2.9 г Na₂HPO₄·12H₂O, 0,2 г KH₂PO₄·2H₂O, 8 г NaCl и 0.2 г KCl; pH 7.0-7.2). По 20 мкл гомогената высевали методом Дригальского на среду R2A (Sigma Aldrich) для изоляции бактерий. Чистые бактериальные культуры получали на той же среде, проводя пересев отдельных колоний с различной морфологией. Изоляты идентифицировали путем секвенирования участка 16-23S рНК с праймерами 27f/907r (27f: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG -3', 907r: 5'-CCGTCGAATTCCTTTGAGTTT -3'). Размер продукта амплификации 880 п.о.

Результаты секвенирования обрабатывали с помощью программы BioEdit (<https://bioedit.software.informer.com/>). Расшифрованные нуклеотидные последовательности сравнивали с помощью сервиса BLAST с последовательностями, размещенными в GenBank (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov>). Результатом идентификации считали организм с максимальным сходством (Max score), автоматически вычисленным

сервисом BLAST на основании расчета показателей Query coverage и Percent identity. Если в таксоне находили несколько таких организмов, результатом идентификации считали старший таксон.

Для представителей семейства Microbacteriaceae рассчитывали частоту встречаемости (A) по формуле: $A = B/C \times 100 \%$, где B – число образцов, на которых

обнаружена бактерия, C – общее число проанализированных образцов.

Результаты

Характеристики исследуемых растительных образцов и идентифицированных в них бактерий представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты идентификации бактериальных изолятов методом секвенирования по Сэнгеру и выравнивания нуклеотидных последовательностей (сервис BLAST, <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov>; Кочубеевский район, Ставропольский край, 2022 г.)

№ п/п	Культура, сорт	Образец	Идентифицированные бактерии	
1.	Пшеница озимая, с. Гром	22C14	<i>Paeniglutamicibacter</i> sp. (1 шт.)	
2.	Пшеница озимая, с. Совербаш	22C2	<i>Clavibacter</i> sp. (2 шт.), <i>Paeniglutamicibacter</i> sp. (2 шт.), <i>Pantoea</i> sp. (1 шт.), <i>Pseudomonas</i> sp. (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (3 шт.)	
3.	Пшеница озимая, с. Таня	22C11	<i>Clavibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Frigoribacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Microbacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Plantibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Sphingobacterium</i> sp. (1 шт.)	
4.		22C13	<i>Bacillus</i> sp. (1 шт.), <i>Microbacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Plantibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (1 шт.), <i>Staphylococcus</i> sp. (1 шт.)	
5.		22C4	<i>Sphingobacterium</i> sp. (1 шт.)	
6.		22C6	<i>Agrococcus</i> sp. (1 шт.), <i>Clavibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Glutamicibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Microbacterium</i> sp. (2 шт.), <i>Pseudarthrobacter</i> sp. (2 шт.)	
7.		22C8	<i>Paeniglutamicibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Pseudomonas</i> sp. (1 шт.), <i>Rahnella</i> sp. (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (1 шт.)	
8.		22C9	<i>Frigoribacterium</i> sp. (2 шт.), <i>Microbacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Okibacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (4 шт.)	
9.		Пшеница озимая, с. Юбилейная	22C17	<i>Microbacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Sphingobacterium</i> sp. (1 шт.)
10.			22C18	<i>Arthrobacter</i> sp. (1 шт.), <i>Bacillus</i> sp. (1 шт.), <i>Knoellia</i> sp. (1 шт.), <i>Mycobacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Paenarthrobacter</i> sp. (=Arthrobacter sp.) (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (2 шт.)
11.	Ячмень озимый, с. Базальт	22C16	<i>Pseudoclavibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Rhizobium</i> sp. (1 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (2 шт.)	
12.	Ячмень озимый, с. Рубеж	22C1	<i>Achromobacter</i> sp. (2 шт.), <i>Arthrobacter</i> sp. (1 шт.), <i>Clavibacter</i> sp. (2 шт.), <i>Curtobacterium</i> sp. (1 шт.), <i>Frigoribacterium</i> sp. (5 шт.), <i>Luteimonas</i> sp. (1 шт.), <i>Microbacterium</i> sp. (3 шт.), <i>Paenarthrobacter</i> sp. (2 шт.), <i>Pedobacter</i> sp. (1 шт.), <i>Plantibacter</i> sp. (1 шт.), <i>Pseudarthrobacter</i> sp. (1 шт.), <i>Pseudomonas</i> sp. (6 шт.), <i>Rathayibacter</i> sp. (4 шт.), <i>Rhodococcus</i> sp. (5 шт.), <i>Sphingomonas</i> sp. (1 шт.)	

Всего из собранных образцов было выделено 89 бактериальных изолятов. Из них 34 принадлежали семейству Microbacteriaceae, а именно, к родам *Frigoribacterium* sp., *Agrococcus* sp., *Clavibacter* sp., *Curtobacterium* sp., *Microbacterium* sp., *Okibacterium* sp., *Plantibacter* sp., *Pseudoclavibacter* sp. и *Rathayibacter* sp.

В образцах пшеницы озимой с. Совербаш и с. Таня обнаружены изоляты, для нуклеотидных последовательностей которых максимальное совпадение в базе NCBI составило 100 % с видом *Clavibacter michiganensis*. Известно, что указанный вид встречается на злаках [4]. Для определения роли этой бактерии относительно растения необходимо проведение исследований на патогенность.

В образце ячменя озимого с. Рубеж идентифицированы с максимальным сходством такие виды, как *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Microbacterium hydrocarbonoxydans* и *Rathayibacter festucae*. Бактерия *Curtobacterium flaccumfaciens*, часто выделяется из злаков [5], но степень ее вредности для злаковых культур нуждается в изучении. Информация о патогенных свойствах по отношению к злаковым культурам у бактерии *Microbacterium hydrocarbonoxydans* отсутствует. Бактерия *Rathayibacter festucae* способна присутствовать в посевах пшеницы, но патогенные свойства по отношению к этой культуре у нее отсутствуют [3]. В исследовании взяты только 12 образцов, но

разнообразии представителей семейства Microbacteriaceae может быть гораздо больше.

Выводы

В результате проведенного исследования из 10 образцов пшеницы озимой и 2 образцов ячменя озимого из Кочубеевского района Ставропольского края выделено 89 бактериальных изолятов, принадлежащих 28 родам. Среди выделенных изолятов 9 родов принадлежало семейству Microbacteriaceae. Частота встречаемости у данного семейства составила 66.7 %.

В растении одновременно могут присутствовать несколько родов, принадлежащих семейству Microbacteriaceae. В нашем исследовании на ячмене озимом с. Рубеж представителями семейства Microbacteriaceae были рода *Clavibacter* sp., *Curtobacterium* sp., *Frigoribacterium* sp., *Microbacterium* sp., *Plantibacter* sp. и *Rathayibacter* sp.

Таким образом, в своем исследовании мы изучили микробиоту локальных посевов пшеницы и ячменя (Кочубеевский район, Ставропольский край, 2022 год) и выделили полевые изоляты, которые могут быть использованы в дальнейшем изучении их свойств в отношении зерновых культур.

Список литературы

1. Quantitative and qualitative losses in wheat grains due to 'earcockle' and 'tundu' / I.J. Paruthi [et al.] // Seed Research. 1987. V. 15. № 1. PP. 83-86.

2. Словарева О.Ю. Выявление и идентификация возбудителей бактериальных болезней пшеницы и ячменя в России // Microbiology Independent Research journal. 2020. V. 7. № 1. PP. 1-12.

3. Rathayibacter toxicus, other Rathayibacter species inducing bacterial head blight of grasses, and the potential for livestock poisonings / T.D. Murray [et al.] // Phytopathology. 2017. V. 107. № 7. PP. 804-815.

4. Re-classification of *Clavibacter michiganensis* subspecies on the basis of whole-genome and multi-locus sequence analyses / X. Li, J. Tambong, K.X. Yuan [et al.] // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2018. V. 68(1). PP. 234-240.

5. Alternative hosts of *Curtobacterium flaccumfaciens* pv. *flaccumfaciens*, causal agent of bean bacterial wilt / R.M. Gonçalves [et al.] // European Journal of Plant Pathology. 2017. V. 148. PP. 357-365.

6. Словарева О.Ю. Анализ производства и экспорта российского зерна и составление перечня регулируемых фитосанитарными требованиями стран-импортеров возбудителей бактериозов зерновых культур // Аграрный вестник Северного Кавказа. 2023. № 3 (51). PP. 47-54.

THE PREVALENCE OF BACTERIA OF THE MICROBACTERIACEAE FAMILY ON GRAIN CROPS IN THE KOCHUBEYEVSKY DISTRICT OF THE STAVROPOL TERRITORY

Obolensky R.R.^{1,2}, Slovareva O.Yu.^{1,4}

¹All-Russian Plant Quarantine Centre, Pogranichnaya st. 32, Ramenskii, Bykovo, Moscow region, Russian Federation, 140150

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

³Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Miklukho-Maklaya str. 6, Moscow, Russian Federation, 117198

In this study, the bacterial community of winter barley and winter wheat crops in the Kochubeevsky district of the Stavropol Territory was identified. Bacteria were identified by sequencing amplicons obtained by PCR with the primer pair 27f/907r. As a result, 12 samples of grain crops were examined, 89 bacterial isolates were isolated and identified, of which 34 belonged to the Microbacteriaceae family. Among them were such species as *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Clavibacter michiganensis*, *Microbacterium hydrocarbonoxydans* and *Rathayibacter festucae*. The frequency of occurrence of bacteria of the Microbacteriaceae family in the studied samples was 66.7 %.

Keywords: bacterioses of grain crops, wheat microbiome, *Triticum* L., PCR, sequencing, phytosanitary, plant quarantine, identification of phytopathogens

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА ВИРУС-ОПОСРЕДОВАННОЙ АКТИВАЦИИ МОБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ *ARABIDOPSIS THALIANA* L.

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

¹ 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

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 «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42, Российская Федерация
e-mail: info@rgau-msha.ru, info@mipt.ru, biotech@iab.ac.ru

Мобильные элементы (МЭ) привносят огромный вклад в генетическое разнообразие диких растений и современных сельскохозяйственных культур. Транспозиция мобильных элементов может образовывать новые комбинации генов и последовательностей ДНК, а также приводить к регуляции генов, их активности и экспрессии, что в конечном итоге создает фенотипическую и генетическую вариабельность растений. Несмотря на их неопровержимый вклад в эволюцию и разнообразие растений, инструментов, позволяющих активировать и изучать МЭ, практически нет. Поэтому разработка новых подходов для активации мобильных элементов является актуальным вопросом. В нашей работе мы представляем новый метод для активации мобильных элементов с использованием комплексного воздействия на механизмы сдерживания транспозонов.

Ключевые слова: мобильные элементы, вирусы, сайленсинг, метилирование

Мобильные элементы играют важную роль в эволюции растений и могут являться мощным эндогенным источником изменчивости в селекции сельскохозяйственных культур за счет своей транспозиционной активности [1]. Однако большинство вставок МЭ являются вредными или нейтральными, поэтому, чтобы сдерживать их, растения имеют различные механизмы. Один из таковых это РНК-зависимое ДНК метилирование (RdDM) [2]. В RdDM задействованы такие белки, как ДНК-зависимые РНК-полимеразы (*Pol IV*, *Pol V*, *Pol II*), РНК-зависимые РНК-полимеразы (*RDR2*, *RDR6*), дайсер-подобный белок (*DCL3*), метилтрансферазный белок (*DRM2*) и др. [3]. Зная механизмы контроля мобильных элементов и гены, участвующие в этих процессах, можно, воздействуя на эти гены, активировать МЭ.

В качестве инструмента для временного снижения целевого гена был использован вирус индуцированный сайленсинг генов (VIGS), который давно используется в функциональной геномике для изучения функций генов. VIGS представляет собой метод, использующий синтетические вирусные конструкции для снижения экспрессии генов на посттранскрипционном уровне [4].

С помощью разработанного нами подхода, основанного на комплексном воздействии на гены-регуляторы МЭ с помощью VIGS и теплового стресса, была продемонстрирована активация мобильных элементов на примере термоиндуцибельного ретротранспозона *ONSEN* [5].

Помимо этого, было проанализировано следующее поколение растений на наличие новых копий ретротранспозона *ONSEN*. Нами были найдены новые инсерции в 4 потомках из 15, в которых была снижена экспрессия гена *NRPD (Pol IV)*. С помощью полногеномного нанопорового секвенирования одного из потомков были установлены локусы новых инсерций, которые располагались внутри генов (в экзонной области генов)

Таким образом, нами был разработан метод активации мобильных элементов *Arabidopsis thaliana* L., основанный на комплексном воздействии вирус-опосредованного сайленсина генов, регулирующих активность МЭ, и абиотического стресса.

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. V. 49. PP. 15-24.
2. 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. V. 66. PP. 243-267.
3. Cuerda-Gil D., Slotkin R.K. Non-canonical RNA-directed DNA methylation // Nature plants. 2016. V. 2. № 11. PP. 1-8.

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

5. Evolution of the ONSEN retrotransposon family activated upon heat stress in Brassicaceae / H. Ito [et al.] // Gene. 2013. V. 518. № 2. PP. 256-261.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR VIRUS-INDUCED ACTIVATION OF TRANSPOSABLE ELEMENTS *ARABIDOPSIS THALIANA* L.

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

¹Russian State Agrarian University – MTAA, Timiryazevskaya st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

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

³All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya st. 42, Moscow, Russian Federation, 127550

Transposable elements (TEs) contribute greatly to the genetic diversity of wild plants and modern crops. Transposition of transposable elements can form new combinations of genes and DNA sequences, and lead to regulation of genes, their activity and expression, which ultimately creates phenotypic and genetic variability in plants. Despite their undeniable contribution to plant evolution and diversity, there are virtually no tools to activate and study TEs. Therefore, the development of new approaches to activate transposable elements is a pressing issue. In our work, we present a new method for activating transposable elements using complex effects on transposon control mechanisms.

Keywords: *transposable elements, viruses, silencing, methylation*

Transposable elements play an important role in plant evolution and can be a powerful endogenous source of variability in crop breeding due to their transposition activity. However, most of TE's insertions are negative or neutral, so plants have various mechanisms to restrain them. One of these is RNA-dependent DNA methylation (RdDM). RdDM involves proteins such as *Pol IV*, *Pol V*, *Pol II*, *RDR2*, *RDR6*, *DCL3*, *DRM2*, etc. Knowing the mechanisms of control of transposable elements and the genes involved in these processes, it is possible to activate TE's by influencing these genes.

Virus-induced gene silencing (VIGS), which has long been used in functional genomics to study gene functions, was used as a tool to temporarily downregulate the target gene.

Using the approach we developed, based on the complex effect on genes regulating TE's using VIGS and

heat stress, we demonstrated the activation of transposable elements using the example of the heat-inducible retrotransposon *ONSEN*.

In addition, the next generation of plants was analyzed for the presence of new copies of the *ONSEN* retrotransposon. We found new insertions in 4 of the 15 offspring, in which the expression of the *NRPD* gene (*Pol IV*) was reduced. Using whole-genome nanopore sequencing of one of the offspring, the loci of new insertions were established, which were located inside the genes (in the exon region of the genes).

As a result, we have developed a method for activating transposable elements of *Arabidopsis thaliana* L. based on the complex effect of virus-induced silencing of genes regulating TE activity and abiotic stress.

УДК 575:632.4:635.65

АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ У ПРОРОСТКОВ *LUPINUS ALBUS* L. ПОСЛЕ ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН ПАТОГЕНОМ *COLLETOTRICHUM LUPINI*

Подлущий М.С.^{1,а}, Шубина С.И.¹, Самад С.², Байк А.², Бондаренко В.С.¹, Болдырев С.В.², Лукашевич М.И.³, Бен С.², Бондаренко Е.В.¹

¹Федеральное 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, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30 стр. 1, Российская Федерация

³ Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, 241524, Брянская обл., Брянский р-он, п. Мичуринский, ул. Березовая, д. 2, Российская Федерация
e-mail: ^a mikhail@podlutskii.ru

Lupinus albus L. – один из ключевых сельскохозяйственных видов рода *Lupinus*, получивший признание благодаря высокому содержанию белка, масла, аминокислот и клетчатки, что делает его ценной альтернативой сое. Однако его выращивание осложняется антракнозом – заболеванием, вызываемым грибом *Colletotrichum lupini*, которое приводит к значительным потерям урожая. В рамках данной работы был выполнен комплексный транскриптомный анализ, результаты которого способны помочь в исследованиях возможных молекулярных путей и механизмов ответа белого люпина на патогенное воздействие.

Ключевые слова: белый люпин, антракноз, *Colletotrichum lupini*, секвенирование РНК, транскриптомный анализ, дифференциальная экспрессия генов

Белый люпин (*Lupinus albus* L.) – бобовое растение, широко используемое в сельском хозяйстве благодаря своей способности улучшать плодородие почвы [1] и обеспечивать высокий уровень белка с уникальным аминокислотным профилем в рационах человека и животных [2]. Особенно популярным белый люпин стал после выведения низкоалкалоидных сортов в середине XX века [3]. Низкоалкалоидность, однако, способствовала распространению антракноза – опасное грибковое заболевание, вызываемое несовершенным грибом *Colletotrichum lupini*. Этот патоген был впервые описан в 1912 году и до сих пор представляет глобальную продовольственную угрозу [4], приводя к значительным потерям урожая и ухудшению качества получаемых семян.

Несмотря на обширные научные исследования, посвященные изучению *Colletotrichum lupini*, его морфологического и генетического разнообразия, а также вирулентности и механизмов взаимодействия с растениями, ключевой задачей по-прежнему остается изучение возможных молекулярных путей и механизмов ответа белого люпина на эту инфекцию, способных стать основой для разработки более устойчивых сортов и повышения эффективности его культивирования. Целью данной работы является изучение изменений в дифференциальной экспрессии генов трех сортов белого люпина при инфицировании агрессивными штаммами *Colletotrichum lupini*.

Материалы и методы

Штаммы *Colletotrichum lupini* были изолированы из стручков белого люпина, собранных с экспериментальных полей ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса» в 2021 году. На основе полученных морфологических и молекулярных характеристик были отобраны два агрессивных штамма (3.1 и 139.1) для последующего заражения семян трех сортов белого люпина: Андромеда (австралийский сорт, устойчивый к антракнозу), Мичуринский (российский сорт с устойчивостью к засухе и фузариозу) и СН 5-19

(селекционная линия с умеренной устойчивостью к антракнозу).

Семена всех сортов были простерилизованы хлорным газом в течение 48 часов, затем инокулированы раствором, содержащим 10^5 спор в 2.5 мл стерильной деионизованной воды (ddH₂O) с добавлением 0.1 % Tween20, на протяжении 1 часа. После этого семена помещались в стерильные контейнеры с увлажненной (5 мл ddH₂O) фильтровальной бумагой и инкубировались в темноте при температуре 24 ± 2 °C и относительной влажности 55 % в течение 7 дней. Для поддержания постоянной влажности через 3 дня после инокуляции дополнительно добавлялось 3 мл деионизованной воды.

Выделение тотальной РНК из 7-дневных проростков белого люпина проводилось с использованием набора реагентов Extract RNA (ЗАО «Евроген», Россия) с добавлением поливинилпирролидона по протоколу производителя. Первичный анализ качества РНК выполнялся на спектрофотометре NanoDrop OneC (Thermo Fisher Scientific, США). Полученные образцы РНК передавались в компанию ЗАО «Евроген» для синтеза кДНК, подготовки библиотек и последующего секвенирования на платформе Illumina NovaSeq 6000 (Illumina, США). В результате секвенирования было получено 4.487.692.202 прочтения.

Качество данных секвенирования оценивалось с использованием программ FastQC v.0.11.9 и ngsReports v.2.4.0 для RStudio Server v2023.12.1+402. Низкокачественные прочтения и адаптерные последовательности триммировались с использованием Fastp v.0.23.4 и Trimmomatic v.0.40. Для сопоставления и картирования прочтений на референсный геном White Lupin Genome v1.0 от Peret Lab использовался алгоритм STAR v.2.7.10b.

Количественная оценка дифференциальной экспрессии генов проводилась с использованием алгоритма FeatureCounts v.2.0.2. Анализ дифференциальной экспрессии генов осуществлялся с использованием программного пакета DESeq2 v1.42.0 для RStudio Server v2023.12.1+402. Значимыми

считались гены с $\log_2FC \geq 1$ для повышенной экспрессии и $\log_2FC \leq -1$ для пониженной, при уровне статистической значимости $p \leq 0,05$ (с использованием корректирующего метода ожидаемой доли ложных отклонений по методу Бенджамини-Хохберга).

Основные результаты

Все полученные профили дифференциальной экспрессии генов для проростков трех изучаемых сортов люпина белого (Андромеда, Мичуринский и СН 5-19) в ответ на инфицирование их семян грибом *Colletotrichum lupini* (штаммы 3.1 и 139.1) представлены на рисунках 1-3.

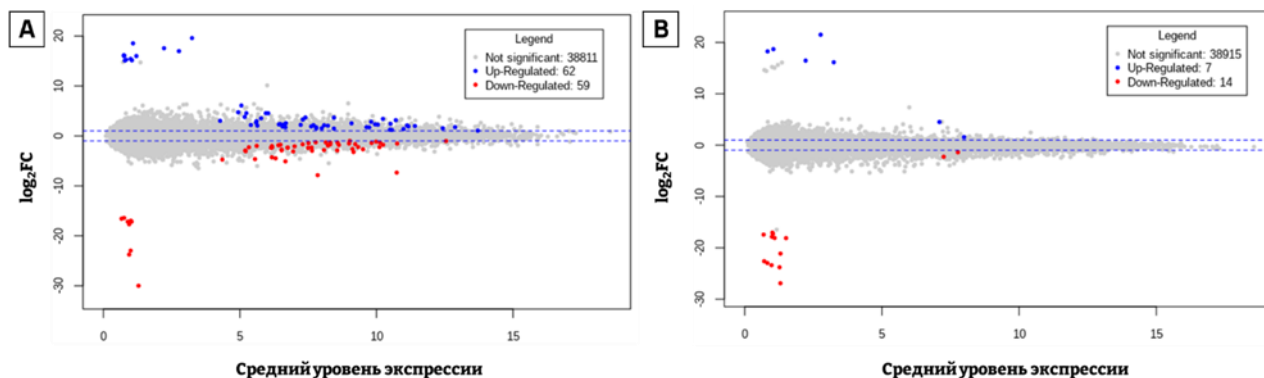


Рисунок 1. Профили дифференциальной экспрессии генов в 7-дневных проростках белого люпина сорта Андромеда после инокуляции семян двумя агрессивными штаммами *Colletotrichum lupini*: (А) 3.1 и (В) 139.1, по сравнению с контрольными неинфицированными растениями

В проростках белого люпина, зараженных штаммом 3.1 (рис. 1А), выявлено 121 дифференциально экспрессируемых генов (ДЭГ): 62 с повышенной и 59 с пониженной экспрессией. Наибольшее увеличение экспрессии отмечено у генов *Lalb_Ch09g0330991* (белок PLAC8) и *Lalb_Ch01g0005681* (транспозаза), а наибольшее снижение – у *Lalb_Ch02g0160151* (неохарактеризованный белок) и *Lalb_Ch02g0160151* (предполагаемая АТФ-аза).

В проростках, зараженных штаммом 139.1 (рис. 1В), было выявлено всего 21 дифференциально экспрессируемых генов. Среди них 7 генов показали повышенную экспрессию, включая *Lalb_Ch023g0276291* (неохарактеризованный белок) и *Lalb_Ch020g0112271* (белок НАД-подобного домена). Наибольшее снижение экспрессии наблюдалось у *Lalb_Ch013g0298271* (белок с START-подобным доменом) и *Lalb_Ch015g0087341* (неохарактеризованный белок).

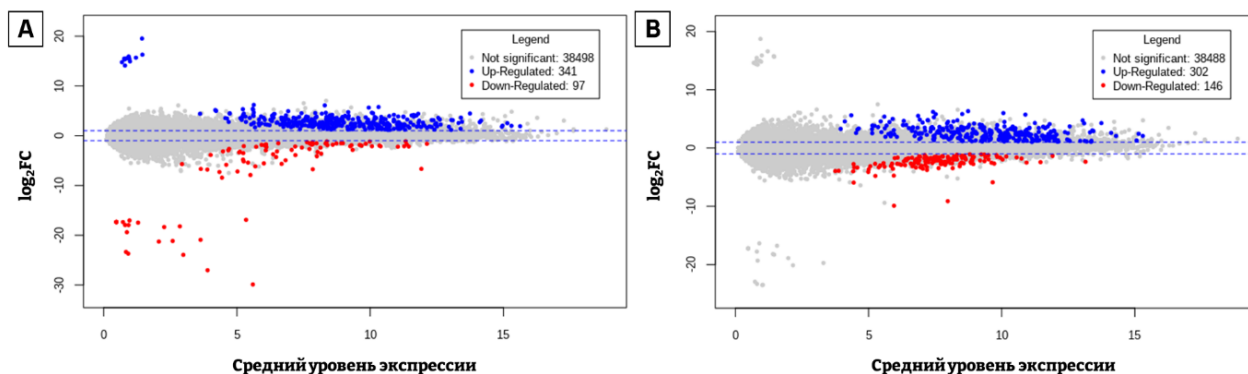


Рисунок 2. Профили дифференциальной экспрессии генов в 7-дневных проростках белого люпина сорта Мичуринский после инокуляции семян двумя агрессивными штаммами *Colletotrichum lupini*: (А) 3.1 и (В) 139.1, по сравнению с контрольными неинфицированными растениями

Для проростков белого люпина сорта Мичуринский, зараженных штаммом 3.1 (рис. 2А), было выявлено 438 дифференциально экспрессируемых генов: 341 из них продемонстрировал повышение экспрессии, а 97 – снижение. Наибольшее увеличение экспрессии наблюдалось у *Lalb_Ch01g0009531* (неохарактеризованный белок) и *Lalb_Ch010g0099801*

(предполагаемый транскрипционный фактор семейства C2H2). Наибольшее снижение экспрессии фиксировалось у *Lalb_Ch01g0016841* (глюкуронозилтрансфераза) и *Lalb_Ch022g0354171* (3-гидроксиизобутирил-КоА-гидролаза).

Для проростков, зараженных штаммом 139.1 (рис. 2В), было обнаружено 448 дифференциально

экспрессируемых генов: из них 302 гена показали повышенную экспрессию, а 146 – пониженную. Наибольшее увеличение экспрессии наблюдалось у *Lalb_Chr04g0262731* (неохарактеризованный белок) и *Lalb_Chr04g0250311* (предполагаемый белок,

индуцированный гипоксией). Наибольшее снижение экспрессии фиксировалось у *Lalb_Chr24g0395291* (жировая ацил-КоА редуктаза) и *Lalb_Chr23g0276261* (секреторный белок).

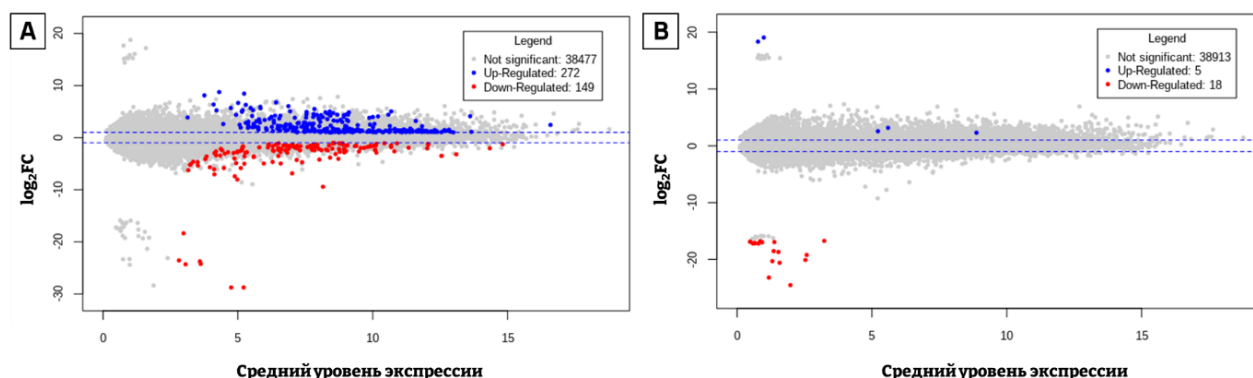


Рисунок 3. Профили дифференциальной экспрессии генов в 7-дневных проростках белого люпина сорта СН 5-19 после инокуляции семян двумя агрессивными штаммами *Colletotrichum lupini*: (А) 3.1 и (В) 139.1, по сравнению с контрольными неинфицированными растениями

Для проростков белого люпина линии СН 5-19, зараженных штаммом 3.1 (рис. 3А), было выявлено 411 дифференциально экспрессируемых генов: 272 гена показали повышение экспрессии, а 139 – снижение экспрессии. Наибольшее увеличение экспрессии наблюдалось у *Lalb_Chr19g0129151* (предполагаемая РНК-направленная ДНК-полимераза) и *Lalb_Chr19g0129541* (неохарактеризованный белок). Наибольшее снижение экспрессии зафиксировано у *Lalb_Chr01g0016841* (глюкуронозилтрансфераза) и *Lalb_Chr10g0096441* (неспецифическая серин/треониновая протеинкиназа).

Анализируя проростки, полученные из семян СН 5-19, зараженных штаммом 139.1 (рис. 3В), было обнаружено только 23 дифференциально экспрессируемых гена: из них 5 генов показали значимое повышение экспрессии, а 18 – снижение. Наибольшее увеличение экспрессии отмечено у *Lalb_Chr18g0059291* (предполагаемый фактор транскрипции гомеобокс-семейства WOX) и *Lalb_Chr04g0250241* (неохарактеризованный белок). Наибольшее снижение экспрессии наблюдалось у *Lalb_Chr11g0074001* (предполагаемая малая ауксин-усиленная РНК) и *Lalb_Chr21g0310251* (пектинэстераза).

Известно, что устойчивость растений к антракнозу значительно различается между видами люпина и между сортами внутри вида [5]. Более того, уровень устойчивости также зависит и от штамма гриба, т.е. штаммы *Colletotrichum lupini*, собранные в одно и то же время с одного и того же поля, могут проявлять разную агрессивность по отношению к одному и тому же сорту [6].

Согласно полученным ранее данным о гибели четырех сортов белого люпина после первичного заражения различными штаммами *Colletotrichum lupini*, штамм 139.1 был оценен как более агрессивный, чем

штамм 3.1 [6]. В нашем исследовании умеренно устойчивые генотипы Андромеда и СН 5-19 показали наиболее яркий транскриптомный ответ на воздействие штаммом 3.1 (121 и 411 ДЭГ соответственно), чем на воздействие штаммом 139.1 (21 и 23 ДЭГ соответственно), в то время как сорт Мичуринский, проявляющий полевую восприимчивость к антракнозу, продемонстрировал значительный ответ на воздействие двумя штаммами с точки зрения количества ДЭГ (438 ДЭГ при воздействии штаммом 3.1 и 448 ДЭГ при воздействии штаммом 139.1).

Кроме этого, интересен и тот факт, что в лабораторном эксперименте сорт Мичуринский проявил толерантность к инфекции: ни один из шести исследованных штаммов *Colletotrichum lupini* не показал значительного увеличения количества погибших растений по сравнению с условиями ложной инокуляции [6].

Список литературы

1. Nigussie Z. Contribution of White Lupin (*Lupinus albus* L.) for Food Security in North-Western Ethiopia: A Review // Asian Journal of Plant Sciences. 2012. № 11(5). PP. 200-205. doi:10.3923/ajps.2012.200.205.
2. The Use of Lupin as a Source of Protein in Animal Feeding: Genomic Tools and Breeding Approaches / E.M. Abraham, I. Ganopoulos, P. Madesis [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2019. № 20(4). P. 851. doi:10.3390/ijms20040851.
3. Cowling W.A., Gladstonjes J.S. Lupin Breeding in Australia. Linking Research and Marketing Opportunities for Pulses in the 21st Century // Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture. 2000. № 34. PP. 541-547. doi:10.1007/978-94-011-4385-1_51.

4. Genetic diversity of *Colletotrichum lupini* and its virulence on white and Andean lupin / J.A. Alkemade, M.M. Messmer, R.T. Voegelé [et al.] // Scientific Reports. 2021. № 11. P. 13547. doi:10.1038/s41598-021-92953-y.

5. Talhinhos P., Baroncelli R., Le Floch G. Anthracnose of lupins caused by *Colletotrichum lupini*: A recent disease and a successful worldwide pathogen // Journal

of Plant Pathology. 2016. V. 98(1). PP. 5-14. doi:10.4454/JPP.V98I1.040.

6. Characterization of white lupin (*Lupinus albus*) cultivars' response to primary infection by diverse *Colletotrichum lupini* strains from a single Russian field / S. Samad, A. Baik, S. Boldyrev [et al.] // International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2023. V. 09(06). PP. 1-23. doi:10.51193/IJAER.2023.9606.

ANALYSIS OF DIFFERENTIAL GENE EXPRESSION IN *LUPINUS ALBUS* L. SEEDLINGS FOLLOWING SEED INOCULATION BY *COLLETOTRICHUM LUPINI*

Podlutskii M.S.¹, Shubina S.I.¹, Voronezhskaya V.S.¹, Samad S.², Baik A.², Bondarenko V.S.¹, Boldyrev S.V.², Lukashevich M.I.³, Ben C.², Bondarenko E.V.¹

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

²Autonomous Non-Profit Organization for Higher Education «Skolkovo Institute of Science and Technology», Bolshoy Boulevard, 30, p. 1, Moscow, the territory of the Skolkovo Innovation Center, Russian Federation, 121205

³All-Russia Research Institute of Lupin – Branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Berezovaya st. 2, Michurinsky, Bryansk region, Bryansk district, Russian Federation, 241524

Lupinus albus L. is a key and important agricultural species within the genus *Lupinus*, recognized for its high content of protein, oil, amino acids, and fiber, making it a valuable alternative to soy. However, its cultivation is complicated by anthracnose, a pathogenic disease caused by the fungus *Colletotrichum lupini*, leading to significant yield losses and substantially affecting the economic viability of its cultivation. In this study, a comprehensive transcriptomic analysis was conducted, the results of which can aid in research on the potential molecular pathways and mechanisms underlying the response of white lupin to pathogenic stress.

Keywords: white lupin, anthracnose, *Colletotrichum lupini*, RNA sequencing, transcriptomic analysis, differential gene expression

The study analyzed differential gene expression in 7-day-old seedlings of three white lupine varieties (Andromeda, Michurinskij, and SN 5-19) after seed inoculation with two aggressive *Colletotrichum lupini* strains (3.1 and 139.1). The moderately resistant to anthracnose genotypes Andromeda and SN 5-19 showed a richer transcriptomic response to strain 3.1 (121 and 411 DEGs, respectively) than to strain 139.1 (21 and 23

DEGs, respectively), while the cultivar showing field susceptibility to anthracnose Michurinskij demonstrated the same response to both strains in terms of DEGs' number (438 to strain 3.1 and 448 to strain 139.1). Interestingly, in the laboratory experiment, out of 6 studied strains, none produced significant increase of dead plants compared to mock-inoculated conditions for Michurinskij.

УДК 577.29

МУЛЬТИПЛЕКСНОЕ НАНОПОРОВОЕ СЕКВЕНИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ RAPID BARCODING KIT

Полховская Е.С.^{1,a}, Груздев И.В.¹, Москалёв Е.А.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

Сельскохозяйственное производство является одной из важнейших отраслей российской экономики, поскольку является не только инструментом обеспечения продовольственной безопасности, но и движущей силой экономического роста. Достижение стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур требует быстрой идентификации новых аллельных вариантов генов. Однако многие мутации невозможно обнаружить с помощью традиционных методов молекулярной биологии. У подсолнечника идентифицированы три гена (*Ahas1*, *Ahas2*, *Ahas3*), кодирующие каталитические субъединицы AHAS, с различными точечными мутациями, обеспечивающими устойчивость к гербицидам. Для анализа аллельных вариаций важно разработать простые молекулярные подходы для одновременного обнаружения множества мутаций. В нашем исследовании Нанопоровое секвенирование ампликонов с использованием Rapid Barcoding Kit позволило нам провести анализ полиморфизма целевых генов, а также выявить различные структурные вариации.

Ключевые слова: нанопоровое секвенирование, мультиплекс, ампликоны, структурные вариации

Являясь основой продовольственной безопасности и экономического роста, сельское хозяйство постоянно ищет новые пути повышения эффективности. В последние годы наблюдается устойчивый рост сельскохозяйственного производства, обусловленный как технологическими инновациями, так и генетическими достижениями [1]. Однако классическая селекция растений сталкивается с серьезными ограничениями, связанными с длительными циклами развития, сложными условиями окружающей среды и ограниченным генетическим разнообразием [2].

Наличие высокой генетической изменчивости и разнообразия в генофонде является элементарной необходимостью для генетического улучшения любых видов сельскохозяйственных культур. Традиционная селекция растений полностью зависит от доступности достаточных генетических вариаций для улучшения урожая [3]. Однако варьирующиеся условия окружающей среды вносят свой вклад в развитие сельскохозяйственных культур. Необходимость воспроизводить высокие и стабильные урожаи, а также обеспечивать устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам порождает необходимость выявления новых аллелей экономически важных признаков в короткие сроки [4].

Однако, поскольку многие из них могут иметь структурные вариации в виде точечных мутаций, не всегда возможно идентифицировать новые генетические вариации с помощью обычных молекулярно-биологических методов. Ярким примером этого является устойчивость гибридов подсолнечника к воздействию гербицидов. Это вызвано мутациями в ключевой области гена, кодирующего каталитическую субъединицу AHAS [5-9].

Основываясь на молекулярных достижениях, исследователи идентифицировали и охарактеризовали три гена, кодирующих каталитические субъединицы AHAS в подсолнечнике (*Ahas1*, *Ahas2* и *Ahas3*) [10-12]. *Ahas1* представляет собой мультиаллельный локус, который на данный момент имеет описанные естественные мутации устойчивости к гербицидам у подсолнечника. *Ahas1-1* содержит мутацию С-на-Т в

кодоне 205, которая обеспечивает умеренную устойчивость к IMI (имидазолиноны) [10, 11]. *Ahas1-2* демонстрирует мутацию С-на-Т в кодоне 197, обеспечивающую высокий уровень устойчивости к SU (сульфонилмочевины) [10]. *Ahas1-3* представляет собой мутацию G-на-A в кодоне 122, которая обеспечивает высокий уровень устойчивости к IMI [12], а *Ahas1-4* содержит мутацию G-на-Т в кодоне 574, которая обеспечивает широкий диапазон устойчивости к четырём семействам гербицидов, нацеленных на AHAS [13]. Однако устойчивость к гербицидам не ограничивается только 4 аллелями. Существует множество других устойчивых аллелей в локусе *Ahas1*, которые еще не получили официального обозначения [13].

Для идентификации новых аллелей обычно применяются технологии, основанные на ПЦР, такие как CAPS, RFLP [14-17], dCAPS [18, 19], Eco-Tilling [20], RAPD, ISSR, AFLP, SSR [21-23].

Исследователи использовали маркеры RFLP для идентификации двух мутаций в гене AHAS1 подсолнечника, которые, по-видимому, придают устойчивость к гербицидам IMI и SU. С помощью INDEL-маркеров [24] и SSR-маркеров [25] были выявлены SNP в последовательностях FAD2, характеризующей высокоолеиновые генотипы подсолнечника [26]. Многие авторы разрабатывают подходы для изучения генов с помощью молекулярных маркеров [27-29], однако полученные результаты не всегда точны и требуют дополнительных проверок ввиду наличия tandemных повторов FAD2.

В последние годы активизировался поиск подходящих и простых в использовании молекулярных инструментов для выявления высокого разнообразия генотипов сельскохозяйственных культур. Поиск точечных мутаций с помощью маркеров – трудоемкий процесс, накладывающий существенные ограничения. Растет интерес к поиску инструментов, которые могут одновременно обнаруживать несколько мутаций в целевом сайте за одну реакцию [26].

Таким образом, целевое секвенирование в выбранных регионах можно использовать для выявления структурных вариаций. Это может служить

важным инструментом, позволяющим легко и быстро идентифицировать аллели, а также повышает точность и эффективность выявления точковых мутаций [23, 30, 31].

Поэтому в нашем исследовании мы применили нанопоровое секвенирование ампликонов с использованием набора Rapid Barcoding Kit (Oxford Nanopore Technologies, Оксфорд, Великобритания) для выявления структурных изменений в целевой области. Это послужило важным инструментом для простой и быстрой идентификации аллелей, повышая точность и эффективность выявления точечных мутаций.

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

Список литературы

1. Изряднова О. Раздел 4. Реальный сектор экономики // Российская экономика. Тенденции и перспективы. 2016. № 38. С. 163-271.
2. Penna S., Jain S.M. Mutant resources and mutagenomics in crop plants // Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA). 2017. V. 29. № 9. PP. 651-657.
3. Chaudhary J., Deshmukh R., Sonah H. Mutagenesis approaches and their role in crop improvement // Plants. 2019. V. 8. № 11. P. 467.
4. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review / Y. Oladosu [et al.] // Biotechnology & Biotechnological Equipment. 2016. V. 30. № 1. PP. 1-16.
5. Preston C., Mallory-Smith C.A. Biochemical mechanisms, inheritance, and molecular genetics of herbicide resistance in weeds // In: S.B. Powles, D.L. Shaner (eds.), Herbicide Resistance and World Grains CRC Press, Boca Raton, FL, 2001. PP. 23-60.
6. Tranel P.J., Wright T.R. Resistance of weeds to AHAS inhibiting herbicides: what have we learned? // Weed Science 2002. V. 50. PP. 700-712.
7. Imidazolinone tolerant crops: history, current status and future / S. Tan, R.R. Evans, M.L. Dahmer [et al.] // Pesticide Management Science. 2005. V. 61. PP. 246-257.
8. Tan S., Evans R., Singh B. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops // Amino Acids. 2006. V. 30(2). PP. 195-204.
9. Genetics and breeding of herbicide tolerance in sunflower / C.A. Sala [et al.] // Helia. 2012. V. 35. № 57. PP. 57-70.
10. Bruniard J.M., Miller J.F. Inheritance of imidazolinone herbicide resistance in sunflower // Helia. 2001. V. 24. PP. 11-16.
11. Acetohydroxyacid synthase mutations conferring resistance to imidazolinone or sulfonylurea herbicides in sunflower / J.M. Kolkman, M.B. Slabaugh, J.M. Bruniard [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. 2004. V. 109. PP. 1147-1159.
12. Molecular and biochemical characterization of an induced mutation conferring imidazolinone resistance in sunflower / C.A. Sala, M. Bulos, A.M. Echarte [et al.] // Theoretical and Applied Genetics. 2008c. V. 108. PP. 115-112.
13. Sala C.A., Bulos M. Inheritance and molecular characterization of broad range tolerance to herbicides targeting acetohydroxyacid synthase in sunflower // Theoretical and Applied Genetics. 2012a. V. 124. PP. 355-364.
14. Yu Q., Han H., Powles S.B. Mutations of the ALS gene endowing resistance to ALS-inhibiting herbicides in *Lolium rigidum* populations // Pest Manag Sci. 2008. V. 64. PP. 1229-1236.
15. Corbett C.A.L., Tardif F.J. Detection of resistance to acetolactate synthase inhibitors in weeds with emphasis on DNA-based techniques: a review // Pest Manag Sci. 2006. V. 62. PP. 584-597.
16. Tan M.K., Preston C., Wang G.X. Molecular basis of multiple resistance to ACCase-inhibiting and ALS-inhibiting herbicides in *Lolium rigidum* // Weed Res. 2007. V. 47. PP. 534-541.
17. Corbett C.A.L., Tardif F.J. Detection of resistance to acetohydroxyacid synthase inhibitors in *Amaranthus* sp. using DNA polymorphisms // Pestic Biochem Physiol. 2008. V. 92. PP.48-55.
18. Delye C., Boucansaud K. A molecular assay for the proactive detection of target site-based resistance to herbicides inhibiting acetolactate synthase in *Alopecurus myosuroides* // Weed Res. 2008. V. 48. PP. 97-101.
19. Variation in the gene encoding acetolactate-synthase in *Lolium* species and proactive detection of mutant, herbicide-resistant alleles / C. Delye [et al.] // Weed Res. 2009. V. 49. PP. 326-336.
20. Discovery of single-nucleotide mutations in acetolactate synthase genes by ecotilling / G.X. Wang, M.K. Tan, S. Rakshit [et al.] // Pestic Biochem Physiol. 2007. V. 88. PP. 143-148.
21. Genome mapping, molecular markers and marker-assisted selection in crop plants / M. Mohan, S. Nair, A. Bhagwat [et al.] // Mol. Breed. 1997. V. 3. PP. 87-103.
22. Yu Q., Powles S.B. Resistance to AHAS inhibitor herbicides: current understanding // Pest management science. 2014. V. 70. № 9. PP. 1340-1350.
23. Next generation sequencing based forward genetic approaches for identification and mapping of causal mutations in crop plants: A comprehensive review / P.K. Sahu [et al.] // Plants. 2020. V. 9. № 10. P. 1355.
24. The sunflower high-oleic mutant Ol carries variable tandem repeats of FAD2-1, a seed-specific oleoyl-phosphatidyl choline desaturase / G.F. Schuppert,

S. Tang, M.B. Slabaugh, S.J. Knapp // Molecular Breeding. 2006. V. 17. PP. 241-256.

25. Lacombe S., Souyris I., Bervillé A.J. An insertion of oleate desaturase homologous sequence silences via siRNA the functional gene leading to high oleic acid content in sunflower seed oil // Molecular Genetics and Genomics. 2009. V. 281. PP. 43-54.

26. Oleic acid variation and marker-assisted detection of Pervenets mutation in high-and low-oleic sunflower cross / A. Dimitrijević [et al.] // Crop Breeding and Applied Biotechnology. 2017. V. 17. PP. 235-241.

27. Nagarathna T.K., Shadakshari Y.G., Ramanappa T.M. Molecular analysis of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes for high oleic acid using microsatellite markers // Helia. 2011. V. 34. PP. 63-68.

28. Singchai A., Muangsan N., Machikowa T. Evaluation of SSR markers associated with high oleic acid in

sunflower // International Journal of Biological, Food, Veterinary and Agricultural Engineering. 2013. V. 7. PP. 631-634.

29. Screening of the presence of ol gene in NS sunflower collection / A. Dimitrijević, I. Imerovski, D. Miladinović [et al.] // In Kaya Y. and Hasancebi S. (eds) Proceedings of the 19th international sunflower conference. ISA, Edirne, 2016. PP. 661-667.

30. Caenorhabditis elegans mutant allele identification by whole-genome sequencing / S. Sarin, S. Prabhu, M.M. O'Meara [et al.] // Nat. Methods. 2008. V. 5. PP. 865-867.

31. Rapid whole-genome mutational profiling using next-generation sequencing technologies / D. Smith, A.R. Quinlan, H.E. Peckham [et al.] // Genome Res. 2008. V. 18. PP. 1638-1642.

MULTIPLEX NANOPORE SEQUENCING USING RAPID BARCODING KIT

Polkhovskaya E.S.¹, Gruzdev I.V.¹, Moskalev E.A.¹, 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

Agriculture is one of the most important sectors of the Russian economy, because it is not only a means of ensuring food security, but also a force for economic growth. Achieving high yields requires rapid identification of new allelic genes. However, many mutations cannot be detected using traditional molecular biology methods. Three genes have been identified in sunflower (Ahas1, Ahas2, Ahas3) that encode AHAS catalytic subunits, with different genetic variants conferring resistance to herbicides. For the analysis of allelic variation, it is important to develop simple molecular approaches for the simultaneous detection of different variants. In our study, the nanopore sequencing of amplicons using the Rapid barcoding kit allowed us to analyze the polymorphism of the target genes and to identify different structural changes.

Keywords: nanopore sequencing, multiplex, amplicons, structural variations

Recent research shows that Oxford Nanopore Technologies with Native barcoding has proven itself to analyze amplicons of multiple samples simultaneously. In our previous study, by combining PCR amplicons targeting different subunits of high molecular weight glutenin genes within a single barcode, we demonstrated the ability to identify both structural variations in promoters and coding regions, as well as new allelic variants in large and complex plant genomes in a short time. However, due to the time spent amplifying each individual gene and the duration of the library assembly, this method can be time-consuming and expensive when analyzing large numbers of samples. As an alternative for nanopore sequencing of amplicons, Rapid barcoding Kit 96 (SQK-RBK110.96, released on March 2021) has been released, which can reduce the sample preparation of the library. Also, in some studies, it has been shown that this kit was used to sequence multiple amplicons with a high accuracy. This approach is widely used in clinical molecular diagnostics due to the relatively simple instrumentation and small amount of biological material. This technique is useful for typing

bacterial species and has been used for rapid and accurate identification of human and animal pathogens. Based on these experiments, it will be interesting to see if this approach can be useful for multi-genome sequencing in plant species with a large genome sizes, such as wheat and sunflower, which are difficult to analyze using short reads because the gene sequences contain repeats or genetic mutations.

In this study, we optimized the express-protocol, which allows the use of multiplex PCR and a rapid sequencing kit to evaluate the structural changes in the genes of economic important traits of 40 sunflower lines and 30 wheat accessions of different origins. The advantage of that method sample preparation using a rapid barcoding kit and library preparation takes no more than 2 hours. This is enough time to get more than 2000 reads per each barcode in a short time. Wheat alleles identified with InDels were confirmed by Sanger sequencing. The results of this study showed that the nanopore sequencing of multiple using the rapid barcoding kit is a fast and efficient method compared to the native barcoding.

УДК 577.29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКОМБИНАНТНЫХ ВИРУСОВ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО МУТАГЕНЕЗА РАСТЕНИЙ

Полховский А.В.^{1,2,3}, Дмитриева М.В.^{1,2}, 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

³ Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1, Российская Федерация

Ключевые слова: вирусное редактирование генов, TSWV, CRISPR-Cas9

Биологический мутагенез (БМ) подразумевает использование природных мутагенов, таких как мобильные элементы, для расширения генетической изменчивости современных сельскохозяйственных культур [1]. Вирусное редактирование генов (ВРГ) становится еще одним направлением БМ. ВРГ – это инновационный метод, использующий естественные возможности вирусов для доставки инструментов редактирования, таких как CRISPR-Cas9, в клетки растений для точных геномных изменений без фактического трансгеноза. ВРГ позволяет проводить целевую модификацию генов, что в свою очередь может привести к получению или улучшению желаемых признаков в существующих сортах сельскохозяйственных растений и получения новых в короткие сроки.

Вирус пятнистого увядания томатов (TSWV) в может эффективно инфицировать широкий спектр видов растений, что делает его удобным кандидатом для доставки компонентов редактирования для точной модификации генома сельскохозяйственных растений без получения ими статуса ГМО.

В данной работе мы использовали *Nicotiana benthamiana* в качестве модельного организма и ген PDS для проведения ВРГ. Нами было показано, что ВРГ

позволяет получить отредактированные гомозиготные растения поколения T₁ без внесения чужеродной ДНК в геном растения-реципиента в кратчайшие сроки (5 месяцев). В нашей работе эффективность мутагенеза целевого локуса составила в среднем от 30 до 50 %. Также мы оценили разные способы заражения вирусным вектором и ряд дополнительных операций для усиления активности вируса в клетках растений. Полученные результаты позволяют заключить, что ВРГ является мощным инструментом современной селекции растений и, потенциально, способен в разы сократить время получения новых сортов с заданными характеристиками без получения статуса ГМО.

Список литературы

1. Kirov I.V. Mutagenesis for Plant Breeding // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24(23). P. 17054.

2. Engineered biocontainable RNA virus vectors for non-transgenic genome editing across crop species and genotypes / Q. Liu [et al.] // Molecular Plant. 2023. V. 16(3). PP. 616-631.

USING RECOMBINANT VIRUSES FOR DIRECTED PLANT MUTAGENESIS

Polkhovsky A.V.^{1,2,3}, Dmitrieva M.V.^{1,2}, 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

³ Autonomous Non-Profit Organization for Higher Education «Skolkovo Institute of Science and Technology», Bolshoy Boulevard, 30, p. 1, Moscow, the territory of the Skolkovo Innovation Center, Russian Federation, 121205

Keywords: *viral induced gene editing, TSWV, CRISPR-Cas9*

Biological mutagenesis (BM) involves the use of advanced mutagens such as mobile elements to expand the genetic variability of modern crop plants [1]. Viral induced gene editing (VIGE) is emerging as another direction of BM. VIGE is an innovative method that utilizes the natural capabilities of viruses to engineer editing tools such as CRISPR-Cas9 in plant cells to make precise genomic changes without actual transgenesis. VIGE allows targeted modification of genes, which in turn can lead to obtaining or ensuring the desired traits in existing varieties of agricultural plants and obtaining new ones in a short time.

Tomato spotted wilt virus (TSWV) can effectively infect a wide range of plant species, which makes it a possible candidate for creating components for precise

genome modification of agricultural plants without the requirement for GMOs.

In this work, we used *Nicotiana benthamiana* as a model organism and the PDS gene as target for VIGE. We showed that VIGE allows obtaining edited homozygous plants of the T1 generation without introducing foreign DNA into the recipient plant genome in the shortest possible time (5 months). In our work, the efficiency of the target locus mutagenesis is on average from 30 to 50 %. We also evaluated various methods of infection with a viral vector and a number of additional operations to enhance the activity of the virus in plant cells. The obtained results allow us to conclude that VIGE is a powerful tool of modern plant breeding and it allows us to obtain new varieties with specified features faster by several times in time being GMO-free.

УДК 579.253.2: 615.015.8

МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ И ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ПРИ ВЕТЕРИНАРНОМ МОНИТОРИНГЕ РЕЗИСТЕНТНОСТИ

Пырников А.С.^а, Крылова Е.В., Солтынская И.В., Блюменкранц Д.А., Макаров Д.А., 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

Выявление изменений в распространении резистентности бактерий к антибактериальным препаратам имеет большое фундаментальное и прикладное значение. Учет фактических данных эпизоотологического мониторинга и уровня антибиотикорезистентности бактерий, циркулирующих в конкретных хозяйствах, позволяет корректировать рекомендации по антибактериальной терапии в животноводстве.

Ключевые слова: *антибиотикорезистентность, бактерии, фенотип, гены резистентности, ПЦР в реальном времени*

В рамках проведения ветеринарного мониторинга в ФГБУ «ВГНКИ» наибольший интерес представляют изоляты, обладающие генами, которые кодируют специфичные белки, ответственные за резистентность у бактерий. У протестированных нами методом полногеномного секвенирования изолятов *Salmonella Infantis*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* и *Listeria monocytogenes* были установлены следующие механизмы устойчивости к антибиотикам: модификация мишени, защита мишени, инактивация антибиотика, активное выведение антибиотика из микробной клетки (эффлюкс) [1, 4, 8]. Таким образом, устойчивость бактерий к антибиотикам может определяться целым рядом генов, а также мутациями генов, кодирующих мишени действия антибиотиков.

Своевременное выявление изменений в распространении резистентности бактерий к антибиотикам имеет важное практическое и теоретическое значение, так как позволяет корректировать рекомендации по антибактериальной терапии в животноводстве, разрабатывать экспресс методы детекции антибактериальной резистентности, дает важную информацию для создания новых препаратов, преодолевающих резистентность [3].

Необходимо отметить, что микробиологические методы достаточно точны, имеют низкие трудозатраты, экономически эффективны. Но в настоящее время важным направлением стал системный мониторинг распространения антимикробной резистентности, в том числе с помощью молекулярно-

генетических методов. Однако до недавнего времени существовавшие на рынке отечественные ПЦР-тест-системы были ориентированы на клинический материал, поэтому для ветеринарного мониторинга была необходимость разработки экспресс-методик выявления генов антибиотикорезистентности, наиболее часто встречающихся у бактерий ветеринарного происхождения [5].

В рамках нашей работы были проанализированы образцы из объектов окружающей среды без этапа выделения бактериальных изолятов (метагеномные образцы): пробы фекалий и пробы из внешней среды (смывы со стен, оборудования, подстилка). Образцы были отобраны на животноводческих комплексах, где выращивали крупный рогатый скот (КРС), в разных регионах России (Рязанская область, Республика Мордовия, Приморский край).

Выделение, идентификация и анализ фенотипической резистентности проводились в рамках тестирования групп бактерий, рекомендуемых для ветеринарного мониторинга ВОЗЖ [7]. Тестирование чувствительности микроорганизмов к 19 антибактериальным препаратам 10 классов проводили методом серийных микроразведений в бульоне [9]. Интерпретацию полученных результатов осуществляли по критериям EUCAST (Европейский комитет по определению чувствительности к антимикробным препаратам [6] с использованием онлайн-платформы AMRcloud [2]. Для молекулярно-генетических

исследований были взяты 22 пробы фекалий и 19 проб из внешней среды.

Выделение ДНК осуществляли сорбционным методом с применением коммерческих наборов реагентов. Исследования образцов на наличие генов резистентности к фторхинолонам (*qnrS*, *qnrB*), тетрацилинам (*tetA*, *tetM*, *tetO*), пенициллинам (СМУ), цефалоспорином (СТХ-М-1, СТХ-М-9), колистину (*mcr-1*), сульфаметоксазолу и триметоприму (*sul1*, *dfrA12*) проводили методом ПЦР в режиме «реального времени» с применением разработанных нами методик.

Для изолятов бактерий, выделенных из метагеномных образцов, были проведены исследования по определению фенотипической чувствительности к антибиотикам различных классов. Из полученных образцов было выделено порядка 125 изолятов *Escherichia coli*, *Enterococcus spp.*, *Salmonella enterica*, *Staphylococcus spp.*, *Campylobacter spp.* и *Listeria monocytogenes*. Выявлено значительное число изолятов, резистентных к ампициллину, амоксициллину, цефотаксиму, цефтиофуру, гентамицину, стрептомицину, тетрациклину, доксициклину и ципрофлоксацину.

Сравнение результатов микробиологических и молекулярно-генетических исследований определения резистентности представлено на примере образцов, отобранных в хозяйствах Рязанской обл. (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение результатов микробиологических и молекулярно-генетических исследований определения резистентности бактерий на примере хозяйств Рязанской области

Образец	Классы антибиотиков	Микробиологические методы	Молекулярно-генетические методы
		Фенотип (тестирование изолятов)	Гены резистентности (тестирование ДНК из метагеномных образцов)
Фекалии	фторхинолоны	S/R (45/10)*	не обнаружено
	аминопенициллины	S (49)*	СМУ
	цефалоспорины	S/R (11/2)*	СТХ-М-1; СТХ-М-9
	аминогликозиды	S/R (41/1)*	aadA
	тетрациклины	S/R (37/17)*	<i>tetA</i> ; <i>tetO</i> ; <i>tetM</i>
	триметоприм	S (7)*	не обнаружено
	колистин	S (7)*	не обнаружено
Пробы из внешней среды	фторхинолоны	S/R (16/15)*	не обнаружено
	аминопенициллины	S (12)*	не обнаружено
	цефалоспорины	S/R (4/4)*	СТХ-М-9
	аминогликозиды	S/R (16/13)*	aadA
	тетрациклины	S/R (16/1)*	не обнаружено
	колистин	R (1)*	не обнаружено

R – Resistance: изолят как минимум по одному из критериев оценки резистентности (ECOFF или CBP) относится к категории устойчивых или имеющих промежуточную устойчивость;

S – Sensitive: изолят как минимум по одному из критериев оценки резистентности (ECOFF или CBP) относится к категории чувствительных;

* – количество изолятов.

Гены резистентности, обнаруженные в метагеномных образцах только с чувствительными изолятами, могут принадлежать бактериям, не входящим в систему мониторинга.

Отсутствие детектированных генов устойчивости в образцах с резистентными изолятами, например, к фторхинолонам, скорее всего, связано с ограниченным числом генов, выявляемых разработанными методиками. Резистентность изолятов, по-видимому, объясняется наличием других генов или мутациями в хромосомных генах, кодирующих мишени для действия антибактериальных препаратов.

В хозяйствах Мордовии наиболее часто встречались в метагеномных образцах гены резистентности: *tetA*, *tetM*, *aadA* и *sul1*, в Приморском крае преобладали гены *tetA*, *tetO*, *tetM* и *aadA*. Образцы фекалий и пробы из внешней среды являются в полной мере применимыми для исследований методом ПЦР без этапа выделения бактериальных изолятов в рамках проведения ветеринарного мониторинга антибиотикорезистентности.

Мониторинг устойчивости к противомикробным препаратам среди зоонозных бактерий является важной частью надзора за безопасностью пищевой цепи. Полученные в рамках нашего исследования результаты согласуются с данными анализа антимикробной резистентности изолятов микроорганизмов, выделенных от животных на территории Российской Федерации. Установлено широкое распространение изолятов с фенотипом резистентности к фторхинолонам, цефалоспорином, аминогликозидам, тетрациклинам, и колистину.

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

Список литературы

1. Полногеномное секвенирование изолятов *Staphylococcus aureus*, выделенных из образцов от животных и из окружающей среды на предприятиях АПК в рамках мониторинга антибиотикорезистентности / Е.В. Крылова, Н.А. Кирсанова, А.В. Путинцева [и др.] // КМАХ. 2023. Т. 25. Приложение 1. С. 34.

2. Макаров Д.А., Иванова О.Е., Виноградова А.Г. Антимикробная резистентность зоонозных и индикаторных бактерий, выделяемых от продуктивных животных: практическое руководство. Смоленск: Смоленский государственный медицинский университет, 2023. 80 с.

3. Прунтова О.В., Русалеев В.С., Шадрова Н.Б. Современное представление о механизмах антимикробной резистентности бактерий (аналитический обзор) // Ветеринария сегодня. 2022. Т. 11. №. 1. С. 7-13.

4. Полногеномное секвенирование изолятов *Listeria monocytogenes*, выделенных в рамках мониторинга антибиотикорезистентности / А.С. Пырсигов, И.В. Солтынская, Е.В. Крылова [и др.] // КМАХ. 2024. Т. 26. Приложение 1. С. 47-48.

5. Разработка ПЦР методик для комплексного ветеринарного мониторинга резистентности бактерий к антимикробным препаратам / И.В. Солтынская, Е.В. Крылова, А.Н. Богомазова [и др.] // Научные достижения в ветеринарии и животноводстве: от теории к практике: сборник материалов всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Екатеринбург: ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН, 2024. С. 104-109.

6. European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. URL: <http://www.eucast.org> (дата обращения 30.08.2024).

7. European Food Safety Authority and European Centre for Disease Prevention and Control. The European Union Summary Report on Antimicrobial Resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in 2018/2019 // EFSA J. 2021. V. 19 (4): e06490.

8. WGS characterization of multidrug-resistant *Escherichia coli* isolated from poultry in the Russia / I. Soltynskaya, E. Krylova, A. Bogomazova [et al.] // Journal of Infection and Public Health. 2020. V.13. I. 2. P. 332.

9. VET01-A4 Performance Standards for Antimicrobial Disk and Dilution Susceptibility Tests for Bacteria Isolated From Animals, Approved Standard – Fourth Edition. V.28. № 8.

MOLECULAR GENETIC AND PHENOTYPIC EVALUATION OF BACTERIAL OBTAINED IN VETERINARY RESISTANCE MONITORING

Pyrnikov A.S., Krylova E.V., Soltynskaya I.V., Blumenkrants D.A., Makarov D.A., Ivanova O.E.

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

Identification of changes in the spread of bacterial resistance to antibacterial preparations is of great fundamental and applied importance. Taking into account the actual data of epizootological monitoring and levels of antibiotic resistance of bacteria circulating in specific farms allows to adjust recommendations on antibiotic therapy in animal husbandry.

Keywords: *antibiotic resistance, bacteria, phenotype, resistance genes, real-time PCR*

Systemic monitoring of the spread for antimicrobial resistance, including molecular genetic methods, has become an important trend. As part of our work, we analysed samples from environmental objects without the step of isolating bacterial isolates (metagenomic samples). Studies of samples for the occurrence of resistance genes to fluoroquinolones (qnrS, qnrB), tetracyclines (tetA, tetM, tetO), penicillins (CMY), cephalosporins (CTX-M-1, CTX-M-9), colistin (mcr-1), sulfamethoxazole and trimethoprim (sul1, dfrA12) were analysed by real-time PCR using our methods.

Phenotypic susceptibility studies to antibiotics of different classes were performed for about 125

bacterial isolates from metagenomic samples. The results obtained in our study are consistent with the data of antimicrobial resistance analysis of microbial isolates isolated from animals in the Russian Federation. A wide distribution of isolates with resistance phenotype to fluoroquinolones, cephalosporins, aminoglycosides, tetracyclines, and colistin was found.

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

УДК 619:616-056.7-076:636.082.12(476)

ДНК-ДИАГНОСТИКА НАСЛЕДСТВЕННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ ВСТРЕЧАЕМОСТИ МУТАЦИЙ У КОРОВ, СВИНЕЙ, ЛОШАДЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Романишко Е.Л.а, Киреева А.И., Михайлова М.Е., Тиханович Н.И., Камыш Н.А.

Государственное научное учреждение «Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси», 220072, г. Минск, ул. Академическая, д. 27, Республика Беларусь

e-mail: ^aLenaRamanishko@mail.ru

В условиях повсеместного использования искусственного оплодотворения с применением семенного материала высокопродуктивных животных существует риск распространения генетических дефектов в популяции. Поэтому нами разработаны методы ДНК-диагностики девятнадцати наследственных заболеваний крупного рогатого скота, трех заболеваний свиней и двух дефектов лошадей. С помощью разработанных методов в период с 2008 по 2024 год проводилось исследование сельскохозяйственных животных (коров, свиней, лошадей) белорусской селекции. Анализ генетической структуры голштинской породы показал, что частота встречаемости животных-носителей мутантных аллелей в среднем на 2024 год составляет: BYC – 3.03 %, HH1C – 2.48 %, HH3C – 3.13 %, HH4C – 0.45 %, HH5C – 2.45 %, HCD1.3 – 2.26 %, CVC – 2.36 %, BLC – 0.60 %, DPC – 0 %, XIC – 0.36 %, BC – 0 %. Диагностика скота абердин-ангусской породы показала отсутствие животных-носителей генетических дефектов в исследованной выборке: AMC – 0 %, MA – 0 %, DD – 0 %, DW – 0 %. Анализ генетической структуры свиней показал следующее распределение животных-носителей: DMD (ландрас – 25.5 %, Йоркшир – 1.67 %, Дюрок – 2.6 %, Белорусская мясная – 44.4 %, Крупная Белая – 5.7 %, Черно-пестрая – 33.3 %), RYR (Дюрок – 2.27 %, Эстонская Беконная – 0 %, Пьетрейн – 50 %, Белорусская мясная – 0 %, Крупная Белая – 5.7 %, Йоркшир – 0 %, Черно-пестрая – 33.3 %, Ландрас – 0 %). ISTS – (Крупная белая, Дюрок, Ландрас, Йоркшир – 0 %). Также показано отсутствие генетических дефектов HIPR, SCID в исследованной выборке лошадей пород Белорусская упряжная, Тракненская и Арабская.

Ключевые слова: *ДНК-диагностика, наследственные заболевания, генетические дефекты, LoF-мутации, мутантный аллель, КРС, свиньи, лошади*

Интенсивное использование таких репродуктивных биотехнологий, как искусственное осеменение и трансплантация эмбрионов позволило значительно повысить генетический потенциал продуктивности

сельскохозяйственных животных. Однако негативной стороной использования ограниченных мировых генетических ресурсов высокопродуктивных животных явилось распространение большого количества

генетических дефектов, которые, как показала ДНК-диагностика, имели наследственную основу, обусловленную мутациями генов [1]. В поголовье племенных животных в разных странах и Республике Беларусь фиксировалось рождение телят с различными аномалиями [2]. Поэтому в странах с развитым животноводством, в том числе и в Республике Беларусь действует национальная программа генетического мониторинга, включающая в качестве обязательного элемента генетическое обследование племенных животных на наличие наследственных заболеваний. В базе данных OMIA (Onlinemendelian Inheritance in animals), содержащей информацию о наследственных дефектах животных, описано 267 наследственных заболеваний (наследуемые по законам Менделя) у крупного рогатого скота, 109 – у свиней, 43 – у лошадей [3]. Широко практикуемая в коневодстве система чистопородного разведения способствует не только формированию своеобразного породного аллелофонда каждой популяции, включающего в себя нормально функционирующие генные комплексы, но и накоплению мутантных генов, которые неизбежно возникают в каждом новом поколении. Считается, что одна гамета в среднем несет 4-5 мутаций, большая часть которых не проявляется в фенотипе животного при наличии нормального доминантного аллеля, то есть в гетерозиготном состоянии. В результате применения инбридинга генетический груз пород со временем неизбежно увеличивается и приводит к появлению различных дефектов, что указывает на необходимость тестирования животных на наличие

наследственных заболеваний и мониторинга генетической безопасности пород и популяций [4].

Поэтому важной задачей является разработка методик ДНК-диагностики животных-носителей мутантных аллелей, детерминирующих генетические дефекты коров, свиней и лошадей, а также генотипирование поголовья сельскохозяйственных животных белорусской селекции на наличие наследственных дефектов в популяции.

В качестве объекта исследования был использован крупный рогатый скот голштинской породы (n=6460 гол.), абердин-ангусской породы (n=505 гол.), свиньи разных пород (n=708 гол.) и лошади разных пород (n=110 гол.) (табл.1). Материалом для исследования служила ДНК, выделенная из биологического материала – цельной крови, проб ткани (ушной выщип) и спермы. Для выделения ДНК использовали набор реагентов «Нуклеосорб» («Праймтех», Беларусь). Количество выделенной ДНК определяли с помощью флуориметра DeNovix DS 11 FS с использованием набора реагентов для измерения концентрации ДНК DeNovix dsDNA Broad Range Kit (DeNovix, США). Для идентификации наследственных дефектов использовали широкий спектр методов: ПЦР, ПЦР-ПДРФ, АС-ПЦР-РВ, ПЦР-РВ, KASP и секвенирование по Сенгеру для валидации методов (табл. 1).

Данные ДНК-диагностики наследственных заболеваний и анализ частоты встречаемости мутаций у сельскохозяйственных животных (коров, свиней, лошадей), проведенный в 2008-2024 гг. в Республике Беларусь, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Анализ частоты встречаемости наследственных аномалий сельскохозяйственных животных (коров, свиней, лошадей) в Республике Беларусь и методы их диагностики

Дефект	Ген	Chromosome, Ensemble	Тип мутации	SNP	Метод	Порода	ДНК-диагностика, годы	Кол-во исследованных животных, гол.	Средняя частота встречаемости животных-носителей мутантных аллелей, %
Крупный рогатый скот (<i>Bos taurus</i>)									
BY	<i>FANCI</i>	21: 21184870- 21188198	делеции 3329 п.н. (Val876Leufs26X)	-	ПЦР	Голштинская, белорусская черно-пестрая	2016-2023	3568	3.03
НН1	<i>APAF1</i>	5: 62810245	C>T (Gln579Ter)	rs448942533	ПЦР-ПДРФ		2016-2023	1330	2.48
НН3	<i>SMC2</i>	8: 93753358	T>C (Phe1135Ser)	rs456206907	АС-ПЦР-РВ		2016-2023	1343	3.13
НН4	<i>GART</i>	1: 1997582	A>C (Asn290Thr)	rs465495560	ПЦР-РВ		2016-2023	1327	0,45

HH5	<i>TFB1M</i>	9: 92,350,052- 93,910,957	делеция 138 т.п.н.	-	ПЦР		2016- 2023	1349	2,45
HCD	<i>APOB</i>	11: 77,953,380- 78,040,118	вставка 1299 п.н. (Gly135ValfsX10)	-	ПЦР		2016- 2023	2393	2,26
CVC	<i>SLC35A3</i>	3: 43261945	G>T (Val180Phe)	rs438228855	ПЦР-РВ		2012- 2023	4863	2.36
BLAD	<i>ITGB2</i>	1: 144770078	A>G (Asp128Gly)	rs445709131	ПЦР-РВ		2008- 2023	4863	0.6
DUMPS	<i>UMPS</i>	1: 69756880	C>T (Arg405X)	-	ПЦР- ПДРФ		2008- 2023	3481	0.0
FXID	<i>FXI</i>	27: 16310345	вставка 76 п.н. (Asp470X)	-	ПЦР		2016- 2023	3579	0.36
BC	<i>ASS1</i>	11: 100781668	C>T (Arg86Ter)	-	ПЦР- ПДРФ		2016- 2023	513	0.0
HH6	<i>SDE2</i>	16: 29020700	A>G (Met1Thr) lost start	rs434666183	АС-ПЦР- РВ /в раз- работке		2024	12	0.0
HH7	<i>CENPU</i>	27: 15123636- 15123639	с.1888- 44820_1888- 44817del TTAC/-	rs481920244	КАСП /в разра- ботке		2024	8	0.0
HHM	<i>LRP4</i>	15: g.76800972C> Т	с.4864G>A (p.Gly1622Ser)	rs438564602	АС-ПЦР- РВ/ в раз- работке		2024	8	0.0
HH2	<i>RIOX1</i>	1: 107172616	с.1131del T/- (p.Leu378PhefsTer3)	rs523422030	Секвени- рование/ в разра- ботке		2024	1	0.0
AM	<i>HES4</i>	16: 51449539- 51472902	делеция 23347 п.н.	-	АС-ПЦР	Абердин-англусская	2022	31	0.0
MA	<i>MAN2B1</i>	7: 13957949	961T>C (Phe321Leu)	-	КАСП		2023- 2024	243	0.0
DD	<i>NHLRC2</i>	26: 34618072	932T>C (Val311Ala)	-	ПЦР- ПДРФ		2023	317	0.0
DW	<i>PRKG2</i>	6: 95896205	2032C>T (Arg678Ter)	rs109639251	АС-ПЦР- РВ		2023- 2024	153	0.0
Свинья домашняя (<i>Sus Scrofa</i>)									
PSS	<i>RYR1</i>	6: 47357966	с.1834T>C (p.Cys612Arg)	rs344435545	КАСП	Дюрок	2010- 2022	88	2.27
						Пьетрейн		2	50.0
						Ландрас		152	0.0
						Эстонская Беконная		11	0.0.
						Крупная бе- лая		193	5.7
						Белорусская мясная		21	0.0
						Йоркшир Черно-пест- рая		90 3	0.0 33.3
	<i>DMD</i>	X: 28309227	с.1837C>T (p.Arg613Trp)	rs196952080	КАСП	Ландрас	2018- 2021	180	25.5
						Йоркшир		124	1.6
						Дюрок		39	2.6
					Белорусская мясная		9	44.4	
ISTS	<i>SPEF2 (KPL2)</i>	16: 21088215- 21265875	инсерция 9000 п.н. (L1)	-	ПЦР	Крупная бе- лая Дюрок Ландрас Йоркшир	2016- 2018	200	0.0
Лошадь домашняя (<i>Equus caballus</i>)									

HIPP	SCN4A	11: 15474228	c.4248C>G (p.Phe1416Leu)	rs1148998534	ПЦР- ПДРФ	Белорусская упряж- ная, Тракненская, Арабская	2008- 2012	54	0.0
SCID	PRKDC	9: 36395749- 36395753	делеция 5 п.н. (TCATC/-)	rs3432674066	ПЦР	Арабские и помесные	2008- 2012	56	0.0

Проведение ДНК-диагностики племенных сельскохозяйственных животных позволяет выявить животных-носителей наследственных заболеваний и вести направленную селекцию на снижения частоты встречаемости мутантных аллелей путем исключения дефектных животных из селекционного процесса. За время исследования мы наблюдаем тенденцию к уменьшению частоты встречаемости животных-носителей мутантных аллелей в исследуемых популяциях, что позволяет снижать экономические потери в хозяйствах Республики Беларусь.

Работа выполнена при финансовой поддержке: ГП «Инновационные биотехнологии» на 2016-2018 договор № 19, ГП «Наукоемкие технологии и техника» на 2021-2025, мероприятие 2, ГП на 2016-2020 «Биотехнология» по заданию 2-12, ГП «Наукоемкие технологии и техника» на 2021-2025 годы по мероприятию 96ИБа.

Список литературы

1. ДНК-диагностика наследственных заболеваний молочного скота / В.И. Трухачев, М.И. Селионова, Л.Н. Чижова [и др.] // Вестник АПК Ставрополье. 2017. № 2(26). С. 120-125.
2. Выявление гаплотипов фертильности в белорусской популяции крупного рогатого скота голштинской породы / Е.Л. Романишко, М.Е. Михайлова, А.И. Киреева, Р.И. Шейко // Молекулярная и прикладная генетика. 2021. Т. 31. С. 7-21.
3. OMIA – Online Mendelian Inheritance in Animals. URL: <https://omia.org/home/> (дата обращения 20.09.2024).
4. Храброва Л.А. Наследственные дефекты лошадей: диагностика и профилактика // Коневодство, Farm Animals. 2014. № 2. С. 80-91.

DNA DIAGNOSTICS OF HEREDITARY DISEASES OF FARM ANIMALS AND ANALYSIS OF MUTATION FREQUENCY IN COWS, PIGS, HORSES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Romanishko E.L., Kireeva A.I., Mikhailova M.E., Tikhonovich N.I., Kamysh N.A.

State Scientific Institution «Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus», Akademicheskaya str. 27, Minsk, Republic of Belarus, 220072

In the context of widespread use of artificial insemination using the semen of highly productive animals, there is a risk of spreading genetic defects in the population. Therefore, we have developed methods for DNA diagnostics of nineteen hereditary diseases of cattle, three diseases of pigs and two defects of horses. Using the developed methods, a study of farm animals (cows, pigs, horses) of Belarusian selection was conducted from 2008 to 2024. Analysis of the genetic structure of the Holstein breed showed that the frequency of occurrence of animals-carriers of mutant alleles on average for 2024 is: BYC – 3.03 %, HH1C – 2.48 %, HH3C – 3.13 %, HH4C – 0.45 %, HH5C – 2.45 %, HCD1.3 – 2.26 %, CVC – 2.36 %, BLC – 0.60 %, DPC – 0 %, XIC – 0.36 %, BC – 0 %. Diagnostics of Aberdeen Angus cattle showed the absence of animals-carriers of genetic defects in the studied sample: AMC – 0 %, MA – 0 %, DD – 0 %, DW – 0 %. The analysis of the genetic structure of pigs showed the following distribution of carrier animals: DMD (Landrace – 25.5 %, Yorkshire – 1.67 %, Duroc – 2.6 %, Belarusian Meat – 44.4 %, Large White – 5.7 %, Black-and-White – 33.3 %), RYR (Duroc – 2.27 %, Estonian Bacon

– 0 %, Pietrain – 50 %, Belarusian Meat – 0 %, Large White – 5.7 %, Yorkshire – 0 %, Black-and-White – 33.3 %, Landrace – 0 %.) ISTS (Large White, Duroc, Landrace, Yorkshire – 0 %). The absence of genetic defects of HIPPI, SCID was also shown in the studied sample of horses of the Belarusian Harness, Trakehner and Arabian breeds.

Keywords: DNA diagnostics, hereditary diseases, genetic defects, LoF mutations, mutant allele, cattle, pigs, horses

УДК 577.29

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО СТРЕССА НА НАСЛЕДУЕМУЮ ТРАНСПОЗИЦИЮ ЭЛЕМЕНТОВ *ONSEN* У *A. THALIANA*

Серганова М.А.^{1,2,a}, Меркулов П.Ю.¹, Ялтанская А.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: ^a melany02@mail.ru

Мобильные элементы играют огромную роль в геномах культурных растений, особенно LTR-ретротранспозонов, которые влияют на адаптивную эволюцию и могут вызывать мутации, способствующие появлению полезных сельскохозяйственных признаков. Исследования показывают, что активность транспозонов может увеличиваться в условиях стресса, однако их инсерционная активность ограничена механизмами РНК-интерференции и РНК-зависимым ДНК-метилированием. Моделью для изучения этих процессов служат элементы *ONSEN*, активирующиеся при тепловом стрессе у *Arabidopsis thaliana*. В данной работе использовался мутант *nprp1* для анализа влияния теплового стресса на транспозицию *ONSEN*, с учетом различных факторов. Результаты помогут понять механизмы появления инсерций мобильных элементов под воздействием стресса и могут быть применены для создания инсерционных коллекций растений.

Ключевые слова: мобильные элементы, ретротранспозоны, *ONSEN*, *A. thaliana*, тепловой стресс

Существенную часть генома большинства культурных растений составляют мобильные элементы (транспозоны), которые могут перемещаться и пролиферировать внутри генома, что может приводить к возникновению генов с новым функциональным значением. В геномах растений преобладают LTR-ретротранспозоны, чья активность оказала значительное влияние на адаптивную эволюцию растений [1]. Использование способности транспозонов к индукции мутаций открывает возможности для создания генетических и эпигенетических изменений, которые могут привести к появлению ценных сельскохозяйственных признаков [2].

Многочисленными исследованиями показана индуцибельность отдельных мобильных элементов в условиях биотического или абиотического стресса. Тем не менее, возникновение новых наследуемых инсерций транспозонов лимитирована РНК-интерференцией и РНК-зависимым ДНК-метилированием (RdDM – RNA-directed DNA methylation). Одной из удобных моделей для изучения мобилома растений и систем его контроля служат элементы семейства *ONSEN*, активирующиеся в ответ на тепловой стресс у растений *A. thaliana*. Так, серией

работ Ito и соавторов на мутанте *nprp1*, характеризующимся нарушением RdDM-пути, выявлена крайне повышенная инсерционная активность *ONSEN* в условиях теплового стресса [3]. Тем не менее, детальная связь параметров теплового стресса и количества возникающих в следствие него инсерций не изучены.

Для изучения влияния теплового стресса на транспозицию *ONSEN* у *A. thaliana* нами был использован мутант *nprp1*. Проростки разных возрастов были подвержены тепловому стрессу в различных вариантах. Так, проверяемые факторы, потенциально влияющие на число инсерций, включали в себя предварительную обработку холодным стрессом, продолжительность действия высоких температур, а также условия адаптации растений после теплового стресса. Для каждого из вариантов обработки нами были получены семена от трех индивидуальных растений и выращена популяция, использованная для анализа числа новых инсерций. Полученные данные позволят лучше понять влияние стрессовых условий на количество новых инсерций, которые могут быть переданы в потомство на примере *A. thaliana*. Кроме того, результаты исследования будут использованы для дальнейших работ в создании инсерционных

коллекций растений при помощи различных методов активации мобильных элементов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-10055.

Список литературы

1. LTR-retrotransposons in plants: Engines of evolution / L. Galindo-González, C. Mhiri, M.K. Deyholos, M.-A. Grandbastien // *Gene*. 2017. V. 626. PP. 14-25.

2. Chaudhary J., Deshmukh R., Sonah H. Mutagenesis Approaches and Their Role in Crop Improvement // *Plants (Basel)*. 2019. V. 8. № 11. P. 467.

3. A small RNA mediated regulation of a stress-activated retrotransposon and the tissue specific transposition during the reproductive period in *Arabidopsis* / Hidetaka Ito [et al.] // *Plant Science*. 2015. V. 6. № 48.

EFFECT OF HEAT STRESS CONDITIONS ON INHERITABLE TRANSPOSITION OF *ONSEN* ELEMENTS IN *A. THALIANA*

Serganova M.A.^{1,2}, Merkulov P.Y.¹, Yaltanskaya A.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 – MTAА, Timiryazevskay st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

Transposable elements play a huge role in the genomes of cultivated plants, especially LTR retrotransposons, which affect adaptive evolution and can cause mutations that contribute to the emergence of useful agricultural traits. Studies show that transposon activity can increase under stress conditions, but their insertional activity is limited by RNA interference and RNA-dependent DNA methylation mechanisms. *ONSEN* elements activated under heat stress in *Arabidopsis thaliana* serve as a model for studying these processes. In this work, the *nripd1* mutant was used to analyze the effect of heat stress on *ONSEN* transposition, taking into account various factors. The results will help to understand the mechanisms of the emergence of mobile element insertions under stress and can be used to create insertional collections of plants.

Keywords: *mobile elements, retrotransposons, ONSEN, A. thaliana, heat stress*

A significant part of the genome of most cultivated plants consist of mobile elements (transposons), which can move and proliferate within the genome, and then it can lead to the emergence of genes with a new functional significance. Plant genomes are dominated by LTR retrotransposons, whose activity has had a big impact on the adaptive evolution of plants [1]. Using the ability of transposons to induce mutations opens up opportunities for creating genetic and epigenetic changes that can lead to the emergence of valuable agricultural traits [2]. Numerous studies have shown the inducibility of individual mobile elements under biotic or abiotic stress. However, the emergence of new heritable transposon insertions is limited by RNA interference and RNA-directed DNA methylation (RdDM). One of the convenient models for studying the plant mobilome and its control systems are elements of the *ONSEN* family, activated in response to heat stress in *A. thaliana* plants. Thus, a series of studies by Ito et al. on the *nripd* mutant, characterized by a disruption of the RdDM pathway, revealed an extremely increased insertional

activity of *ONSEN* under heat stress [3]. However, the detailed relationship between heat stress parameters and the number of insertions resulting from it has not been studied. To study the effect of heat stress on *ONSEN* transposition in *A. thaliana*, we used the *nripd1* mutant. Seedlings of different ages were exposed to heat stress in different variants. Thus, the tested factors potentially affecting the number of insertions included preliminary treatment with cold stress, duration of high temperatures, and conditions of plant adaptation after heat stress. For each treatment variant, we obtained seeds from three individual plants and grew a population used to analyze the number of new insertions. The data obtained will allow us to better understand the effect of stress conditions on the number of new insertions that can be transmitted to the progeny using *A. thaliana* as an example. In addition, the results of the study will be used for further work in creating insertion collections of plants using various methods of activating mobile elements.

УДК 638.1

ПЧЕЛИНЫЙ МИКРОБИОМ: НЕВИДИМАЯ СИЛА, ПОДДЕРЖИВАЮЩАЯ ЖИЗНЬ

Смутин Д.В.^{1,2,а}, Тальдаев А.Х.^{2,3,4}, Данилов Л.Г.⁵, Лебедев Е.Е.², Адонин Л.С.^{3,6}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Факультет информационных технологий и программирования), 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, Российская Федерация

² Институт экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский государственный университет», 625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Ленина, д. 25, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича», 119121, г. Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр.8, Российская Федерация

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (Лаборатория старения и возрастных нейродегенеративных заболеваний), 141701, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 5, стр. КПМ, д. 204, Российская Федерация

⁵ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9, Российская Федерация

⁶ 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 корп. 1, Российская Федерация

e-mail: ^а dvsmutin@gmail.com

Ключевые слова: медоносная пчела *Apis mellifera*, метагеномное секвенирование, микробиомы улья, метаанализ

Суперорганизм улья не способен существовать без микроорганизмов, которые составляют его основу. Современная теория хологенома утверждает, что геномы всех взаимосвязанных организмов работают как единое целое. Микрофлора улья выполняет не только метаболические функции, но и реагирует на внешние воздействия, действуя как иммунная система в широком смысле. Почти все среды улья отличаются высокой стабильностью как в видовом, так и в количественном составе. Существуют как уникальные микроорганизмы для отдельных сред, так и те, что встречаются в нескольких источниках. Однако остается неясным, каким образом поддерживается стабильность микробиомов, какую роль играют различные представители и как происходит их передача между ульями.

Для решения этих вопросов был проведен метаанализ 736 образцов метагеномных секвенирований методом shotgun. Для устранения контаминаций использовались инструменты bowtie2 и MiniMap2. Таксономическая аннотация осуществлялась с помощью Kraken 2/Vgcrack и Kaiju на различных референсных базах, а также дополнительных классификаторов, обученных на их результатах с использованием линейных моделей для предсказания численностей. Обработка данных проводилась с применением языка программирования R и пакетов tidyverse, vegan, MMUPHi и других.

Более 98 % аннотированного разнообразия составляют бактерии, однако некоторые образцы содержат до 95 % неклассифицированных последовательностей, вероятно относящихся к эукариотам. В 15

видов бактерий были обнаружены во всех ульях, из них 9 являются специфичными для кишечного микробиома пчел и выявляются в других образцах как контаминации, а 2 встречаются во всех аэробных средах улья.

Наблюдается сукцессия сообществ: молодой мед и перга демонстрируют более высокое альфа-разнообразие по сравнению с другими средами улья. Микрофлора различных каст и сред значительно различается по показателям бета-разнообразия. Анализ PerMANOVA указывает на значительное влияние среды, сезона и рациона пчел на таксономический состав. При этом некоторые группы бактерий могут обитать в разных средах улья, тогда как другие показывают параллельную эволюцию с микроаллопатрическим видообразованием. Исследование сетей демонстрирует различные механизмы стабилизации изучаемых микробных сообществ и позволяет выявить несколько новых групп, способных выполнять функции иммунной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной научно-технологической программы развития генетических технологий на 2019–2027 годы (соглашение №075-15-2021-1345, Уникальный идентификатор проекта RF----193021X0012).

Список литературы

1. Schwarz R.S., Huang Q., Evans J.D. Hologenome theory and the honey bee pathosphere // Curr. Opin. Insect Sci. V. 10. PP. 1-7. doi: 10.1016/j.cois.2015.04.006.

2. Microbeeota: Honey Bee Normal Microbiota as a Part of Superorganism / D. Smutin [et al.] // Microorganisms. V. 10. № 12. P. 2359. doi: 10.3390/microorganisms10122359.

УДК 577.2

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНОМНЫХ И ПОСТГЕНОМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕЛЕКЦИИ СЕМЕНОВОДСТВА

Титаренко В.С.^а, Кротова О.Е.

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: ^а vika.titareenko2015@yandex.ru

В статье рассматриваются геномные и постгеномные технологии, их применение в сельском хозяйстве. Особое внимание уделяется улучшению качества и урожайности культурных растений, что имеет прямое отношение к решению проблем глобальной продовольственной безопасности. Генетические исследования сельскохозяйственных культур, в частности пшеницы, описываются как сложный и многосторонний процесс, в котором урожайность зависит от различных взаимодействий генетических и экологических факторов.

Ключевые слова: геномные технологии, семеноводство, зерно, пшеница, селекция

Геномные технологии – это набор технологий, применяемых в направлении изменения генетического состава клеток, транспортировки генов в целях создания новых организмов или улучшения свойств существующих.

Постгеномные технологии – это технологии, основанные на применении биотехнологий в аграрной и медицинской сферах. Они опираются на свойства живых организмов и продуктов их жизнедеятельности и могут применяться в диагностировании и лечении заболеваний, селекционном выращивании сельскохозяйственных культур.

Геномные и постгеномные технологии отражают новые принципы анализа живых систем на молекулярном уровне, отличающиеся высокой производительностью. В составе КТ отражены три основные тенденции развития этих технологий:

1) геномные технологии, базирующиеся на полимеразной цепной реакции, позволяющей размножать анализируемые молекулы до уровня чувствительности измерительных приборов;

2) протеомные технологии как представитель группы технологий, для которых аналог полимеразной цепной реакции отсутствует, что определяет необходимость увеличения чувствительности до уровня детектирования единичных молекул;

3) применение технологий биоинформатики в качестве интегрирующего начала для обобщения постгеномных данных в рамках моделей сравнительной геномики и системной биологии [1].

В Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков

сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия особое внимание уделено развитию селекции и семеноводства. Посев качественными семенами новых районированных сортов повышает урожайность на 15-20 % и более по сравнению нерайонированными старыми. Сортосмена и использование новых урожайных сортов и гибридов высоких репродукций дают значительный экономический эффект.

В растениеводстве геномная селекция используется в основном для предсказания урожая и связанных с ним признаков, например, массы тысячи зерен у ячменя, урожайности зеленой массы и урожайности зерна у кукурузы, урожая зерна, высота растений, содержания крахмала и общего содержания пентозанов у ржи, урожай зерна, высота растений, время цветения риса или урожай зерна у пшеницы [2].

В последние годы развитию селекции и семеноводства уделяется особое внимание. Для получения конкурентоспособных и создания новых сортов и гибридов, а также производства семян высших категорий. Основной из задач является сокращение зависимости от зарубежных семян и посадочного материала [3].

Пшеница является одной из основных сельскохозяйственных культур, обеспечивая около двадцати процентов от общего потребления калорий в мире. С момента появления генов «зеленой революции» произошло значительное увеличение урожайности. Однако для Великобритании, Европы и других стран в последнее десятилетие наблюдается снижение темпов генетического прироста урожайности, и она вышла на плато в некоторых зонах возделывания.

Кроме того, в связи с тем, что мировой спрос на пшеницу растет быстрее, чем темпы увеличения урожайности, существует реальная угроза продовольственной безопасности. Поэтому выявление, понимание и в конечном итоге, использование генов и аллелей, которые благотворно влияют на урожайность, являются основными целями селекционных программ пшеницы во всем мире.

Урожайность зерна пшеницы и зерновых в целом является полигенным и очень сложным признаком, который находится под влиянием экологических и генетических взаимодействий на всех стадиях роста растения. Для облегчения его изучения, урожайность, как правило, разбивают на три основных компонента, количество продуктивных стеблей на площадь поверхности почвы, количество зерен в колосе и масса тысячи зерен. Эти компоненты урожайности последовательно фиксируются в течение цикла роста, различаются с точки зрения их наследственности и не всегда положительно коррелируют с урожайностью. Масса тысячи зерен, как правило, обладает стабильным наследованием и может быть дополнительно разбита на отдельные компоненты, включая физические параметры (длина зерна, ширина, площадь) и характеристики наполнения зерна, которые также

находятся под независимым генетическим контролем. К ним относятся как скорость, так и продолжительность процесса налива зерна, причем последний обычно фенотипируется как продолжительность «green canopy» после колошения [2].

Список литературы

1. Афонина Н. Геномные, протеомные и постгеномные технологии [Электронный ресурс] // Образовательный портал «Справочник». 2022. URL https://spravochnick.ru/innovacionnyy_menedzhment/genomnye_proteomnye_i_postgenomnye_tehnologii/ (дата обращения: 03.07.2024).

2. Корзун В.Н. Разработка и применение геномных технологий для молекулярно-генетического картирования и прикладной селекции зерновых культур: дис... д-ра биол. наук: 06.01.05. СПб., 2021. 116 с.

3. Стимулирование развития селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур: отечественный и зарубежный опыт: аналитический обзор / А.П. Королькова [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 124 с.

PROSPECTS FOR THE USE OF GENOMIC AND POSTGENOMIC TECHNOLOGIES IN SEED BREEDING

Titarenko V.S., Krotova O.E.

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

The article discusses genomic and postgenomic technologies, their application in agriculture. Special attention is paid to improving the quality and yield of cultivated plants, which is directly related to solving the problems of global food security. Genetic research of agricultural crops, in particular wheat, is described as a complex and multifaceted process in which yields depend on various interactions of genetic and environmental factors.

Keywords: *genomic technologies, seed production, grain, wheat, breeding*

Genomic and postgenomic technologies are new directions in science and technology that allow you to change the genetic composition of cells, transport genes and create new organisms or improve the properties of existing ones.

Genomic technologies are based on a polymerase chain reaction, which allows the analyzed molecules to be multiplied to the level of sensitivity of measuring devices. This makes it possible to detect and measure specific molecules in biological systems.

Postgenomic technologies, in turn, are based on the application of biotechnologies in the agricultural and medical fields. They are based on the properties of living organisms and their waste products and can be used in the diagnosis and treatment of diseases, selective cultivation of crops.

In agriculture, genomic technologies are used for breeding and selective cultivation of new varieties and hybrids of crops. They allow you to predict the yield, the mass of a thousand grains, the yield of green mass and grain yield, as well as other signs.

Wheat is one of the main crops, providing about twenty percent of the total caloric intake in the world. However, in the last decade, there has been a decrease in the rate of genetic yield growth, and it has reached a plateau in some cultivation areas. To solve this problem, wheat-breeding programs around the world are aimed at identifying and using genes and alleles that have a beneficial effect on yield.

The yield of wheat and cereals in general is a polygenic and very complex trait, which is influenced by environmental and genetic interactions at all stages of plant growth. To facilitate its study, yield is usually

divided into three main components: the number of productive stems per soil surface area, the number of grains per ear and the mass of a thousand grains.

УДК 639.3.03:575

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПАРААМИНОБЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ (ПАБК) В ПОВЫШЕНИИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ОСЕТРА СИБИРСКОГО В УСЛОВИЯХ УЗВ

Торгашева Е.В.^{1,а}, Котов И.А.^{1,б}, Попов А.В.²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», Кафедра экологии и генетики, 625043, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Пирогова, д. 3, Российская Федерация

² Нижне-Обский филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Главное бассейновое управление по рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов», 625002, г. Тюмень, ул. Госпаровская, д. 2, корп. 2, Российская Федерация

e-mail:^а e.torgasheva@utmn.ru, ^б i.a.kotov@utmn.ru

В настоящее время сохранение генофондов ценных видов рыб (осетровых) на территории Российской Федерации осуществляется, в основном, за счет искусственного воспроизводства в условиях установок замкнутого водоснабжения (УЗВ). В связи с этим актуальным является вопрос о влиянии специфических условий УЗВ на стабильность хромосомного аппарата рыб и их выживаемость на ранних этапах онтогенеза. В работе изучено действие малых доз репарагена – парааминобензойной кислоты (ПАБК) на уровень хромосомной мутабельности и показатели жизнеспособности осетра сибирского *Acipenser baerii* (Brandt, 1869), выращиваемого с применением УЗВ.

Ключевые слова: осетр сибирский *Acipenser baerii*, парааминобензойная кислота (ПАБК), малые концентрации, установка замкнутого водоснабжения (УЗВ), выживаемость, хромосомный аппарат, репарагенный эффект

Введение

Повышение жизнеспособности рыб и создание благоприятных условий для их выращивания является одной из задач современной аквакультуры. Однако само выращивание в искусственных условиях от стадии икринки до взрослых производителей может сказываться на иммунитете и жизнестойкости рыбы, которая в будущем будет выпущена в природный водоем. Одним из методов повышения иммунитета и выживаемости гидробионтов является применение на рыбоводных предприятиях биологически активных веществ (БАВ), имеющих высокую физиологическую активность при достаточно небольших концентрациях [1]. Известен широкий спектр биологически активных веществ, различных по механизму действия и эффекту на живые организмы – это адаптогены, витамины, пробиотики и т.д. Особыми свойствами обладает парааминобензойная кислота – это соединение может репарировать повреждения генетического материала, вызываемые неблагоприятными факторами, такими как радиация, УФ-излучение, воздействие химических веществ [2, 3]. Изучению данного вещества посвящено множество работ по химическому мутагенезу, открытому академиком И.А. Рапопортом в 80-х годах XX века [4].

Целью работы являлась оценка эффективности действия растворов малых концентраций ПАБК (0.001 %; 0.0001 %; 0.00001 %) на икру осетра сибирского в условиях проживания в установках замкнутого водоснабжения. Предварительной гипотезой исследования являлось предположение о репарагенном действии ПАБК на хромосомный аппарат клеток зародышевой ткани, а также повышении выживаемости зародышей на чувствительных стадиях развития – оплодотворении, выходе предличинок и их переходе к экзогенному питанию.

Методика

Работы проводились на базе Абалакского экспериментального завода (Тюменская обл., Тобольский р-н, с. Абалак, п. Рыборазводный) в мае-июне 2023 года. По результатам весенней бонитировки для эксперимента были выделены 2 впервые нерестующие самки осетра с гонадами 4 стадии зрелости. Икру оплодотворяли спермой самцов одной и той же выборки. Общая масса икры – 1600 г. Инкубацию икры проводили в аппаратах Вейса. В ходе исследования было сформировано 3 опытные группы икры (0.001 %, 0.0001 % и 0.00001 % ПАБК) и 1 контрольная (не обрабатывалась ПАБК). Опытные варианты

выдерживали в растворах парааминобензойной кислоты перечисленных концентраций в течение 2 часов, затем растворы постепенно сливались, и все аппараты были переведены на прямой ток воды. Контроль влияния ПАБК оценивали с помощью распространенных рыбоводных показателей – процента оплодотворения (%), частоты встречаемости аномалий развития (%), выхода предличинок (%), перехода личинок к экзогенному питанию (%). Также с помощью цитогенетического анализа оценили действие ПАБК на зародыши осетра, находящиеся на стадии ранней бластулы. Достоверность различий с контролем проверяли с помощью t-критерия Стьюдента.

Результаты

Нерестовые мероприятия, выпавшие на летний период, характеризовались повышенной температурой воды в УЗВ (~18.06 °С), что повлекло за собой частичную гибель икры. Подсчет процента

оплодотворения (%) проводили от числа просмотренных икринок (табл. 1). Наибольший процент оплодотворения наблюдали в контроле. Отметим положительную динамику от обработки малыми концентрациями ПАБК в ряду 0.001 % – 0.0001 % – 0.00001 %. Необходимо отметить, что проба 0.001 % ПАБК характеризовалась тотальной смертью этого опытного варианта ввиду повышенного температурного режима во время инкубации и изначально низкого качества икры от второй самки осетра. Воздействие неблагоприятных факторов, возникающих в условиях рыбоводного предприятия – повышения температуры воды в бассейнах в летнее время, несоблюдения светового режима, недостаточной чистоты поступающей воды и, как следствие, вспышки заболеваемости инфекционными болезнями, приводит не только к элиминации икры, но и к ухудшению качества выживших эмбрионов. Это проявляется в возрастании числа аномально развивающихся и нежизнеспособных зародышей – «уродов».

Таблица 1

Процент оплодотворения осетра на ранних стадиях эмбрионального развития (%)

Вариант опыта	Просмотрено икринок, шт.	Процент оплодотворения, %
Контроль	1037	67.77±1.45
0.001 % ПАБК	1002	10.51±0.97*
0.0001 % ПАБК	884	45.55±1.68*Δ
0.00001 % ПАБК	780	59.27±1.76*Δ□

Примечание: в каждом варианте – 6 повторов. * – различия с контролем статистически достоверны ($p \leq 0.05$); Δ – различия с вариантом 0.001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$); □ – различия с вариантом 0.0001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$).

Процент встречаемости уродливых зародышей проводили на 29-30 стадии развития (стадиях приближения конца хвоста к сердцу и начала его пульсации). Среди аномалий визуально фиксировали следующие типы: безголовые зародыши, зародыши без

переднего и промежуточного мозга, развивающиеся только с дефектным хвостом. Отметим положительную тенденцию к снижению количества уродств в вариантах 0.001 % и 0.00001 % ПАБК в сравнении с контролем (табл. 2).

Таблица 2

Процент встречаемости уродливых зародышей осетра (%)

Вариант опыта	Рассмотрено икринок, шт.	Процент уродств, %
Контроль	361	12,47±1,73
0,001% ПАБК	341	1,47±0,65*
0,0001% ПАБК	372	13,98±1,79Δ
0,00001% ПАБК	377	7,43±1,35*Δ□

Примечание: в каждом варианте – 6 повторов. * – различия с контролем статистически достоверны ($p \leq 0.05$); Δ – различия с вариантом 0.001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$); □ – различия с вариантом 0.0001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$).

На стадии выхода предличинок стимулирующий эффект ПАБК не проявился в полной мере, т.к. наибольшее количество выживших предличинок наблюдалось в контрольных пробах. Однако при переходе личинок к экзогенному питанию наблюдали достоверное увеличение выживших личинок в

пробах 0.0001 % и 0.00001 % ПАБК, вследствие чего можно допустить мысль о положительном влиянии этих концентраций на стрессовом для рыб этапе перестройки пищеварительной системы и перехода к питанию экзогенным кормом. Вышеперечисленные показатели отражены в таблице 3.

Показатели выклева и перехода личинок на экзогенное питание

Вариант опыта	Количество живых икринок на 28-29 стадии развития, шт.	Количество предличинок, шт.	Выход предличинок, %	Доля личинок, перешедших на экзогенное питание, %
Контроль	20446	10700	51.94±0.48	84.25±0.35
0.001 % ПАБК	1682	700	41.62±1.86*	71.43±1.71*
0.0001 % ПАБК	17821	6400	46.57±0.62*Δ	91.25±0.35*Δ
0.00001 % ПАБК	13650	7400	41.13±0.57*□	90.88±0.33*Δ

Примечание: в каждом варианте – 2 повтора. * – различия с контролем статистически достоверны ($p \leq 0.05$); Δ – различия с вариантом 0.001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$); □ – различия с вариантом 0.0001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$).

Цитогенетический анализ

Наряду с исследованием икры с помощью рыболовных показателей качества было решено проанализировать ее цитогенетическую стабильность. Объем выборки для цитогенетического анализа

составил 40 зародышей осетра на стадии ранней бластулы. В ходе цитогенетического анализа выявлено преобладание нормальных митозов среди всех клеток делящейся ткани. Из различных типов хромосомных нарушений преобладали микроядра (табл. 4).

Таблица 4

Частота нормальных митозов у зародышей осетра, обработанных низкими концентрациями ПАБК

Вариант опыта	Просмотрено митозов, шт.	Число нормальных митозов, %	Средняя частота микроядер на 1 зародыш, %
Контроль	191	86.37±2.48	13.63±2.48
ПАБК 0.001 %	57	85.43±4.67	14.57±4.67
ПАБК 0.0001 %	118	76.33±3.91*	23.67±3.91*
ПАБК 0.00001 %	109	88.04±3.11Δ	11.82±3.09Δ

Примечание: в каждом варианте просмотрено по 10 зародышей. * – различия с контролем статистически достоверны ($p \leq 0.05$); Δ – различия с вариантом 0.0001 % ПАБК статистически достоверны ($p \leq 0.05$).

Предположительно, малые концентрации ПАБК (0.001 % и 0.00001 %) способны поддерживать уровень нормальных митозов, близкий к контрольным значениям. Учитывая тот факт, что икра во время инкубации находилась в неблагоприятных условиях повышенной температуры воды, поддержание средних показателей нормальных фаз митоза среди рассмотренных клеток в пробах, обработанных ПАБК, свидетельствует о ее репаративном действии на хромосомный аппарат осетра сибирского. В то же время проба 0.0001 % ПАБК характеризовалась достоверно большим значением средней частоты микроядер на 1 зародыш по отношению к контролю. В соответствии с данными литературных источников для осетра из природных водоемов не характерна высокая частота микроядер [5]. В связи с этим повышенное содержание таковых у осетра из УЗВ говорит о влиянии на хромосомный аппарат зародыша нестабильных условий выращивания, хотя уровень изменений микроядер может рассматриваться как адаптивная перестройка организма в искусственных условиях обитания.

Заключение

Обработка малыми концентрациями парааминобензойной кислоты икры осетра сибирского в условиях УЗВ показала положительный результат на

стадии ранней бластулы, 29-30 стадиях развития зародышей и переходе личинок к экзогенному питанию. В то же время эффективность действия данного соединения на стадии оплодотворения и выхода предличинок не характеризовалась достоверно высокими показателями. Авторы предполагают, что некое избирательное действие ПАБК на определенных стадиях развития объясняется ее адаптивным эффектом, позволяющим пройти стрессовый для зародыша период с небольшими потерями, а отсутствие положительного эффекта на других стадиях может говорить либо о неподходящей концентрации ПАБК, либо о в принципе высоких значениях элиминации зародышей на этих стадиях (делении зародышей, выходе предличинок). Малые концентрации ПАБК могут быть рекомендованы для использования при искусственном воспроизводстве осетра, однако для более полного рассмотрения механизма действия этого соединения и оценки его эффективности необходимы дополнительные исследования.

Список литературы

1. Применение биологически активных веществ для увеличения скорости роста позвоночных животных / Д.В. Кропачев, И.В. Моружи, Е.А. Старцева [и др.] // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016. №. 3. С. 47-54.

2. Влияние малых концентраций парааминобензойной кислоты на жизнеспособность чира *Coregonus nasus* (Pallas, 1776) на ранних стадиях онтогенеза / И.А. Котов, И.В. Пак, Л.Л. Сергиенко [и др.] // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 1. С. 111-119.

3. Жакина А.Х. Биологические свойства п-аминобензойной кислоты и ее производных // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия: Химическая. 2010. № 3(381). С. 25-30.

4. Рапопорт И.А. Значение генетически активных соединений в фенотипической реализации признаков и свойств // Химические мутагены и парааминобензойная кислота в повышении урожайности сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1989. С. 3-37.

5. Крюков В.И., Кочкарев П.В. Частота микроядер в клетках крови рыб пресных водоемов полуострова Таймыр // Образование, наука и производство. 2013. № 1(2). С. 35-37.

THE EFFECTIVENESS OF USING LOW CONCENTRATIONS OF PARA-AMINOBENZOIC ACID (PABA) IN INCREASING THE VIABILITY OF SIBERIAN STURGEON IN THE CONDITIONS OF RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEMS (RAS)

Torgasheva E.V.¹, Kotov I.A.¹, Popov A.V.²

¹University of Tyumen, Department of Ecology and Genetics, Pirogova str. 3, Tyumen, Tyumen region, Russian Federation, 625043

²Nizhne-Obzskiy Branch of the Federal State Budgetary Organization «The Main Basin Department for Fishery and Conservation of Water Biological Resources», Gosparovskaya str. 2, bldg. 2, Tyumen, Russian Federation, 625002

Presently, the conservation of gene pools of valuable fish species (sturgeons) in the Russian Federation is primarily achieved through the utilization of artificial reproduction in recirculating aquaculture systems (RAS). In light of the above, it is pertinent to examine the impact of specific conditions of RAS on the stability of the chromosome apparatus of fish and their survival rate at the early stages of ontogenesis. In this study, the impact of low doses of the repara-gen para-aminobenzoic acid (PABA) on the level of chromosomal mutability and viability indicators of the Siberian sturgeon *Acipenser baerii* (Brandt, 1869) cultivated with the use of RAS was investigated.

Keywords: *Siberian sturgeon Acipenser baerii, para-aminobenzoic acid (PABA), low concentrations, recirculating aquaculture system (RAS), survival rate, chromosomal apparatus, repara-genic effect*

УДК 636.32/.38.082.2

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В МОЛОЧНОМ ОВЦЕВОДСТВЕ

Фирсова А.М.^а, Корабейников Р.В., Евлагина Д.Д., Колосов С.Е.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», 356241, Ставропольский край, Шпаковский район, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49, Российская Федерация

e-mail: ^а anya-zinoveva_2001@mail.ru

Молочное овцеводство имеет значительное экономическое и социальное значение, особенно в регионах с развитым сельским хозяйством. Рост спроса на молочные продукты сигнализирует о необходимости повышения продуктивности и качества овечьего молока. Внедрение селекционно-генетических методов может существенно повысить удои и улучшить состав молока, что особенно важно в условиях возрастания конкуренции и необходимости экономической устойчивости хозяйств.

Ключевые слова: *овцы, гены, генетика, селекция*

Введение

Овцеводство играет важную роль в сельском хозяйстве страны. Высокое разнообразие продукции от овец обусловлено большим количеством пород. По

данным ФАО в мире насчитывается более 2300 пород овец разной продуктивности, в России – 41 [1].

К числу важнейших продуктивно-биологических характеристик овец относится молочная продуктивность. Мировое производство молока постоянно растет. Анализ литературных данных показывает, что молочная продуктивность овец привлекает все большее внимание общественности [2-5]. В связи с вышеизложенным, цель нашей работы – изучить и проанализировать применение селекционно-генетических методов в молочном овцеводстве.

Методы исследований

Для написания статьи была применена методика, основанная на анализе информационных данных,

собранных из разнообразных литературных источников и интернет-ресурсов, опубликованных за последние 10 лет.

Обсуждение и анализ результатов

Овечье молоко ценят за питательные характеристики как в свежем виде, так и в виде кисломолочных изделий, твердых и мягких сыров, йогуртов и других продуктов. Ежегодно в мире производится около 8.4 млн тонн овечьего молока. В пятерку лидеров на 2022 год по производству овечьего молока входят такие страны как: Китай, Турция, Греция, Сирия, Италия [6].

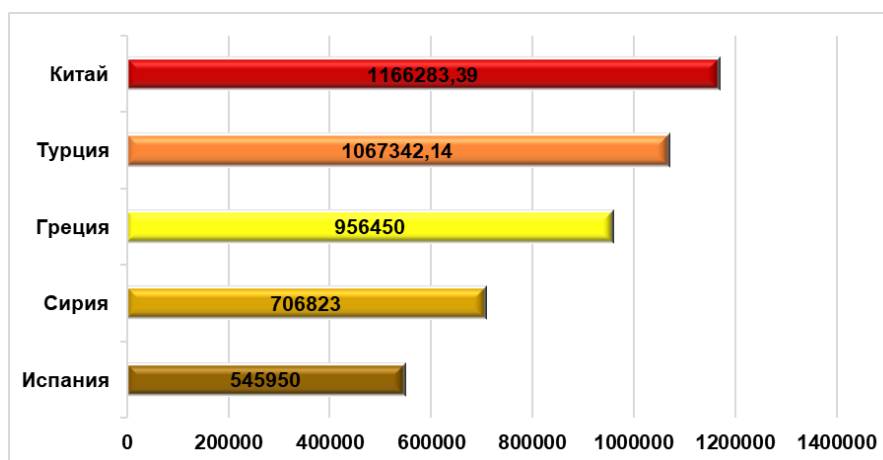


Рисунок 1. Мировые лидеры – производители овечьего молока (по данным ФАОСТАТ за 2022 год)

По данным ФАОСТАТ за 2022 год в Китае было произведено 1166283 тонн молока, что на 98941 тонн больше, чем в Турции, где объем производства составил 1067342 тонн. По данному показателю на третьем месте Греция (956450 тонн), что на 35.32 и 75.19 % больше в сравнении с продукцией, произведенной в Сирии (706823 тонн молока) и Испании (545950 тонн), соответственно [6].

Под молочной продуктивностью или молочностью подразумевается объем молока, который получают за определенный период времени: за лактацию, за месяц или за сутки. У специализированных молочных пород овец она значительно выше (800-1000 кг за лактацию) по сравнению с породами, ориентированными на мясо, шерсть (от 35 до 150 кг) [7]. Наиболее известные молочные породы овец были выведены

за рубежом (авасси, ассаф, восточно-фризская, лакон, манчега, сарда и хиос).

На территории Российской Федерации разводят овец пород: ассаф, восточно-фризская, лакон. Согласно данным Национального союза овцеводов, на 2022 год количество овец породы лакон составило 288 голов (численность других пород настолько мала, что их даже не выделяют в отдельную статистику). Говоря о породах овец, пригодных для производства молока в нашей стране, традиционно используются романовская, карачаевская, цыгайская, дагестанская горная [8].

В 2022 году численность овец дагестанской горной породы составила 262088 голов, что на 18.6 и 23.1 % выше в сравнении с 2020 и 2021 годами

Таблица 1

Численность овец разных пород (2020-2022 гг.)

Порода	2020	2021	2022
Лакон	-	316	288
Дагестанская горная	221068	212944	262088
Карачаевская	194115	145219	149465
Романовская	24751	14894	16166
Цыгайская	8821	10570	12567

Поголовье карачаевской породы в 2020 году насчитывало 194115 особей, но к 2021 году сократилось до 145219 голов, однако к 2022 году данный показатель вырос. Численность овец романовской породы в 2021 году снизилась на 9857 голов в сравнении с 2020 годом, а затем возросла до 16166 голов (2022 г.). Поголовье овец цигайской породы в 2022 году (12567 голов) увеличилось на 42.5 % по сравнению с 2020 годом [8].

Молоко – натуральный продукт, его состав (жир, белок) зависит от сезона, стадии лактации, породы, различных систем кормления и генетического разнообразия животных. Традиционно селекция мелких жвачных животных для эффективного производства мяса, молока и шерсти включала интрогрессию, внутривидовый отбор и скрещивание [9].

Молекулярные методы, основанные на ДНК-исследованиях, сделали возможным генотипирование животных любого возраста и пола, тем самым предоставляя потенциально более эффективный и гибкий инструмент отбора [10, 11]. Маркер-ассоциированная (marker-assisted selection, MAS) и геномная селекция (genomic selection, GS) является одним из перспективных приемов ускорения темпов совершенствования продуктивных качеств и прогнозирования племенной ценности сельскохозяйственных животных. Секвенирование генома овец и

разработка высокопроизводительных массивов SNP (Single Nucleotide Polymorphisms, однонуклеотидных полиморфизмов) произвели революцию в селекции животных [12]. Накоплен достаточно обширный экспериментальный материал по генотипической характеристике животных разных пород по SNP, их связи с молочной продуктивностью, качественным составом молока, его технологическими свойствами и сыропригодностью [10, 13, 14]. Более перспективным и информативным методом в последнее десятилетие признан полногеномный анализ ассоциаций (genome-wide association study, GWAS), поскольку применение GWAS позволяет получить достаточно широкий спектр данных о SNP [12].

В этой статье мы рассмотрим функции некоторых генов, которые контролируют производство овечьего молока, в том числе важную роль, которую они играют. В таких генов-маркеров продуктивности овец выделяют гены *SLC2A* (мембранный белок семейства транспортёров растворённых веществ), *CSN2* (β -казеин), *CSN3* (κ -казеин), *SCD* (кодирует фермент стеарил-КоА-десатуразу), *SODS2* (ген, кодирующий члена семейства STAT-индуцированных ингибиторов STAT, также известных как супрессоры цитокиновой сигнализации), *β -LG* (бета-лактоглобулин), *PPL* (пролактин) (табл. 2).

Таблица 2

Перспективные маркерные гены

Ген	Функция	Ссылка
<i>SLC2A</i>	Связан с синтезом молока и лактацией молока	[15, 16]
<i>CSN2</i>	Транспортировка кальция и фосфата в молоко для обеспечения достаточного количества кальция и фосфора для формирования костей у молодых ягнят и удовлетворения потребностей в аминокислотах.	[17, 18]
<i>CSN3</i>	Оказывает положительное влияние на время коагуляции и созревание сыра	[18]
<i>SCD</i>	Способствует образованию ненасыщенных жирных кислот	[19, 20]
<i>SODS2</i>	Работает как индикатор высокого SCC и мастита у молочных овец	[21-23]
β -LG	Участие в регуляции обмена фосфора в молочной железе и транспорте ретинола, жирных кислот в кишечнике	[24, 25]
<i>PPL</i>	Участвует в регуляции развития молочных желёз, иницировании и поддержании лактации, иммунной модуляции, осморегуляции и модификации поведения	[26, 27]

Данные исследования являются многообещающими, поскольку точное картирование QTL станет следующим важным шагом перед широким внедрением MAS/GS в селекцию сельскохозяйственных животных. Со временем современные инструменты селекции, такие как клонирование, трансгенез, редактирование генов и генотипирование микробиома, могут расширить генетическую изменчивость в каждом виде, что приведет к селекции для получения новых признаков и новых продуктов.

Заключение

Селекция и генетика животных играют ключевую роль в развитии сельского хозяйства. Последние десятилетия характеризуются активным изучением генома сельскохозяйственных животных. Геномные исследования позволяют узнавать больше о наследственности определенных признаков, что способствует более эффективному отбору особей для селекции. Взаимодействие селекции и генетики с другими науками, такими как физиология, биохимия и патология, позволяет глубже понимать механизмы наследственности и адаптации животных к различным условиям содержания. Такое междисциплинарное взаимодействие способствует эффективному

использованию генетического потенциала сельскохозяйственных животных и созданию пород нового поколения.

Список литературы

1. Ерохин А.И., Карасев Е.А., Ерохин С.А. Состояние, динамика и тенденции в развитии овцеводства в мире и в России // Овцы, козы, шерстяное дело. 2019. № 3. С. 3-6.

2. Молочная продуктивность овец казахской курдючной грубошерстной породы / Д.К. Ибраев, Г.К. Долдашева, И.Е. Мухаметжарова, А.Х. Мулдашева // Интернаука. 2020. № 39(168). С. 25-27.

3. Костылев М.Н., Барышева М.С. Оценка молочной продуктивности овец романовской породы // Аграрная наука на современном этапе: состояние, проблемы, перспективы: материалы II международной научно-практической конференции (Вологда - Молочное, 28 февраля 2019 года). Вологда - Молочное: Вологодский научный центр Российской академии наук, 2019. С. 92-98.

4. Баситов К.Т., Юлдашбаев Ю.А., Прманшаев М. Молочная продуктивность мясных пород овец разного происхождения на Юго-Востоке Казахстана // Овцы, козы, шерстяное дело. 2023. № 1. С. 28-29.

5. Уримбетов А.А., Бобокулов Н.А. Молочность каракульских овец окраски сур каракалпакского породного типа // Овцы, козы, шерстяное дело. 2022. № 1. С. 24-26. DOI 10.26897/2074-0840-2022-1-24-26.

6. ФАОСТАТ. Статистический отдел. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистическая база данных в области продовольствия и сельского хозяйства – Режим доступа: <http://www.fao.org/> поиск (дата обращения 13.03.2024).

7. Чамурлиев Н.Г., Филатов А.С. Продуктивные качества баранчиков волгоградской породы в зависимости от молочности их матерей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 3 (43). С. 123-129.

8. Ежегодник по племенной работе в овцеводстве и козоводстве в хозяйствах Российской Федерации Текст / М-во сел. Хоз-ва Российской Федерации, Департамент животноводства и племенного дела, Федеральное гос. Бюджетное научное учреждение «Всероссийский н.-и. Ин-т племенного дела» (ФГБНУ ВНИИплем), (Головной информ.-селекционный центр животноводства России); ред. Т.А. Мороз, 2023.

9. Алайчиев А.С. Молочность маток алайской полугрубошерстной породы и местной грубошерстной овцы в условиях чон-алайской долины // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. 2015. № 1(33). С. 73-74.

10. Поиск QTL и функциональных генов-кандидатов у овец как важный этап внедрения геномной селекции / Т.Е. Денискова, А.В. Доцев, С.Н. Петров,

Н.А. Зиновьева // Сборник докладов XIV международного биотехнологического форума «Росбиотех-2020» (Москва, 17–19 ноября 2020 года). М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, 2020. С. 174-175.

11. Analysis of candidate genes for growth and milk performance traits in the egyptian barki sheep / I. Abousoliman, H. Reyer, M. Oster, E. Muráni // Animals. 2020. V. 10(2). P. 197.

12. Маркер-ассоциированная и геномная селекция мясного скота / М.И. Селионова, Л.В. Евстафьева, Е.Н. Коновалова, Е.Н. Белая // Тимирязевский биологический журнал. 2023. № 2. С. 37-48.

13. Hu Z.L., Park C.A., Reesy J.M. Developmental progress and current status of the Animal QTLdb // Nucleic Acids Res. 2016. V. 44. PP. 827-833. doi: 10.1093/nar/gkv1233.

14. Ozmen O., Kul S. Identification of novel SNPs of ovine PRL gene and their association with milk production traits // Russian J. Genet. 2016. V. 52. PP. 977-984.

15. Transporters in the Mammary Gland Contribution to Presence of Nutrients and Drugs into Milk / A.M. Garcia-Lino, I. Alvarez-Fernandez, E. Blanco-Paniagua [et al.] // Nutrients. 2019. V. 11. P. 2372.

16. In silico mapping of quantitative trait loci (QTL) regulating the milk ionome in mice identifies a milk iron locus on chromosome 1. Mamm. / D.L. Hadsell, L.A. Hadsell, M. Rijnkels [et al.] // Genome. 2018. V. 29. PP. 632-655.

17. Casein (CSN) gene variants and parity affect the milk protein traits in crossbred (Bos taurus x Bos indicus) cows in sub-tropical climate / G. Mohan, A. Kumar, S.H. Khan [et al.] // Trop. Anim. Health Prod. 2021. V. 53. P. 289.

18. 5'-flanking variants of equine casein genes (CSN1S1, CSN1S2, CSN2, CSN3) and their relationship with gene expression and milk composition / J. Cieslak, L. Wodas, A. Borowska [et al.] // J. Appl. Genet. 2019. V. 60. PP. 71-78.

19. Suarez-Vega A., Gutierrez-Gil B., Arranz J.J. Transcriptome expression analysis of candidate milk genes affecting cheese-related traits in 2 sheep breeds // J. Dairy Sci. 2016. V. 99. PP. 6381-6390.

20. Comprehensive RNA-Seq profiling to evaluate lactating sheep mammary gland transcriptome / A. Suarez-Vega, B. Gutierrez-Gil, C. Klopp [et al.] // Sci. Data 2016. V. 3. P. 160051.

21. A Point Mutation in Suppressor of Cytokine Signalling 2 (Socs2) Increases the Susceptibility to Inflammation of the Mammary Gland while Associated with Higher Body Weight and Size and Higher Milk Production in a Sheep Model / R. Rupp, P. Senin, J. Sarry [et al.] // PLoS Genet. 2015. V. 11. P. e1005629.

22. Fujimoto M., Naka T. Regulation of cytokine signaling by SOCS family molecules // Trends Immunol. 2003. V. 24. PP. 659-666.

23. Effect of 17beta-estradiol on milk production, hormone secretion, and mammary gland gene expression in dairy cows / J.J. Tong, I.M. Thompson, X. Zhao [et al.] // J. Dairy Sci. 2018. V. 101. PP. 2588-2601.

24. Евлагина Д.Д., Селионова М.И. Связь генотипов по генам В-LG и PRL с молочной продуктивностью овец породы лакон, составом и выходом сыра // Зоотехния. 2022. № 4. С. 37-40. DOI 10.25708/ZT.2022.57.68.010.

25. Polymorphisms of α -lactalbumin, β -lactoglobulin and prolactin genes are highly associated with milk composition traits in Spanish Merino sheep /

P. Padilla, M. Izquierdo, M. Martínez-Trancón [et al.] // Livest. Sci. 2018. V. 217. P3. 26-29. doi: 10.1016/j.livsci.2018.09.012.

26. Евлагина Д.Д. Полиморфизм генов пролактина (PRL), бета-лактоглобулина (В-LG) овец породы лакон и их связь с молочной продуктивностью // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2021. Т. 7. № 4(28). С. 335-342. DOI 10.30914/2411-9687-2021-7-4-335-342.

27. Soares M.J. The prolactin and growth hormone families: pregnancy-specific hormones/cytokines at the maternal-fetal interface // Reproductive Biology and Endocrinology. 2004. V. 2. № 1. PP. 1-15.

APPLICATION OF BREEDING AND GENETIC METHODS IN DAIRY SHEEP BREEDING

Firsova A.M., Korobeynikov R.V., Evlagina D.D., Kolosov S.E.

North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, Nikonov str. 49, Mikhailovsk, Shpakovsky district, Stavropol Territory, Russian Federation, 356241

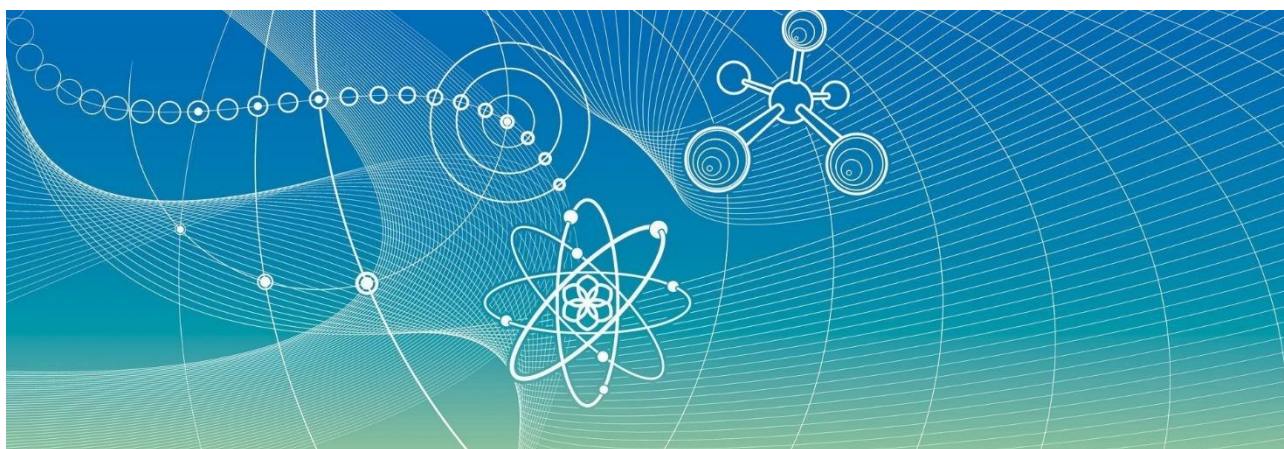
Dairy sheep farming is of significant economic and social importance, especially in regions with developed agriculture. The growing demand for dairy products signals the need to increase the productivity and quality of sheep's milk. The introduction of breeding and genetic methods can significantly increase milk yields and improve the composition of milk, which is especially important in conditions of increasing competition and the need for economic sustainability of farms.

Keywords: *sheep, genes, genetics, breeding*

Секция

РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ

RADIATION BIOLOGY



ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ МЕТАБОЛИЗМА РАДИОЙОДА У ДОЙНЫХ КОРОВ ПРИ ИЗБЫТКЕ И ДЕФИЦИТЕ СТАБИЛЬНОГО ЙОДА В РАЦИОНЕ

Басова М.А.^а, 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: ^а maribasova97@mail.ru*

В сфере обеспечения радиационной безопасности человека и животных особое место занимает разработка математических моделей, которые потом успешно применяются для различных расчетов и оценок. Нами была разработана камерная математическая модель метаболизма йода в организме дойных коров, которая позволит оценивать как дозу облучения животных при радиационных авариях, так и эффективность превентивных защитных мероприятий в животноводстве. В данной работе представлено биологическое обоснование структуры разработанной модели, а также показана значимость содержания нормального уровня стабильного изотопа йода в окружающей среде и рационе животных.

Ключевые слова: радиоактивный йод, радиационная безопасность, камерная модель, дойные коровы, щитовидная железа, метаболизм йода, стабильный йод в рационе, натрий-йодный симпортер, гормональный гомеостаз

Обеспечение радиационной безопасности является одной из важных задач в современное время. Одну из опасностей представляет загрязнение окружающей среды радиоактивными изотопами йода в результате аварий реакторного происхождения, оно оказывает негативное влияние на здоровье человека, сельскохозяйственных животных и качество животноводческой продукции. Значимыми аспектами обеспечения безопасности в сельском хозяйстве является разработка превентивных мероприятий по защите животных от облучения, оценка дозовой нагрузки на дойных коров при радиационных авариях, а также оценка эффективности йодной профилактики крупного рогатого скота. Для этого необходимо разработать математическую модель метаболизма йода в организме дойных коров, которая бы учитывала физиологические особенности животных, а также показала значимость уровня содержания стабильного йода в рационе.

В острый период радиационных аварий, также называемый периодом йодной опасности [1, 2], происходит загрязнение внешней среды короткоживущими изотопами йода, в частности пастбищной растительности, являющейся основным источником питания крупного рогатого скота. Попадая в организм коров, радиоактивный йод оказывает негативное воздействие на общее состояние здоровья животных, а также вызывает повышение содержания радионуклидов в молоке и молочных продуктах [3]. Анализ последствий аварии на Чернобыльской АЭС показывает, что степень радиационного воздействия изотопов йода на животных и человека зависит от содержания стабильного йода ¹²⁷I в окружающей среде и

рационе. Установлено, что в условиях йододефицита накопление радиоiodа в щитовидной железе дойных коров выше, чем у животных, чей рацион содержал оптимальное количество стабильного йода [4]. Также исследования показывают, что возможно снижение внутренней дозы облучения при помощи средств фармакологической защиты, таких как подкормки и специальные препараты, содержащие йод [5, 6].

Камерная модель метаболизма радиоактивного йода для дойных коров (рис. 1.) определялась на основании результатов исследований закономерностей метаболизма йода и обоснования транспортных коммуникаций радионуклидов в организме [7, 8]. Кинетика накопления и выведения нуклидов в органах и тканях дойных коров основывалась на результатах балансовых экспериментов, которые учитывали содержание стабильного йода в суточном рационе животных [5, 7, 9, 10].

Йод, поступающий в организм животных с пищей, водой и минеральными добавками распределяется неравномерно. Больше всего микроэлемент аккумулируется в щитовидной железе, т.к. необходим для производства гормонов. Поступая с кормом в организм, значительная доля йода всасывается в систему кровообращения непосредственно из пищеварительного тракта (в основном, в ротовой полости, сычуге и тонком отделе кишечника). Одной из особенностей метаболизма йода у крупного рогатого скота является рециклинг в сычуге, т.е. обратная циркуляция йода из кровеносного русла в содержимое ЖКТ [7]. Большая часть йодида, выделяемого в сычуг, реабсорбируется из кишечника обратно в кровеносное русло.

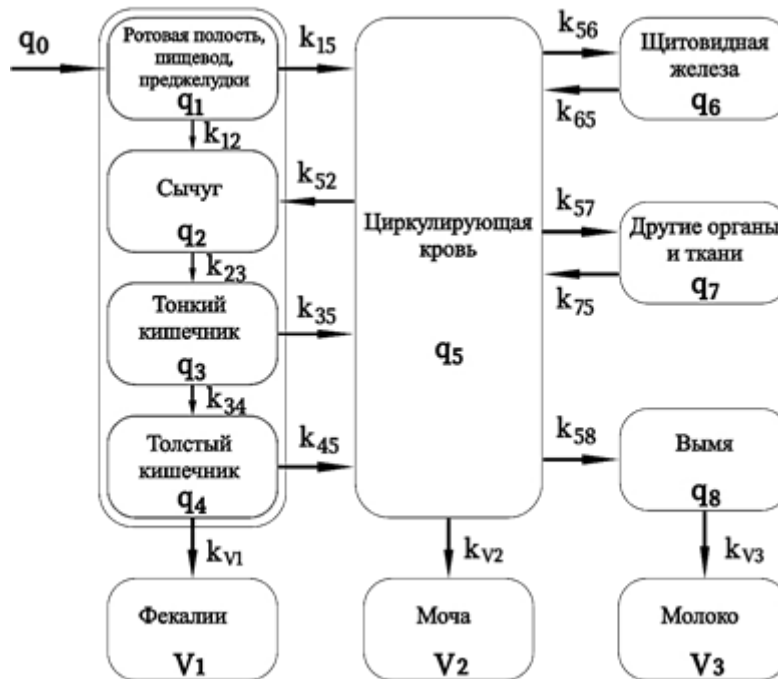


Рисунок 1. Камерная модель метаболизма радиоиода в организме дойных коров

Объяснение механизма рециклинга появилось сравнительно недавно, когда в организме млекопитающих, и в слизистой оболочке пищеварительного тракта, в частности, обнаружили транспортный белок натрий-йодный симпортер (NIS) [11, 12].

NIS – это трансмембранный белок, выполняющий транспортную функцию для доставки йода в фолликулярные клетки щитовидной железы. Переход йодида из плазмы крови в содержимое сычуга происходит благодаря активной экспрессии гена, отвечающего за продуцирование симпортера в слизистой сычуга. Можно предположить, что NIS играет важную роль в регуляции содержания и транспорта йодида, а также в обеспечении его баланса и сохранении гормонального гомеостаза организма.

Установлено, что высокое содержание стабильного йода в рационе (100 и 1000 мг/сут) не снижает значение параметра скорости рециклинга в сычуге (k_{52}), но эффективно блокирует поглощение йода щитовидной железой (k_{56}). Данная закономерность показывает, что коэффициент перехода йода из кровеносного русла в щитовидную железу существенно зависит от содержания в рационе животных стабильного изотопа йода.

Оценка оптимального уровня содержания йода в рационе дойных коров проводилась с учетом многолетнего зарубежного и отечественного опыта ведения животноводства. Принято, что суточный рацион, содержащий от 10 до 50 мг/сут стабильного йода, обеспечивает удовлетворительное состояние здоровья животных и их высокую продуктивность [10, 13]. При содержании йода в рационе в норме параметр k_{56} составляет от 0.62 [7] до 0.72 сут⁻¹ [14].

Предполагали, что в пределах этого диапазона основная роль в обеспечении гормонального гомеостаза принадлежит саморегуляции щитовидной железой процессов органификации йодида и секреции гормонов в ответ на изменение доступности йода. Принимали, что за пределами оптимального диапазона содержания стабильного йода, щитовидная железа адаптируется к дефициту ($D < 10$ мг/сут) или избытку ($D > 50$ мг/сут) его потребления за счет регулирования экспрессии гена, отвечающего за продуцирование интермембранного симпортера NIS, расположенного на базолатеральной мембране клеток железы.

Симпортер выполняет функцию транспортировки йода из циркулирующей крови в щитовидную железу, используя электрохимический градиент концентрации Na⁺, работающий за счет Na⁺/K⁺-АТФ-азы [15]. Полагали, что в условиях йододефицита (дефицит <10 мг/сут) происходит усиление, а в случае избытка йода (избыток >50 мг/сут) – подавление экспрессии гена, отвечающего за продуцирование NIS (эффект Вольфа-Чайкоффа [16]) при сохранении уровней гомеостаза щитовидной железы, соответствующих минимальному и максимальному приемлемым величинам содержания стабильного йода в суточном рационе.

В настоящей работе принимается гипотеза о том, что самоорганизация возможна лишь в тех системах, которые обладают возможностью стационарно существовать в нескольких состояниях [17]. В условиях длительного содержания животных при дефиците или избытке в рационе стабильного йода, по всей видимости, формируется диапазон содержания

стабильного йода, определенный возможностями самоуправления щитовидной железой биохимическими факторами при заданном среднем значении параметра переноса йодида из циркулирующей крови в щитовидную железу (K_{56}).

Список литературы

1. *Василенко И.Я.* Радиационная опасность радиоизотопов йода // Атомная энергия. 1987. Т. 62. Вып. 4. С. 245-248.

2. *Журавков В.В., Миронов В.П.* Радиационный риск для населения при «йодном ударе» в течение активной стадии аварии на Чернобыльской АЭС // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2005. С. 98-106.

3. Радиобиология. Радиационная безопасность сельскохозяйственных животных / Под ред. В.А. Бударкова и А.С. Зенкина. М.: БИБКМ, 2017. 440 с.

4. *Ястребков Ю.А.* Метаболизм радионуклидов в организме сельскохозяйственных животных // Ветеринарная патология. 2002. № 3. С. 35-47.

5. *Буров Н.И., Антипова Н.Н.* Влияние йодида калия на накопление ^{131}I в щитовидной железе коров и овец // В сб. Кинетика обмена, биологическое действие радиоактивных изотопов йода. М.: ИБФ МЗ СССР, 1989. С. 149-156.

6. *Спиридонов А.А., Мурашова Е.В., Кислова О.Ф.* Обогащение йодом продукции животноводства. Нормы и Технологии. Санкт-Петербург: Техгеосервис, 2014. 105 с.

7. *Miller J.K., Swanson E.W., Spalding G.E.* Iodine Absorption, Excretion, Recycling, and Tissue Distribution in the Dairy Cow // Journal of Dairy Science. 1975. V. 58. №10. PP. 1578-1593.

8. *Корнеев Н.А., Сироткин А.Н.* Основы радиэкологии сельскохозяйственных животных. М.: Энергоатомиздат, 1987.

9. 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.

10. *Voigt G., Kiefer P.* Stable and radioiodine concentrations in cow milk: dependence on iodine intake // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. V. 98. PP. 218-227.

11. *Dai G., Levy O., Carrasco N.* Cloning and characterization of the thyroid iodide transporter // Nature. 1996. V. 379. PP. 458-460.

12. *Spitzweg Ch., Morris J.C.* Sodium Iodide Symporter (NIS) and Thyroid // Hormones. 2002. V. 1(1). PP. 22-34.

13. Коррекция йоддефицитного состояния у высокопродуктивных коров с применением кормовой добавки «Йоддар» / *Н.А. Верещак, О.В. Соколова, А.И. Белоусов, А.С. Красноперов* // Аграрный вестник Урала. 2012. № 10. С. 12-14.

14. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 / *J.G. Smith, J.R. Simmonds.* HPA-RPD-058. Chilton: Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, 2009. 295 p.

15. *Leggett R.W.A* Physiological Systems Model for Iodine for Use in Radiation Protection // Radiation Research. 2010. V. 174. PP. 496-516.; ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4). 486 P.

16. *Трошина Е.А.* К вопросу о недостатке и избытке йода в организме человека // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2010. Т. 6. № 4. С. 9-16.

17. *Атауллаханов Ф.И., Мельник К.С., Бутылин А.А.* Самоорганизация системы с несколькими состояниями равновесия // Биофизика. 2013. Т. 58. Вып. 1. С. 149-158.

FEATURES OF THE KINETICS OF RADIOIODINE METABOLISM IN DAIRY COWS WITH EXCESS AND DEFICIENCY OF STABLE IODINE IN THE DIET

Basova M.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

In the field of ensuring radiation safety for humans and animals, special attention paid to the development of mathematical models that are then used successfully for various calculations and estimations. We have developed a compartment mathematical model of iodine metabolism in dairy cows, which allows us to estimate both the radiation doses of animals in radiation accidents and the effectiveness of protective measures in animal husbandry. This paper provides a biological justification for the structure of this model and demonstrates the importance of maintaining a normal level of stable iodine isotope in the environment and diet of animals.

Keywords: radioactive iodine, radiation safety, compartment model, dairy cows, thyroid gland, iodine metabolism, stable iodine in the diet, sodium-iodide symporter, hormonal homeostasis

УДК 577.121: 633.88:614.876

ОСОБЕННОСТИ МЕТАБОЛОМА *ACHILLEA MILLEFOLIUM* ИЗ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

Битаршвили С.В.^{1,а}, Волкова П.Ю.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 Независимый исследователь, 2440, г. Гел, Бельгия
e-mail: ^а bitarishvili.s@gmail.com

Используя нецелевой метаболомный подход, были исследованы метаболические профили растений *Achillea millefolium* L. из Чернобыльской зоны отчуждения. Выявлены изменения в путях биосинтеза аминокислот (аргинин, глицин, серин, треонин и пролин) и содержания метаболитов, связанных с мобилизацией азота, реакцией клеточной стенки на повреждение, эффективностью фотосинтеза и защитными реакциями, у растений с загрязненных участков. Наши результаты предполагают, что эти изменения могут быть вовлечены в адаптивные стратегии растения *A. millefolium* в ответ на хроническое радиационное воздействие.

Ключевые слова: абиотический стресс; низкие дозы; ГХ-МС; аминокислоты; адаптация

Загрязнение окружающей среды радионуклидами из-за радиационных аварий может оказывать негативное воздействие на растения на протяжении многих поколений из-за больших масштабов загрязнения и длительного периода полураспада радионуклидов. Чернобыльская зона отчуждения, регион, глубоко пострадавший от аварии 1986 года, стала естественной лабораторией для изучения воздействия хронического низкодозового радиационного воздействия на биологические системы. Для поддержания гомеостаза в условиях повышенного уровня радиации, растения выработали сложные адаптивные стратегии, включая изменения в сигнальных каскадах и метаболических путях. Метаболомный анализ растений позволяет выявлять метаболические перестройки и раскрывать механизмы адаптации в ответ на изменения окружающей среды [1].

Achillea millefolium – одно из старейших известных многолетних лекарственных растений, представляет большой интерес для фармакологии из-за своей способности синтезировать и накапливать широкий спектр вторичных метаболитов с потенциалом для открытия новых лекарственных средств [2]. Широкое экологическое распространение и потенциальное научное и промышленное использование были одними из ключевых факторов при выборе объекта исследования.

В текущем исследовании было проведено метаболическое профилирование растений *A. millefolium*, произрастающих на радиоактивно загрязненной территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС,

для выявления основных метаболических адаптивных реакций на хроническое воздействие радиации.

Материалы и методы

Пробоотбор был проведен в июне 2021 года на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в Гомельской области Республики Беларусь, в 30-километровой зоне отчуждения. Листья растений *A. millefolium* отбирали с двух контрольных участков Ломыш и Бабчин с фоновым уровнем радиации (0.3 мкЗв/ч) и трех загрязненных – Масаны, Кулажин и Радин, характеризующимися высокими уровнями радиоактивного загрязнения (3-7 мкЗв/ч). Сразу после отбора растения фиксировали в жидком азоте и впоследствии лиофилизировали.

Метаболомный анализ был проведен при помощи метода газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на приборе Agilent 7890A с масс-спектрометрическим модулем Agilent 5975C. Методические подробности экстракции метаболитов, дериватизации и ГХ-МС анализа описаны ранее [3]. Разделение метаболитов осуществлялось на капиллярной колонке Rxi-5SilMS, Restek (Agilent, США).

Обработка данных ГХ-МС анализа проведена с помощью программы AMDIS 32 и библиотек NIST20, GOLM, MONA и IN-HOUSE. Статистический анализ и визуализация данных осуществлен с помощью веб-платформы Metaboanalyst 6.0 с использованием подходов мультивариантной статистики и иерархической кластеризации.

Результаты

В результате ГХ-МС анализа было выявлено около 750 соединений, после предварительной фильтрации, основанного на проверке качества определения, для дальнейшего исследования оставили 185 метаболитов.

Для выявления взаимосвязи между метаболитами в образцах и разделения между экспериментальными группами провели дискриминантный анализ с использованием метода частичных наименьших квадратов (PLS-DA). Наиболее значимые метаболиты, участвовавшие в разделении групп, были

идентифицированы на основе переменной, важной в проекции (VIP) > 1.5. Первый и второй компоненты в PLS-DA, объясняющие 34.2 % вариации в 18 образцах, и 20 основных метаболитов, вносящих вклад в разделение по первой компоненте представлены на рисунке 1.

Первая компонента показывает, что контрольные образцы частично перекрывались с образцами из Кулажина, но кластеризовались отдельно от образцов из Масанов и Радина (рис. 1А). Наибольший вклад в разделение вносили N-метил-транс-4-гидрокси-L-пролин, фитол, изотиоцианоэтилфосфат и 23 других метаболита с VIP > 1.5 (рис. 1Б).

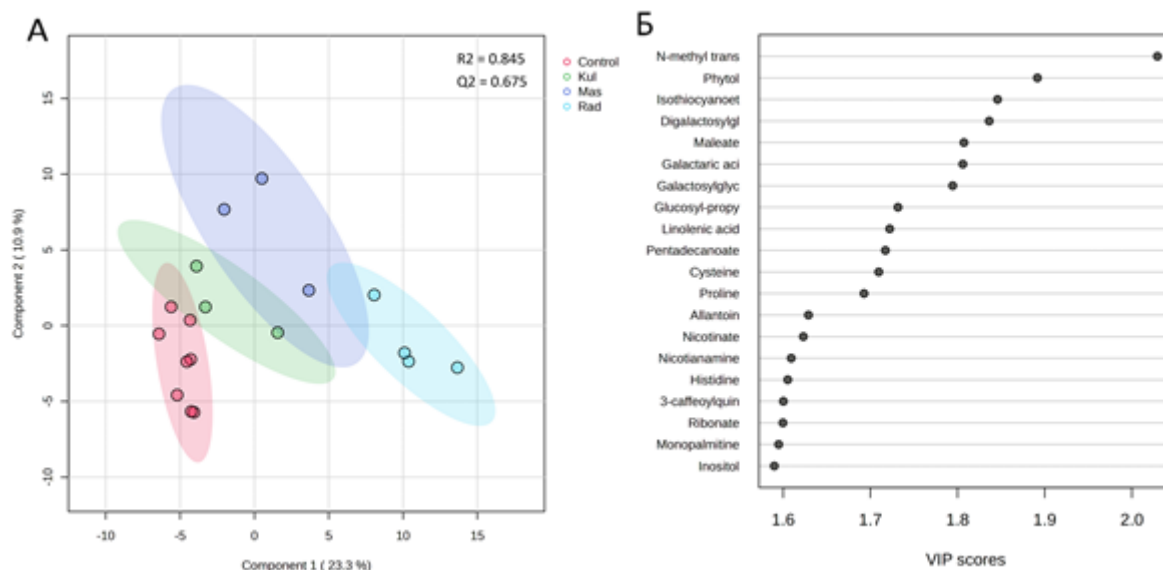


Рисунок 1. А – График счетов дискриминантного анализа с использованием метода частичных наименьших квадратов (PLS-DA) для метаболомных данных *A. millefolium* из контрольных (Control – Ломыш+Бабчин) и радиоактивно загрязненных участков (Кулажин – Kul, Масаны – Mas, Радин – Rad).

Б – Метаболиты, вносящие наибольший вклад в разделение по первой компоненте (VIP) > 1.5

Для выявления метаболитов, изменение концентраций которых были связаны с радионуклидным загрязнением на участках, был проведен однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA). Значимые различия между индивидуальными средними определялись с помощью теста парного сравнения Фишера (LSD) при 5 %-ном доверительном уровне. Согласно анализу, концентрации 30 метаболитов в образцах *A. millefolium* были вовлечены в ответ на хроническое радиационное воздействие. Эти метаболиты были ассоциированы с мобилизацией азота, реакцией клеточной стенки на повреждение,

эффективностью фотосинтеза и различными защитными реакциями.

После идентификации значимых метаболитов (one-way ANOVA) их идентификационные номера Кинотской энциклопедии генов и геномов (KEGG) были использованы для анализа путей в MetaboAnalyst 6.0 с использованием библиотеки *Arabidopsis thaliana* в качестве эталона. Показано, что у растений *A. millefolium* с загрязненных радионуклидами участков изменены метаболические пути, включая биосинтез аргинина, метаболизм аргинина и пролина, а также метаболизм глицина, серина и треонина (рис. 2).

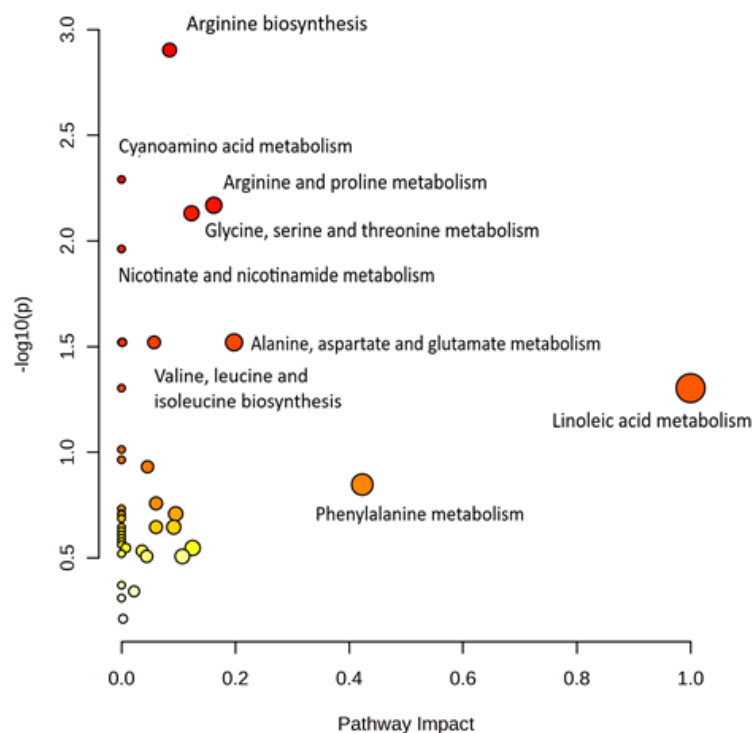


Рисунок 2. Метаболические пути, вовлеченные в ответ на хроническое радиационное воздействие. Ось абсцисс представляет вклад метаболического пути на основе топологического анализа, а ось ординат представляет собой $-\log$ значения p , полученного из анализа обогащения путей

Настоящее исследование дает ценную информацию о метаболических перестройках растений *A. millefolium*, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях. Выявлены ключевые метаболиты и метаболические пути, которые могут быть связаны с адаптивными механизмами растений в ответ на хроническое низкодозовое радиационное воздействие. Результаты, полученные в ходе настоящего исследования, способствуют пониманию механизмов адаптации растений к изменяющимся условиям окружающей среды и разработке культур с повышенной устойчивостью к абиотическому стрессу.

Исследование проведено при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-74-10004 «Адаптивные реакции травянистых растений на ионизирующее излучение: в поиске кандидатных молекул устойчивости к абиотическим стрессорам».

Список литературы

1. Plant Metabolomics: An Overview of the Role of Primary and Secondary Metabolites against Different Environmental Stress Factors / U. Salam, S. Ullah, Z.H. Tan [et al.] // Life (Basel). 2023. V. 13. P. 706. <https://doi.org/10.3390/life13030706>.
2. Ali S.I., Gopalakrishnan B., Venkatesalu V. Pharmacognosy, Phytochemistry and Pharmacological Properties of *Achillea millefolium* L.: A Review // Phytotherapy Research. 2017. V. 31. PP. 1140-1161. <https://doi.org/10.1002/ptr.5840>.
3. Fiehn O. Metabolite profiling in Arabidopsis // Methods in Molecular Biology. 2006. V. 323. PP. 439-447. <https://doi.org/10.1385/1-59745-003-0:439>.

ACHILLEA MILLEFOLIUM METABOLOME FROM THE CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

Bitarishvili S.V.¹, Volkova P.Yu.²

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

Using an untargeted metabolomics approach, the metabolic profiles of *Achillea millefolium* L. plants from the Chernobyl exclusion zone were investigated. Changes in amino acid biosynthetic pathways (arginine, glycine, serine, threonine, and proline) and the content of metabolites related to nitrogen mobilization, cell wall response to injury, photosynthetic efficiency, and defense responses were identified in plants from contaminated plots. Our results suggest that these changes may be involved in the adaptive strategies of *A. millefolium* in response to chronic radiation exposure.

Keywords: *abiotic stress; low doses; GC-MS; amino acids; adaptation*

УДК 614.876:579.636.92

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-БИОЛОГИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ НА КРОЛИКАХ

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

Моделирование радиационно-биологического поражения проводили на кроликах живой массой 2.8-3.4 кг. В качестве радиационного фактора использовали внешнее гамма-облучение, которое проводили на установке «Пума» с мощностью экспозиционной дозы 2.36×10^{-5} А/кг. В качестве модели биологического агента для воспроизведения экспериментального биологического поражения использовали возбудитель пастереллеза *Pasteurella multocida*, как один из наиболее часто встречающихся патогенных агентов. Экспериментально установлено, что гамма-облучение кроликов в дозе 8.0 Гр с последующим заражением пастереллами в дозе 4.5×10^3 м.к./кг, отягощало течение пастереллезного процесса, способствовало его генерализации и ускорило гибель животных.

Ключевые слова: *гамма-облучение, пастереллез, кролики, моделирование, радиационно-биологическое поражение*

Все более широкое использование источников ионизирующих излучений в промышленности, сельском хозяйстве, науке и практическом здравоохранении, а также техногенные выбросы радиоактивных веществ в окружающую среду при авариях на атомных объектах повышает актуальность проблемы экологической безопасности. Ситуация осложняется распространением в окружающей среде ксенобиотиков (тяжелых металлов, диоксинов, гербицидов, пестицидов и т.д.) и биологических агентов (вирусов, бактерий, паразитов, грибов) в результате интенсификации сельского хозяйства. Вышеуказанные факторы увеличивают вероятность возникновения как изолированных, так и комбинированных поражений сельскохозяйственных животных ионизирующим излучением, химическими и биологическими агентами [1, 2, 5, 6].

Комбинированные радиационные поражения – сочетание лучевых и не лучевых факторов при одновременном или последовательном их воздействии характеризуются взаимным влиянием на организм и отличаются по своему течению и исходам от изолированных поражений теми же факторами. При этом в результате усиления эффекта поражения заболевание приобретает качественно новые признаки. Так, дозы облучения, приводящие обычно к развитию лучевой болезни легкой степени, при комбинации с биологическими или химическими агентами

вызывают лучевую болезнь средней степени тяжести с сокращением продолжительности скрытого периода [3, 4, 9].

В связи с изложенным, одновременное действия на организм двух экологических факторов – гамма-облучения и возбудителя пастереллеза является актуальной задачей радиобиологии и имеет научное и практическое значение. Соответственно, целью нашего исследования явилось моделирование радиационно-биологического поражения организма животных.

В раннее проведенных исследованиях в опытах по титрованию доз на белых мышах нами было показано, что характер течения, форма болезни, исход и выживаемость пораженных двумя различными экологическими факторами животных (КРБП) зависят от дозы поражающих агентов, их сочетания и времени после их комбинированного воздействия на организм. При этом установлено, что комбинированное двухфакторное радиационно-пастереллезное поражение носило дозозависимый характер и проходило в сверхострой, острой и подострой формах. Комбинированное радиационно-пастереллезное поражение в сверхострой форме наблюдалось при сочетанном воздействии на организм возбудителя пастереллеза в дозах от 3ЛД_{50} до 10ЛД_{50} и гамма-лучей в дозах $\text{ЛД}_{100/30}$, $\text{ЛД}_{70/30}$, $\text{ЛД}_{50/30}$ Гр, соответственно. Острая форма пастереллеза белых мышей наблюдалась при

сочетанном воздействии на организм возбудителя пастереллеза в дозах 1ЛД₅₀ (4.5×10^5 м.к.) и 2ЛД₅₀ (9.0×10^5 м.к.) в сочетании с гамма-облучением в дозах ЛД_{10/30} (1.7 Гр) и ЛД_{30/30} (3.9 Гр). Таким образом, в опытах на белых мышах по определению оптимальных доз поражающих агентов (гамма-лучей и возбудителя пастереллеза) для воспроизведения комбинированного двухфакторного радиационно-биологического (пастереллезного) поражения организма установлено, что минимальные дозы гамма-лучей и возбудителя пастереллеза составляют ЛД_{50/30} (6.0 Гр) и 1ЛД₅₀ (4.5×10^5 м.к.) и 2ЛД₅₀ (9.0×10^5 м.к.), соответственно, при которой развивается пастереллезная инфекция и лучевая болезнь в острой форме с гибелью всех животных, в основном, на первый и второй дни после комбинированного воздействия поражающих агентов [7, 8].

После определения эффективной заражающей дозы тест-штамма пастерелл (ЛД_{50/14} = 4.5×10^5 м.к./кг), установления минимальных поражающих доз одновременно действующих агентов (ЛД_{50/14} пастерелл = 4.5×10^5 м.к./кг и ЛД_{50/30} гамма-лучей для кроликов = 8.0 Гр), на третьем этапе работы проводили моделирование радиационного, пастереллезного и радиационно-пастереллезного поражения организма.

В качестве биологической модели для воспроизведения ОЛБ, пастереллезной инфекции и радиационно-пастереллезного поражения использовали взрослых кроликов породы «Шиншилла» обоего пола живой массой 2.8-3.4 кг. В качестве заражающего агента использовали вышеуказанный изолят *P. multocida* штамм «ПП» с оттитрованной вирулентностью в дозе ЛД_{50/14} = 4.5×10^5 м.к./кг, а в качестве радиационного фактора – гамма-лучи ¹³⁷Cs радиационной установки «Пума» с мощностью экспозиционной дозы 2.36×10^{-5} А/кг.

В опытах использовали 25 кроликов, которые были разделены на 4 группы по 5 голов в 1-й, 2-й и 4-й группах и 10 голов в 3-й. При этом животные 1-й группы были подвергнуты радиационному воздействию гамма-лучей в полудетальной дозе (8.0 Гр), 2-й – изолированному воздействию возбудителя пастереллеза в полудетальной дозе (4.5×10^5 м.к./кг). Животных 3-й группы подвергали радиационному поражению и заражению культурой *P. multocida*, кроликов 4-й группы – облучению и заражению не подвергали – они служили биологическим контролем.

Радиационное поражение организма осуществляли путем облучения 10 кроликов на гамма-установке «Пума» в полудетальной дозе для животных этого вида – 8.0 Гр и сразу же после облучения животных заражали вирулентным штаммом возбудителя пастереллеза путем подкожного введения 0.3 см^3 18-24-часовой бульонной культуры пастерелл в заранее оттитрованной дозе – 4.5×10^5 микробных клеток на кг (ЛД_{50/14}).

За животными вели наблюдение в течение 30 дней, изучая клинику проявления ОЛБ, пастереллеза и радиационно-пастереллезного поражения,

характер течения и исход болезни. В динамике изучали гематологические показатели (содержание форменных элементов периферической крови, уровень гемоглобина, гематокрита), а также патологоанатомические изменения в органах и тканях павших животных.

Кровь для исследований брали на 3, 7, 10, 21, 28 сут после радиационно-биологического поражения.

Результаты динамических наблюдений за облученными (1-я группа), зараженными пастереллами (2-я группа) и облученными и зараженными пастереллами (3-я группа) кроликами показали, что течение ОЛБ, пастереллеза и радиационного поражения организма на фоне пастереллезной инфекцией имели существенные различия в зависимости от вида воздействия патологических агентов. Та же закономерность прослеживалась в результатах гематологических показателей крови.

Острая лучевая болезнь у облученных в ЛД_{50/30} кроликов вначале протекала без ярко выраженных клинических признаков. Скрытый период длился 10 дней. В период со 2 по 5 дни в периферической крови регистрировали выраженную лимфо- и лейкопению, показатели которых наиболее выраженными были на 10 сут: количество лимфоцитов – $35.44 \pm 0.61 \%$ ($p < 0.001$) против $49.14 \pm 1.52 \%$ в контроле, лейкоцитов – $5.93 \pm 0.26 \times 10^9/\text{л}$ ($p < 0.001$) против $9.10 \pm 0.12 \times 10^9/\text{л}$ в контроле. Разгар лучевой болезни начинался постепенно. В этот период наблюдали частичный отказ от корма, гиперемию и болезненность кожных покровов, анемию видимых слизистых оболочек, иногда с кровоизлияниями. У отдельных животных периодически отмечали диарею с незначительной примесью слизи в кале. Отмечали резко выраженную лейкопению. Указанные поражения системы крови, пищеварительного и респираторного тракта у отдельных животных прогрессировали, часть облученных (2 кролика из 5 облученных) погибла от ОЛБ на 23 и на 25 дни после облучения.

Течение пастереллезной инфекции животных 2-й группы, зараженных *P. multocida* в дозе ЛД_{50/14}, проходило в подострой форме и характеризовалось более медленным развитием признаков фибринозной пневмонии. С первых дней после появления клинических признаков болезни в крови кроликов происходило значительное увеличение общего числа лейкоцитов. С десятого дня количество лейкоцитов начало быстро снижаться, достигнув минимальных значений на 28 сут после заражения. Процентное содержание лимфоцитов в первый день после появления клинических признаков пастереллеза резко увеличилось, оставаясь на этом уровне в течение всего опыта, в то время как число нейтрофилов в первый день снизилось и оставалось на этом уровне до 28 сут болезни. Количество моноцитов также увеличилось в первый день заболевания, оставалось на высоком уровне, на всем протяжении опыта.

Появлялась болезненность грудной клетки при пальпации, тип дыхания – брюшной. Болезнь сопровождалась сильным болезненным кашлем, серозным

или слизистым истечением из носа, часто с примесью крови, нередко конъюнктивитом, кровоизлияниями на коже, явлениями диспепсии (запор или понос). Температура тела – в пределах до 41.0-41.5 °С. При нарастающих признаках сердечной слабости и затруднениями дыхания часть животных (3 из 5) погибла через 26-28 дней.

При патологоанатомическом вскрытии трупов павших животных обнаруживали фибринозную пневмонию, гепатизацию и мраморность легочной ткани, катаральный гастроэнтероколит.

Течение острой лучевой болезни и пастереллезной инфекции у кроликов, облученных в дозе 8.0 Гр и зараженных возбудителем пастереллеза в дозе 4.5×10^5 м.к./кг проходило в острой грудной форме. При этом состояние животных было угнетенное, наблюдалась адинамия, животные больше лежали, поднимались неохотно, пульс учащенный, слизистые оболочки глаз желтоватого цвета, слизистые оболочки носа, ротовой полости красноватые, сухие; отмечали отказ от корма, повышенную жажду, учащенное и затрудненное дыхание. Температура повышалась до 41-42 °С, в области глотки и шеи отмечали отеки из-за развития фарингита. Появлялась красновато-синюшная окраска кожи ушей. Иногда появлялся сильный кашель, запор, часто сменяющийся поносом с примесью крови или слизи. Вскоре после облучения в периферической крови устанавливали кратковременный лейкоцитоз со сдвигом влево, гиперсегментированные формы нейтрофилов. Уже через 1-1.5 ч после облучения и заражения лейкоцитоз сменялся прогрессирующей лейкопенией, в первую очередь, за счет лимфоцитов.

Острая лучевая болезнь на фоне пастереллезной инфекции протекала быстро, животные погибали на 2-13 сут (1 кролик на 2 сут, 2 на 3 сут, 2 на 4 сут и по 1 кролику на 5, 6, 11, 12, 13 сут) после начала заболевания при средней продолжительности жизни (СПЖ) 6.3 суток.

При вскрытии трупов животных, павших от острого течения радиационно-пастереллезной патологии, обнаруживали отечность подкожной клетчатки в области глотки и межжелудочного пространства, гиперемии и увеличение лимфатических узлов, многочисленные кровоизлияния на серозных и слизистых оболочках и в тканях паренхиматозных органов, серозный или серозно-фибринозный экссудат в грудной и брюшной полостях, отек легких.

В результате проведенных экспериментов установлено, что облучение кроликов в дозе 8.0 Гр ($LD_{50/30}$), проведенное до заражения пастереллами в дозе $LD_{50/14}$ (4.5×10^5 м.к./кг), отягощает течение пастереллезного процесса, способствует его генерализации и ускоряет гибель животных. Радиационно-

пастереллезная инфекция протекала быстро, и животные погибали на 2-13 сут после начала заболевания при средней продолжительности жизни 6.3 суток. При вскрытии трупов обнаруживали патологоанатомические признаки острого пастереллеза: отечность подкожной клетчатки, гнойно-катаральную бронхопневмонию, отек легких.

Список литературы

1. Выбор оптимальной модели двухфакторной патологии, вызванной термическим поражением на фоне внешнего гамма-облучения / Т.Р. Гайнутдинов [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 1. С. 4-9.
2. Гайнутдинов Т.Р. Оценка противорадиационной эффективности препаратов, полученных на основе веществ микробного происхождения // Ветеринарный врач. 2024. № 1. С. 52-57.
3. Гайнутдинов Т.Р., Вагин К.Н., Рыжкин С.А. Способ лечения радиационно-термических ожогов // Радиация и риск (Бюллетень национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2023. Т. 32. № 1. С. 108-117.
4. Изучение эффективности йодхлорина при кокцидиозе кроликов на фоне острой лучевой болезни / А.М. Идрисов [и др.] // Ветеринарный врач. 2023. № 5. С. 53-56.
5. Комбинированное воздействие γ -лучей и эймерий на организм кроликов / А.М. Идрисов [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 1. С. 14-21.
6. Комбинированное воздействие на организм животных ионизирующей радиацией и агентов биологической природы / А.М. Идрисов [и др.] // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2021. Т. 246. № 2. С. 98-102.
7. Моделирование радиационно-биологического поражения / Т.Р. Гайнутдинов [и др.] // Радиобиология и экологическая безопасность – 2024: материалы международной научной конференции (Гомель, Ин-т радиобиологии НАН Беларуси, 30-31 мая 2024 г.). Минск: ИВЦ Минфина, 2024. С. 53-56.
8. Моделирование радиационного поражения на фоне заражения организма пастереллезной инфекцией / Т.Р. Гайнутдинов [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 2. С. 5-11.
9. Development of an Optimal Model of Combined Radiation and Biological Lesions / T.R. Gaynutdinov [et al.] // Veterinary Medicine International. 2022. V. 2022. 7 p.

MODELING RADIATION-BIOLOGICAL DAMAGE IN RABBITS

Gaynutdinov T.R.

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

Modeling of radiation-biological damage was carried out on rabbits with a live weight of 2.8-3.4 kg. External gamma irradiation was used as a radiation factor, which was carried out on the Puma installation with an exposure dose rate of 2.36×10^{-5} A/kg. The causative agent of pasteurellosis *Pasteurella multocida*, as one of the most common pathogenic agents, was used as a model of a biological agent for reproducing experimental biological damage. It was experimentally established that gamma irradiation of rabbits at a dose of 8.0 Gy, followed by infection with pasteurella at a dose of 4.5×10^3 m.c./kg, aggravated the course of the pasteurellosis process, contributed to its generalization and accelerated the death of animals.

Keywords: *gamma irradiation, pasteurellosis, rabbits, modeling, radiation-biological damage*

Modeling of acute radiation sickness in animals was carried out by gamma irradiation on the Puma installation with an exposure dose rate of 2.36×10^{-5} A/kg. The causative agent of pasteurellosis *Pasteurella multocida*, as one of the most common pathogenic agents, was used as a model of a biological agent to reproduce the experimental biological damage. Modeling of radiation-pasteurellosis damage was carried out on rabbits with a live weight of 2.8-3.4 kg. It was found that gamma irradiation of rabbits at a dose of 8.0 Gy, followed by infection with pasteurella at a dose of 4.5×10^3 m.k./kg, aggravated the course of the pasteurellosis process, contributed to its generalization and accelerated the death of animals. Radiation-pasteurellosis damage occurs quickly. Animals died 2-13 days after

the onset of the disease with an average life expectancy of 6.3 days. The effect of non-lethal doses of the studied agents on rabbits in the indicated doses led to an aggravation of the course of radiation sickness and pasteurellosis infection, causing the death of all animals from radiation-pasteurellosis pathology. When opening the corpses of animals that died from an acute course of radiation-pasteurellosis pathology, edema of the subcutaneous tissue in the pharynx and intermaxillary space of the neck, hyperemia and enlargement of the lymph nodes, numerous hemorrhages on the serous and mucous membranes and in the tissues of the parenchymatous organs - serous or serous-fibrinous exudate in the chest and abdominal regions, pulmonary edema were found.

УДК. 574:2:539.1.04:631.438

НАКОПЛЕНИЕ Cs-137 В СКЕЛЕТНЫХ ВЕТВЯХ, ПОБЕГАХ ВТОРОГО И СЛЕДУЮЩИХ ПОРЯДКОВ У ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*PICEA ABIES* (L.) H.KARST.)

Горбунов И.Ю., Карпов А.Д., Радин А.И., Раздайводин А.Н., Белов А.А.

*Федеральное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15, Российская Федерация
e-mail: info@roslesrad.ru*

В статье изложены результаты исследования содержания Cs-137 в ветвях и побегах различных порядков у ели европейской. Средние значения удельной активности для ветвей 1-го, 2-го, 3-го и следующих порядков соотносятся как 1:2:3 (105.4; 206.9 и 307.8 Бк/кг, соответственно). Суммарные значения активности в пробах ветвей составляют, соответственно, 14, 8 и 6 Бк, соотношение $\sim 2.5:1.5:1.0$.

Ключевые слова: *ель европейская, радиоактивное загрязнение лесов, радиационный мониторинг лесов, Cs-137, накопление радионуклидов*

Методика и материалы

Cs-137 – техногенный радионуклид, попавший в окружающую среду в результате испытаний ядерного

оружия, а также ряда радиационных аварий и инцидентов [1]. В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. этим радионуклидом были загрязнены леса на площади более 2 млн. га. В настоящее время в России более 600 тыс. га лесов остается в зонах радиоактивного загрязнения [2]. Изучение накопления радионуклидов в компонентах лесных экосистем является актуальной проблемой как с точки зрения обеспечения радиационной безопасности в лесах, так и с точки зрения изучения долговременного воздействия ионизирующего излучения на лесную биоту.

Ель европейская (*Picea abies* (L.) H.Karst.) является ценной лесообразующей породой. По данным Рослесхоза еловые леса занимают около 12 % от всей площади лесов России [3]. Древесина широко используется в строительстве, кора – как дубильное сырье, хвоя и мелкие ветви в качестве витаминного корма для сельскохозяйственных животных. Накопление Cs-137 в структурных частях ели европейской, особенно в кроне, в настоящее время изучено недостаточно [4].

Цель настоящей работы – изучить закономерности накопления Cs-137 в скелетных ветвях, побегах второго и следующих порядков ели европейской на примере модельного дерева.

Модельное дерево было отобрано по средним для насаждения показателям высоты и диаметра

(соответственно $H=12.4$ м; $D_{1,3}=18$ см) на участке лесных культур, созданных в 1986 г. в 207 квартале Новозыбковского участкового лесничества ГКУ Брянской области «Злынковское лесничество», недалеко от бывшего села Святск в зоне отселения. В настоящее время плотность загрязнения почвы составляет около 740 кБк/м² (20 Ки/км²).

Для изучения накопления Cs-137 в ветвях ели была отобрана живая ветвь длиной 2.1 м (т.н. скелетная ветвь, т.е. ветвь 1-го порядка, отходящая от ствола) На высоте 2.7 м от комля дерева. Ветвь была разделена на 5-см отрезки, каждый из которых представлял смешанную пробу коры и древесины. Со скелетной ветви были отобраны ветви 2-го порядка, каждая из которых представляла смешанную пробу коры и древесины. Для ветвей 2-го порядка отмечалось их расположение на скелетной ветви относительно ствола в привязке к 5-см отрезкам. С каждой ветви 2-го порядка были отобраны ветви и побеги 3-го и последующих порядков, которые объединяли в общую пробу.

Схема отбора проб приведена на рисунке 1. Разделение на кору и древесину для ветвей всех порядков не проводилось. Осыпавшаяся в результате сушки хвоя в анализ не включалась.

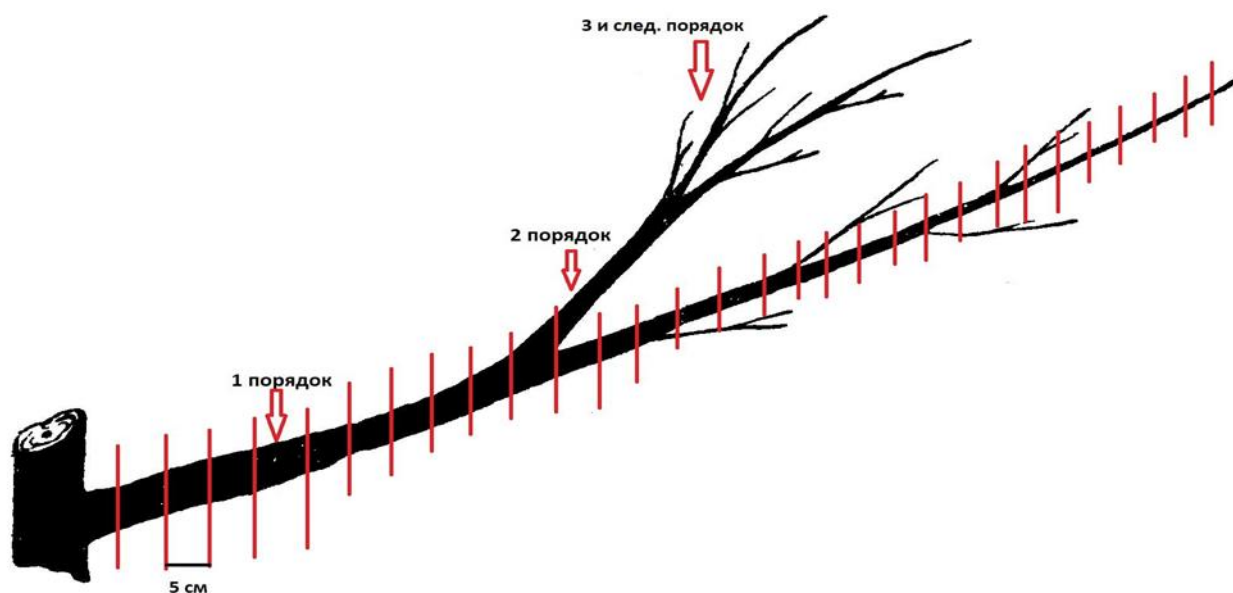


Рисунок 1. Схема отбора проб ветвей и побегов разных порядков

Измерение содержания Cs-137 в счетных образцах проводили на двух полупроводниковых гамма-спектрометрических комплексах с германиевыми детекторами HPGe (ЗАО НПЦ Аспект, Россия). Управление спектрометрами выполнялось с помощью программного обеспечения SpectraLineBG (ЛСРМ, Россия), в соответствии с методикой измерения [5]. Относительная погрешность измерений Cs-137 не превышала 11 %.

Результаты и обсуждение

Изменчивость удельной активности Cs-137 по длине скелетной ветви, а также в ветвях и побегах 2-го и последующих порядков относительно их расположения на скелетной ветви представлено на рисунке 2.

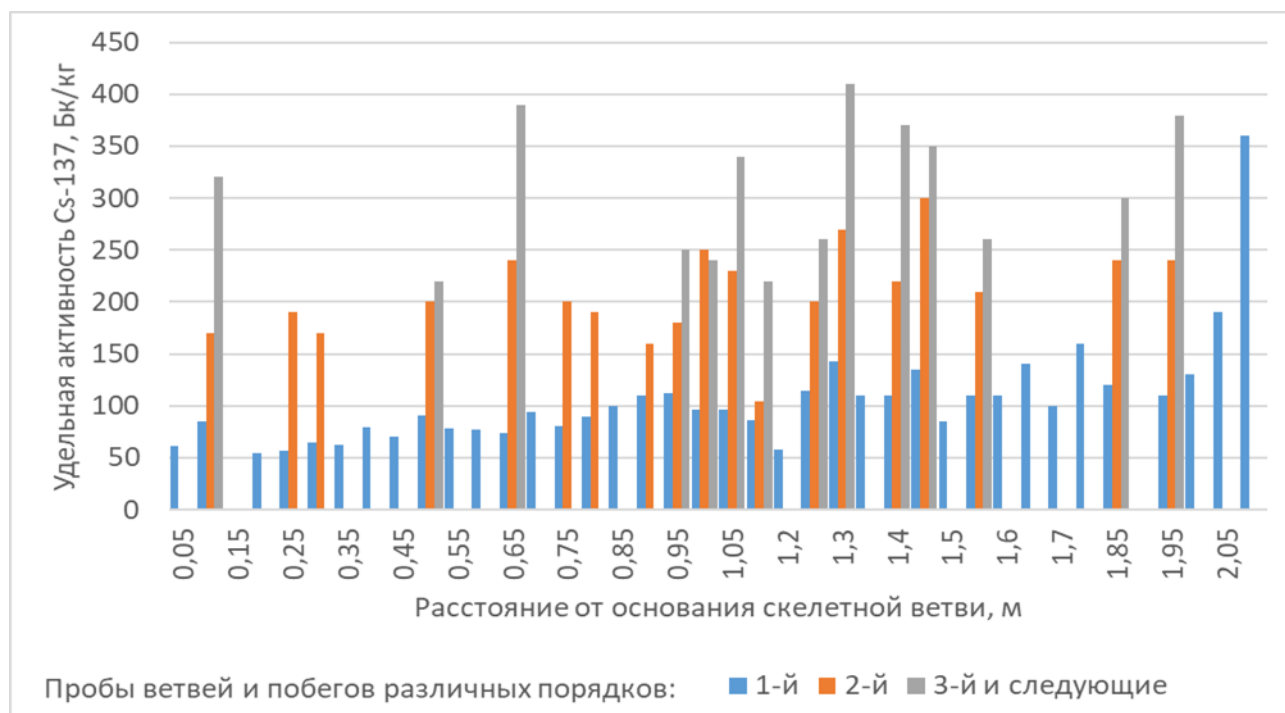


Рисунок 2. Удельная активность Cs-137 в ветвях и побегах ели европейской разных порядков

Самая высокая концентрация Cs-137 наблюдается в ветвях 3-го и следующих порядков, наименьшая – в пробах ветви 1-го порядка за исключением последних 10 см. У ветвей 2-го порядка – промежуточные значения. Так, средние значения для ветвей 1-го, 2-го и 3-го порядков составляют, 105 Бк/кг, 207 Бк/кг и 308 Бк/кг (табл. 1). Размах между минимальными и максимальными значениями снижается с 7-кратного до 3- и 2-кратного, соответственно. Коэффициент вариации максимальный у ветви 1-го

порядка – 49 % и по 22 % у ветвей следующих порядков. Высокий уровень варьирования концентрации Cs-137 у ветви 1-го порядка обусловлен повышенными значениями удельной активности в последних 10 см. Если их исключить из общей выборки, то среднее значение снизится до 95.9 ± 4.4 Бк/кг, размах до 3-кратного, а коэффициент вариации составит 27 %. У скелетной ветви также можно наблюдать положительный тренд от основания ветви к ее вершине.

Таблица 1

Статистические показатели варьирования удельной активности (УА, Бк/кг) Cs-137 в ветвях и побегах ели европейской разных порядков

Показатель	1-й порядок	2-й порядок	3-й и сл. порядки
Среднее значение	105.4	206.9	307.8
Стандартная ошибка	8.4	10.6	17.7
Дисперсия	2685	2021	4402
Среднеквадр.откл.	52	45	66
Минимум	54	104	220
Максимум	360	300	410
Коэфф. вариации, %	49	22	22

Высокая вариация значений концентрации Cs-137 в ветвях разных порядков связано с транспортом питательных веществ к ассимиляционным тканям. Cs-137, как химический аналог калия, в первую очередь востребован в листьях и хвое. На ветвях 1-го порядка живой хвои сохраняется немного или она отсутствует, тогда как на ветвях и побегах следующих порядков располагается основная масса хвои.

Фенологические наблюдения сезонной изменчивости концентрации Cs-137 в побегах ели европейской, проведенные нами ранее, показывают максимальные значения в 1-летних побегах [6]. Кроме того, в скелетных ветвях увеличивается доля одревесневших и уменьшается доля живых проводящих тканей, что дает более низкие показатели удельной активности Cs-137. Согласно литературным данным,

варьирование концентрации Cs-137 в коре и древесине может достигать 5-9- кратной разницы [4, 7, 8].

Суммарная масса исследуемых ветвей и побегов, их доли по порядкам, а также суммарные значения удельной активности Cs-137 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Суммарные значения массы, активности и удельной активности Cs-137 в пробах ветвей разных порядков

Показатель	1-й порядок	2-й порядок	3-й и сл. поряд.	Всего
Масса, г	172.0	45.7	19.0	236.7
Масса, %	72.7	19.3	8.0	100.0
Активность, Бк	13.9	8.3	5.5	27.7
Активность, %	50.2	29.9	19.9	100.0
УА сумм., Бк/кг	80.8	181.2	290.9	117.1

Выводы

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Накопление Cs-137 в ветвях и побегах ели европейской различных порядков различается в несколько раз. Среднее значения удельной активности для ветвей 1-го, 2-го, 3-го и следующих порядков составляет 105.4 Бк/кг, 206.9 Бк/кг, 307.8 Бк/кг, что соотносится как 1:2:3. Варьирование в пределах одного порядка ветвей высокое, коэффициенты вариации от 22 до 49 %. Суммарные значения активности Cs-137 в исследуемых пробах ветвей ели европейской составляют для ветвей 1-го, 2-го, 3-го и следующих порядков соответственно, 14 Бк, 8 Бк и 6 Бк, соотношение ~ 2.5:1.5:1.0. Такой характер распределения Cs-137 может быть связан с тем, что почти три четверти массы проанализированных проб приходится на скелетную ветвь. Средние значения удельной активности Cs-137 оказываются выше реальных для ветвей 1-го, 2-го, 3-го и следующих порядков соответственно на 23 %, 12 % и 5.5 %.

Список литературы

1. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р.М. Алексахин, Л.А. Булдаков [и др.]; под ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: Изд-во АТ, 2001. 752 с.
 2. Российский национальный доклад: 35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986-2021 /

А.А. Финогенов, В.А. Ткачев, А.М. Локшин [и др.]. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2021. 104 с. ISBN 978-5-907375-02-4.

3. Федеральное агентство лесного хозяйства / Сведения о землях лесного фонда на 01.01.2024. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/opendata/7705598840-ForestFund> (дата обращения: 01.09.2024).

4. *Переволоцкий А.Н.* Распределение ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в лесных биогеоценозах. Гомель, 2006. 256 с.

5. Активность радионуклидов в счетных образцах. Методика измерений на гамма-спектрометрах с использованием программного обеспечения «SpectralLine» // Свидетельство об аттестации № 43151.4Б207/01.00294-2010 от 28.02.2014 г.

6. Сезонная изменчивость концентрации Cs-137 в побегах ели европейской (*Picea abies* (L.) Kars T.) / И.Ю. Горбунов, А.Д. Карпов, А.Н. Раздайковин [и др.] // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года). СПб, 2023. С. 218-221.

7. Радиоактивное загрязнение древесины чернобыльской зоны / И.В. Турлай, Г.А. Чернушевич, В.В. Перетрухин, В.В. Терешко // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 2. С. 25-29.

8. Колебательный характер вертикального распределения Cs-137 в коре Сосны обыкновенной / А.Д. Карпов, И.Ю. Горбунов, В.В. Калнин [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2023. Т. 512. С. 506-510.

ACCUMULATION OF Cs-137 IN SKELETAL BRANCHES, SHOOTS OF THE SECOND AND NEXT ORDERS IN EUROPEAN SPRUCE (PICEA ABIES (L.) H.KARST.)

Gorbunov I.Yu., Karpov A.D., Radin A.I., Razdaivodin A.N., Belov A.A.

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russian Federation, 141202

The article presents the results of a study of the content of Cs-137 in the branches and shoots of various orders of European spruce. The average values of specific activity for branches of the 1st, 2nd, 3rd and following orders are correlated as 1:2:3 (105.4; 206.9 and 307.8 Bq/kg, respectively). The total activity values in the branch samples are, respectively, 14, 8 and 6 Bq, the ratio is ~ 2.5:1.5:1.0.

Keywords: *European spruce, radioactive contamination of forests, radiation monitoring of forests, Cs-137, accumulation of radionuclides*

УДК 57.043

КАК РАСТЕНИЯ ЧУВСТВУЮТ РАДИАЦИЮ?

Гринберг М.А.^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 mag1355@yandex.ru*

Принято считать, что за счет высоких энергий частиц и квантов ионизирующего излучения рецепторов к радиации не существует, т.к. отсутствует специфическая восприимчивость отдельных молекул к данному фактору. Несмотря на отсутствие специализированных рецепторов к ионизирующему излучению в клетках растений есть целый ряд сигнальных систем, способных активизироваться в ответ на разные типы излучений. Первичными событиями, запускающими каскад реакций в ответ на облучение, относятся, в первую очередь, разрывы ДНК и повышенная концентрация АФК.

Ключевые слова: *ионизирующее излучение, малые дозы, АФК, разрывы ДНК, сигнальные системы*

Эффекты, оказываемые ионизирующим излучением (ИИ) на растения, обычно рассматриваются в контексте повреждений, вызываемых непосредственно квантами/частицами излучения или формирующимися под их влиянием АФК. Принято считать, что за счет высоких энергий частиц и квантов ИИ рецепторов к радиации не существует, т.к. отсутствует специфическая восприимчивость отдельных молекул к данному фактору. Несмотря на отсутствие специализированных рецепторов к ИИ в клетках растений есть целый ряд сигнальных систем, способных активизироваться в ответ на разные типы ИИ. Их запускают «рецепторы повреждений». При этом высокая концентрация энергии в малом объеме, отличающая физическую природу ИИ от других неблагоприятных факторов, создает уникальные паттерны повреждений, что ведет к формированию отличной от других факторов картины функционального ответа. К основным типам «первичных» изменений, детектируемых в клетках, подвергшихся действию ИИ, относятся 1) повреждения, в первую очередь разрывы, ДНК и 2) повышенная концентрация АФК.

1. Поскольку двуниевые разрывы ДНК являются угрозой для нормального функционирования клетки, во всех живых организмах имеется система их восприятия и устранения. Начальными сенсорами у растений, по-видимому, являются ортологи киназ животных ATM (*ataxia telangiectasia mutated*) и ATR (*Rad3-related*), из которых двуниевые разрывы преимущественно воспринимает ATM. В качестве

нижележащего элемента каскада показан транскрипционный фактор из семейства NAC SOG1 (*suppressor of gamma response*). После фосфорилирования АТМ-зависимым образом SOG1, по-видимому, принимает участие в реализации большинства ответов на двуниевые разрывы.

2. АФК у облученных растений могут образовываться как непосредственно в результате радиолиза воды, так и длительное время образовываться на биологических структурах клетки. Основной формой АФК, запускающей сигнальные каскады, по-видимому является H₂O₂. Детектирование H₂O₂, как правило, осуществляется за счет ее способности окислять SH-группы с последующим завязыванием дисульфидных связей, что влечет за собой образовывать дисульфидную связь с последующим изменением конформации молекулы-рецептора и перехода его в активную форму. Такая способность была показана для ряда белков, потенциальных сенсоров АФК, выполняющих различные задачи в растительной клетке. В качестве дополнительных зависящих от концентрации АФК факторов запуска сигнальных систем можно рассматривать окисленные формы биомолекул (белков, липидов и нуклеиновых кислот) и общий редокс статус клетки.

Будучи универсальным компонентом общестрессовой сигнализации, рецепторы повреждений находятся в тесной связи с другими сигнальными системами, включая, в первую очередь кальциевую и фитогормональную. Эксперименты последних лет

показывают, что ответы растений, имеющих наиболее тесную связь с сигнально-регуляторными системами, обладают наибольшей чувствительностью к ионизирующему излучению.

Работа выполнена в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

HOW CAN PLANTS SENS RADIATION?

Grinberg M.A., Vodeneev V.A.

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin st. 23, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603022

It is generally accepted that due to the high energies of particles and quanta of ionizing radiation, there are no receptors to radiation, since there is no specific susceptibility of individual molecules to this factor. Despite the absence of specialized receptors to ionizing radiation, plant cells have a number of signaling systems that can be activated in response to different types of radiation. The primary events that trigger a cascade of reactions in response to irradiation include, first of all, DNA breaks and increased concentrations of ROS.

Keywords: *ionizing radiation, low doses, ROS, DNA breaks, signaling systems*

It is generally accepted that due to the high energies of particles and quanta of IR, there are no receptors for radiation, since there is no specific susceptibility of individual molecules to this factor. Despite the absence of specialized receptors for IR, plant cells have a number of signaling systems that can be activated in response to different types of IR. They are triggered by "damage receptors". At the same time, a high concentration of energy in a small volume, which distinguishes the physical nature of IR from other unfavorable factors, creates unique patterns of damage, which

leads to the formation of a functional response pattern that is different from other factors. The main types of "primary" changes detected in cells exposed to IR include, first of all, breaks, DNA and an increased concentration of ROS. Being a universal component of general stress signaling, damage receptors are closely connected with other signaling systems. The responses of plants that have the closest connection with signal-regulatory systems have the greatest sensitivity to ionizing radiation.

УДК 619:615.849:616-001.28

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИПОСОМАЛЬНОГО ПРЕПАРАТА ПРИ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ ОВЕЦ

Плотникова Э.М., Гайнуллин Р.Р., Шакуров М.М., Ефимова М.А., Тухфатуллов З.Л., Мухаметшин И.Р., Вафин Ф.Р.^а

*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: ^а Vafin.fr@mail.ru*

Целью настоящих исследований являлось испытание терапевтической эффективности иммунолипосомального препарата на сельскохозяйственных животных (овцы). В ходе проведения работы учитывали динамику клинических, патологоанатомических, гематологических показателей, а также выживаемость облученных овец за 30 сут исследований. Применение липосомального иммуноглобулина вызывало более медленное снижение числа лейкоцитов. Относительно постоянным на протяжении всего срока оставалось содержание общего белка в сыворотке крови. Его изменения были минимальными и не отличались от таковых у здоровых животных. У всех контрольных животных, а также леченых овец облучение вызывало выраженные изменения в периферической крови. Наблюдаемая в процессе развития острой лучевой болезни лейкопения у животных, получивших препарат, была менее выражена, чем у контрольных. Выживаемость леченых животных составила 67 % при 100 % гибели в группе контроля облучения. Результаты, полученные в экспериментальных условиях на овцах, свидетельствуют о значительной лечебной эффективности липосомального препарата при экспериментальной острой лучевой болезни.

Ключевые слова: облучение, липосомы, иммуноглобулин, лечение, выживаемость, гематология

Введение

Учитывая расширение сфер использования источников ионизирующих излучений в мире и продолжающегося на сегодняшний день влияния трагических техногенных последствий прошлых лет, проблема биологической защиты макроорганизма от ионизирующей радиации имеет важнейшее значение. Это в свою очередь предопределяет актуальность комплексной, физической, фармакологической и других форм его защиты [1, 2].

В течение последних десятилетий актуальным остается вопрос создания инновационных препаратов, которые содержат системы направленной доставки или системы направленного транспорта лекарственных веществ, например, такие как липосомы [3-5].

Липосомальные препараты обладают рядом преимуществ: защищают здоровые клетки от токсического действия лекарственных веществ, способны проявлять нацеленную специфичность за счет селективного проникновения из крови в ткани, защищают лекарственные вещества от деградации; изменяют фармакокинетику лекарственных препаратов, повышая их фармакологическую эффективность, позволяют создавать водорастворимые лекарственные формы для гидрофобных субстанций, увеличивая тем самым их биодоступность [6-9].

Учитывая изложенное, сотрудниками отделения радиобиологии ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ» был получен экспериментальный препарат липосомальной формы противорадиационного иммуноглобулина. В связи с этим целью настоящих исследований явилось испытание терапевтической эффективности липосомального препарата на сельскохозяйственных животных (овцы) при его подкожном введении через 24 часа после гамма-облучения тяжелой степени тяжести. Степенью оценки эффективности действия препарата служили клинико-гематологические показатели.

Материалы и методы

Для реализации поставленной цели в опытах использовали овец породы «Прекос» 1,5-2-х летнего возраста живой массой 30-50 кг, разделенных на 3 группы по 3 животных в каждой. Моделирование острой лучевой болезни тяжелой степени осуществляли путем внешнего облучения на гамма-установке «Пума» в дозе 6 Гр (ЛД 100/30).

Животных 1 и 2 групп подвергали тотальному внешнему облучению в дозе 6 Гр. Через 24 ч после облучения животным 1-ой группы вводили стерильный физиологический раствор подкожно в объеме 10 см³, и они служили группой контроля облучения. Животным 2-ой группы вводили липосомальный

иммунопрепарат подкожно в объеме 10 см³, также как и животным первой группы через 24 ч после облучения. Овцы 3-ей группы служили биологическим контролем.

В ходе проведения работы по изучению лечебной эффективности иммунолипосомального препарата учитывали динамику клинических (масса тела, температурная реакция, двигательная активность), патологоанатомических (выраженность геморрагического синдрома), гематологических показателей, а также выживаемость облученных овец за 30 сут исследований. Гематологические исследования периферической крови проводили на автоматическом гематологическом анализаторе Mythic 18 vet.

Полученные результаты подвергали статистической обработке с использованием параметрических методов с применением программы SPSS Statistics.

Результаты исследований

После гамма-облучения овец в дозе 6 Гр клиническая картина характеризовалась ранним проявлением первичных реакций и выражалась угнетением общего состояния, ослаблением реакции на внешние раздражители, отсутствием аппетита. У овец изменялся цвет видимых слизистых оболочек, которые через день после воздействия были гиперемированы. С третьих суток опыта общее состояние улучшалось, животные были активными, потребляли корм и воду. Начиная с 10-х сут после облучения общее состояние овец вновь ухудшалось, животные в этот период большую часть времени лежали, у некоторых из них наблюдалось кратковременное повышение температуры, одышка, аппетит снижался. В период с 14 по 21 сут клиническая картина лучевого поражения характеризовалась нарастанием клинического проявления болезни. У всех животных отчетливо проявлялось поражение желудочно-кишечного тракта, появлялась одышка. Более обильными становились истечения из носовых отверстий. На видимых слизистых оболочках появились кровоизлияния. Овцы почти не потребляли корма, изредка пили воду. В дальнейшем слизистые истечения из носовых отверстий переходили в слизисто-гнойные с примесью крови, снижалась масса тела, в неформированных каловых массах просматривались примеси слизи и крови. Шерсть выпадала клочками. Перед гибелью температура тела повышалась на 1-2 °С, смерть овец наступала на 21-28 сут с клиническими признаками геморрагического синдрома, сердечной и легочной недостаточности. При вскрытии трупов павших животных диагноз подтверждался (рис. 1). Клинико-гематологическая картина опытных животных по истечении срока исследований была ниже таковых в ходе.



Рисунок 1. Клиническая картина постлучевого воздействия (кишечник, легкие)

Клиническая картина ответной реакции на лучевое воздействие после применения в терапевтических целях иммунолипосомального препарата проявлялась менее выражено, чем у только облученных. Овцы были более активными, изменения со стороны желудочно-кишечного тракта проявлялись у всех животных. Сроки разгара болезни у леченых овец приходились в среднем на 17-е сут, тогда как у нелеченых – на 14-е сут. Выживаемость облученных и

леченых овец составляла 67 % при 100 % гибели овец без лечения (табл. 1).

Введение облученным овцам в качестве терапевтического средства сопровождалось сдвигами в системе крови, которые проявлялись изменениями количества лейкоцитов, эритроцитов, уровня гемоглобина и содержание общего белка в сыворотке крови (табл. 2).

Таблица 1

Выживаемость овец, облученных и леченых иммуноглобулином

№№ групп	Воздействие	Доза γ-облучения и объем иммунолипосомального препарата	Кол-во ж.-х. в группе	Пало, гол	Выжи-ло, гол	% выживаемости (ПВ)	Ср. продолж. жизни (СПЖ), сут
1	Облучение	6 Гр	3	3	0	0	22
2	Облучение+лечение	6 Гр +10 мл	3	1	2	67	24
3	Биол. контроль	-	3	0	3	100	-

Таблица 2

Гематологические показатели крови овец при облучении и леченых иммуноглобулином

Срок исследований	№№ групп	T, °C	Лейкоциты, 10 ⁹ /л	Эритроциты, 10 ¹² /л	Гемоглобин, г/л	Белок, г/л
3	1	39.00±0.05	1.50±0.30*	7.5±0.3	99.0±3.0	91.2±5.4
	2	39.1±0.3	2.44±0.50*	8.2±1.2	103.0±4.0	85.6±4.9
	3	39.2±0.1	6.03±0.10	9.6±0.9	110.0±0.0	67.5±4.0
7	1	39.1±0.2	1.39±0.20*	7.0±0.1*	105.0±2.0	69.0±2.1
	2	39.2±0.2	3.75±0.70*	8.0±0.3	110.0±3.0	74.1±2.3
	3	39.2±0.3	6.17±0.90	8.6±0.5	119.0±3.0	67.3±3.0
14	1	40.5±0.5	1.38±0.20*	6.8±0.4	80.0±3.0*	60.1±2.0*
	2	39.5±0.2	2.95±0.21*	7.9±0.6*	85.0±3.0*	68.0±2.6
	3	39.2±0.6	6.03±0.10	8.6±0.5	118.0±3.0	68.0±3.0
21	1	40.2±0.6	1.29±0.20	6.0±0.3*	70.0±2.0*	58.2±1.7
	2	39.3±0.2	2.65±0.40*	7.5±0.8*	80.0±1.0*	68.1±1.1
	3	39.20±0.05	6.72±0.60	8.6±0.5	119.0±5.0	71.0±7.3
28	1	Животные пали	Животные пали	Животные пали	Животные пали	Животные пали
	2	39.60±0.09	3.45±0.50*	8.1±0.9	85.0±5.0*	71.6±2.2
	3	39.4±0.1	6.34±0.4	8.9±0.4	118.0±3.0	68.8±2.9

* – P<0.05

На третьи сутки после облучения у только облученных животных количество эритроцитов понижалось и составляло $8.2 \pm 1.2 \times 10^{12}/л$ при $9.6 \pm 0.9 \times 10^{12}/л$ в группе биологического контроля. Через неделю содержание эритроцитов во всех группах было в пределах границ исходных значений. В последующие сроки исследований прослеживалась тенденция к снижению количества эритроцитов, причем в группе контроля облучения оно было более выражено, чем в группе облучения и лечения.

Максимальное снижение количества эритроцитов в группах овец, леченых иммунолипосомальным препаратом, наблюдалось на 21 сут опыта. К 28 сут этот показатель возрастал и составлял $8.1 \pm 0.9 \times 10^{12}/л$ и $8.9 \pm 0.4 \times 10^{12}/л$ в группе биологического контроля. В группе контроля облучения показатель зафиксировать не удалось, так как животные пали.

Изменение уровня гемоглобина в опытной и контрольных группах в первые сутки имело мало различий. Максимальное снижение уровня гемоглобина происходит у животных группы контроля облучения на 21 сут и составляет 70.0 ± 2.0 г/л при 119.0 ± 5.0 г/л в группе биологического контроля. Минимальный уровень гемоглобина во 2-ой группе (леченых иммуноглобулином) отмечается на 21 сут и достигает 80.0 ± 1.0 г/л, в дальнейшем он начинает повышаться, но исходных величин не достигает.

Динамика содержания общего белка в сыворотке крови облученных овец носила разнонаправленный характер. В первые трое суток отмечалось незначительное его повышение во всех группах: в группе контроля облучения оно составило 91.2 ± 5.4 г/л при 85.6 ± 4.9 г/л в группе леченых иммуноглобулином и 67.5 ± 4.0 г/л – в группе биологического контроля. На 7 сут этот показатель снижался и колебался в пределах исходных значений. В последующие сроки опыта содержание общего белка в сыворотке крови облученных и леченых овец было стабильным. Минимальная величина приходилась на 14 сут опыта и составляла 60.1 ± 2.0 г/л по сравнению с 68.0 ± 3.0 г/л в биологическом контроле. К концу опыта этот показатель вновь возрастал.

Количество лейкоцитов в периферической крови колебалось более значительно: уже на 3-и сутки после гамма-облучения в 1-й и 2-й группах оно составило $1.50 \pm 0.30 \times 10^9/л$, $2.44 \pm 0.50 \times 10^9/л$ соответственно при $6.03 \pm 0.10 \times 10^9/л$ в группе биологического контроля. Введение терапевтического средства способствовало восстановлению численности клеток белой крови. Подтверждением этого являлись изменения числа лейкоцитов во 2-ой группе, оно возросло по сравнению с контролем облучения, где этот показатель был более низким, на 7 сут оно составляло в 1-й и 2-й группах соответственно: $1.39 \pm 0.20 \times 10^9/л$, $3.75 \pm 0.70 \times 10^9/л$ при $6.17 \pm 0.90 \times 10^9/л$ в группе биологического контроля. К концу исследований (28 сут) уровень лейкоцитов в 1-ой группе измерить не удалось, так как животные пали, а во 2-й группе наблюдалось повышение этого показателя до

$3.45 \pm 0.20 \times 10^9/л$ при $6.34 \pm 0.40 \times 10^9/л$ в группе биологического контроля.

Заключение

Таким образом, применение иммунолипосомального препарата через 24 ч после облучения оказывало благоприятное влияние на клиническое течение острой лучевой болезни. Выживаемость леченых животных составила 67 %. У большинства овец, получивших препарат, в период разгара болезни отмечалось укорочение сроков продолжительности гипертермии, меньшее по сравнению с контролем снижение массы тела. Относительно постоянным на протяжении всего срока оставалось содержание общего белка в сыворотке крови. У всех контрольных животных, а также леченых овец, облучение вызывало выраженные изменения в периферической крови. Наблюдаемая в процессе развития острой лучевой болезни лейкопения у животных, получивших препарат, была менее выражена, чем у контрольных. Результаты, полученные в экспериментальных условиях на овцах, свидетельствуют о значительной лечебной эффективности липосомального препарата при экспериментальной острой лучевой болезни.

Список литературы

1. Бударков В.А., Кишин В.А. О ветеринарных правилах обеспечения радиационной безопасности сельскохозяйственных животных // Диагностика, профилактика и меры борьбы с особо опасными, экзотическими и зооантропонозными болезнями животных. 2000. С. 279-280.
2. Клемпарская Н.Н. Аутосенсбилизация облученного организма // Иммунотерапия экспериментальной острой лучевой болезни // Под редакцией Н.Н. Клемпарской. М.: Энергоиздат, 1981. С. 5-14.
3. Плотникова Э.М. Современные проблемы технологии получения фосфолипидов (обзор) // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2023. Т. 9. № 2. С. 168-177.
4. Lombardo D., Kiselev M.A. Methods for obtaining liposomes: formation and control factors of universal nanocarriers for biomedical and nanomedical applications // *Pharmaceutics*. 2022. V. 14. № 3. P. 543.
5. Vorobiev A.I. Acute radiation disease and biological dosimetry in 1993 // *Stem Cells*. 1997. V. 15 (Suppl. 2). 269 p.
6. Михеев А.А. Катионные липосомы как средства доставки нуклеиновых кислот // Тонкие химические технологии. 2020. Т. 15. № 1. С. 7-27.
7. Паштецкая А.В., Остапчук П.С., Емельянов С.А. Формирование питательных свойств мышечной ткани у овец на фоне применения липосомальной формы антиоксидантов // Современное состояние,

проблемы и перспективы развития аграрной науки. 2020. С. 290-291.

8. Плотникова Э.М. Изучение морфологических изменений в организме белых мышей после введения липосом // Современные проблемы ветеринарной радиобиологии, агроэкологии и радиационных технологий в АПК: сб. мат 3-й Межд. науч.-практич.

конф., посвящ. 95-летию со дня рожд. проф. В.А. Киршина (12 октября 2023 г.). Казань, 2023. С. 217-220.

9. Методика получения липосомальных систем доставки лекарственных веществ в организм животных / А.В. Поздеев [и др.] // Ветеринарный врач. 2021. № 3. С. 33-39.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛИПОСОМАЛЬНОГО ПРЕПАРАТА ПРИ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ ОВЕЦ

Plotnikova E.M., Gainullin R.R., Shakurov M.M., Efimova M.A., Tukhfatulloev Z.L., Mukhametshin I.R., Vafin F.R.

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

The aim of this study was to test the therapeutic efficacy of an immunoliposomal preparation on farm animals (sheep). During the study, the dynamics of clinical, pathological, hematological parameters, as well as the survival rate of irradiated sheep for 30 days of the study were taken into account. The use of liposomal immunoglobulin caused a slower decrease in the number of leukocytes. The content of total protein in the blood serum remained relatively constant throughout the entire period. Its changes were minimal and did not differ from those in healthy animals. In all control animals, as well as treated sheep, irradiation caused pronounced changes in the peripheral blood. Leukopenia observed during the development of acute radiation sickness was less pronounced in animals that received the drug than in the control animals. The survival rate of the treated animals was 67% with 100% mortality in the irradiation control group. The results obtained under experimental conditions on sheep indicate a significant therapeutic efficacy of the liposomal drug in experimental acute radiation sickness.

Keywords: radiation, liposomes, immunoglobulin, treatment, survival, hematology

УДК 57.042

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ РАДИОЗАЩИТНЫХ ПРЕПАРАТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ СОДЕРЖАНИЯ ЛЕЙКОЦИТОВ И ТРОМБОЦИТОВ И КРИТЕРИЮ ВЫЖИВАЕМОСТИ ОБЛУЧЕННЫХ В ДОЗЕ 6.5 Гр МЫШЕЙ

Ромодин Л.А.^{1,а}, Никитенко О.В.¹, Бычкова Т.М.¹, Московский А.А.¹, Ильязов Р.Г.², Родионова Е.Д.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический научный центр имени А.И. Бурназяна», 123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46, Российская Федерация

² Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр «ЛИПОСТ РИ», 423600, Елабужский район, г. Елабуга, ул. Московская, д. 134А, Республика Татарстан, Российская Федерация
e-mail: ^а rla2904@mail.ru

В настоящей работе на основании оценки содержания лейкоцитов и тромбоцитов в крови через 4 и 7 дней после облучения мышей рентгеновским излучением в дозе 6,5 Гр и анализа 30-суточной выживаемости проведена сравнительная оценка разработанных нами схем лечения лучевой болезни совместным использованием нескольких веществ. Полную выживаемость обеспечила схема, предполагающая введение фенилэфрина до облучения, глутатиона – после него, тролокса и гранулоцитарного колониестимулирующего фактора в форме пэгфилграстима – на следующий день с последующими ежедневными введениями пэгфилграстима до 12-х суток после облучения.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, радиопротектор, фенилэфрин, глутатион, гранулоцитарный колониестимулирующий фактор, хлорофиллин, витамин С, витамин Е, гидролизат плацент

Проблема поиска эффективного и при том безопасного фармакологического средства защиты от лучевой болезни в настоящее время все еще не решена. Это связано с высокой химической токсичностью всех эффективных радиопротекторов и с низкой радиозащитой малотоксичных соединений [1]. Перспективным мы считаем использование не одного радиопротектора, а нескольких веществ в составе единой терапевтической схемы лечения лучевого синдрома.

Целью настоящей работы была оценка эффективности нескольких схем с использованием различных веществ по критерию 30-суточной выживаемости и оценки содержания лейкоцитов и тромбоцитов в крови у самок мышей, подвергшихся острому воздействию рентгеновским излучением в дозе 6.5 Гр.

В состав изучаемых терапевтических схем входили следующие препараты, о радиозащитных свойствах которых имеются сообщения: α-токоферола [2] ацетат (Самарамедпром, Россия), масляный раствор при внутривенном введении, медный хлорофиллин [1] (Macklin, Китай) при внутривенном введении, фенилэфрина гидрохлорид [3] (препарат Мезатон производства ОАО «Дальхимфарм», Россия)

при внутривенном введении, глутатион [3] (препарат Глатион производства Шаньдун Луи Фармасьютикал, Китай) при внутривенном введении, гранулоцитарный колониестимулирующий фактор в форме пэгфилграстима [3] (препарат Fulphila, Mylan Pharmaceuticals, США) при подкожном введении, аскорбиновая кислота [2] (ОАО «Дальхимфарм», Россия) при внутривенном введении, гидролизат плаценты человека [4] (препарат Лаеннек, Japan Bio Products, Япония, приобретен у поставщика ООО «ТД-Фарм»). Средой для растворения изучаемых веществ при внутривенном введении выступал 0.2 % раствор уротропина (производство АО «Мосагроген», Россия).

В таблице 1 приведены сведения о дозировках и сроках вводимых препаратов экспериментальным группам, а также о времени эвтаназии животных для проведения гематологического исследования. В эксперименте участвовали 135 мышей: 90 – для оценки выживаемости, 45 – для определения содержания лейкоцитов и тромбоцитов в крови. Сведения о содержании лейкоцитов и тромбоцитов в крови мышей через 4 и 7 дней после облучения приведены на рисунке 1.

Таблица 1

Схема введения препаратов с указанием дней эвтаназии некоторых мышей из экспериментальных групп для проведения гематологического исследования

Дни после облучения	Группа I Виварный контроль	Группа II Облученный контроль	Группа III	Группа IV	Группа V
0	–	Раствор Уротропина за 15-20 минут до облучения Облучение в дозе 6.5 Гр	Фенилэфрин, 5 мкг/г, за 15 минут до облучения Облучение в дозе 6.5 Гр Глутатион, 200 мкг/г, через 30 минут после облучения	Токоферол, 600 мкг/г Глутатион, 500 мкг/г, за 20-30 минут до облучения Облучение в дозе 6.5 Гр Аскорбиновая кислота, 150 мкг/г, 30 минут после облучения	Хлорофиллин, 100 мкг/г, за 20-30 минут до облучения Облучение в дозе 6.5 Гр Глутатион, 200 мкг/г, 30 минут после облучения
1	–	–	Токоферол, 400 мкг/г (6 мкл/г р-ра) Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	Глутатион, 200 мкг/г	Лаеннек, 560 мкг/г
2	–	–	Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	Хлорофиллин, 20 мкг/г	Лаеннек, 560 мкг/г
3	–	–	Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	Хлорофиллин, 20 мкг/г	Лаеннек, 560 мкг/г

Дни после облучения	Группа I Виварный контроль	Группа II Облученный контроль	Группа III	Группа IV	Группа V
4	Эвтаназия 5 мышей	Эвтаназия 5 мышей	Эвтаназия 5 мышей Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	Эвтаназия 5 мышей Хлорофиллин, 20 мкг/г	Эвтаназия 5 мышей Лаеннек, 560 мкг/г
5 и 6	-	-	-	-	-
7	Эвтаназия 5 мышей	Эвтаназия 5 мышей	Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	Эвтаназия 5 мышей	Эвтаназия 5 мышей
8-11	-	-	Пэгфилграстим, 0.5 мкг/г	-	Лаеннек, 112 мкг/г

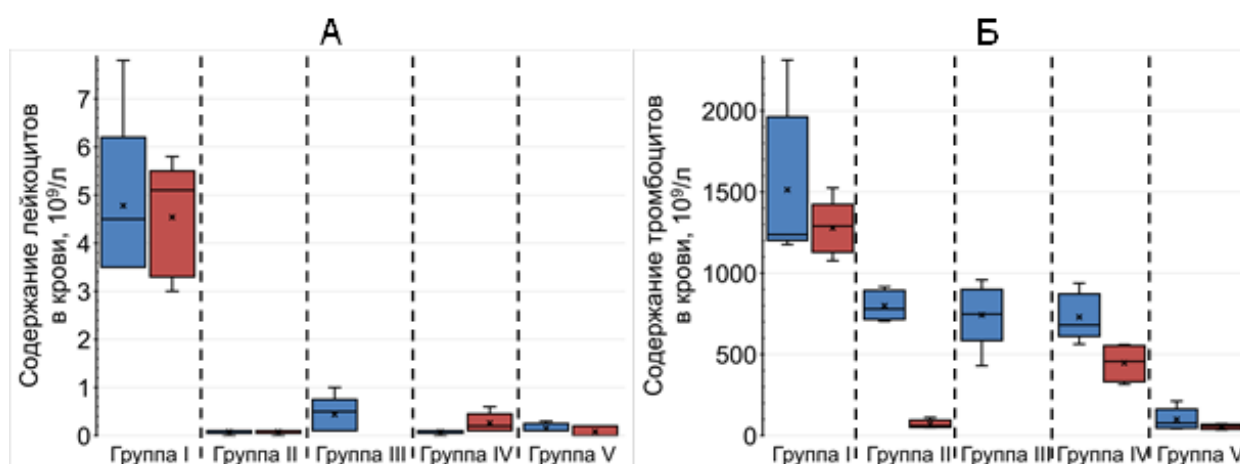


Рисунок 1. Сравнение наиболее различающихся изучаемых физиологических параметров в группах мышей (указаны внизу графиков) через 4 дня (синие прямоугольники) и через 7 дней (красные прямоугольники) после воздействия рентгеновского излучения в дозе 6.5 Гр.

А – Содержание лейкоцитов в крови. **Б** – Содержание тромбоцитов в крови

Ни одна из используемых схем не смогла нивелировать вызванную облучением лейкопению (рис. 1А). Однако у некоторых мышей из групп III и VI все-таки имело место повышение содержания лейкоцитов по сравнению с группой облученного контроля. Единственным обнаруженным нами случаем снижения выраженности радиационно-индуцированной тромбоцитопении был таковой для группы IV через 7 дней после облучения. Ее можно назвать антиоксидантной, так как для всех веществ из данной схемы были описаны антиоксидантные свойства [1-3].

Однако данная терапевтическая схема не смогла обеспечить полной выживаемости облученных мышей, что смогла обеспечить схема III, предполагающая использование до облучения фенилэфрина, являющегося агонистом α 1-адренорецепторов, что обеспечивает ему радиопротекторные свойства за счет создания гипоксии в тканях [3], антиоксидантов витамина E [2] хлорофиллина [1] и пэгфилграстима,

являющегося ростовым фактором, способствующим восстановлению популяции лейкоцитов. Однако необходимо заметить, что еще через неделю после облучения в данной группе все же отмечалась выраженная лейкопения. Но, возможно, пэгфилграстим способствовал более быстрому восстановлению лейкоцитарного листка кроветворения в последующие сроки. Данные по выживаемости проиллюстрированы рисунком 2.

Применение гидролизата плаценты после использования антиоксидантов в день облучения (группа V) не вызвало повышения выживаемости облученных мышей. Это противоречит литературным данным [4]. Однако мы не исключаем того, что в настоящей работе нам пришлось работать не с настоящим препаратом «Лаеннек», а с его подделкой. Поэтому показанный для группы V результат нуждается в дополнительных исследованиях.

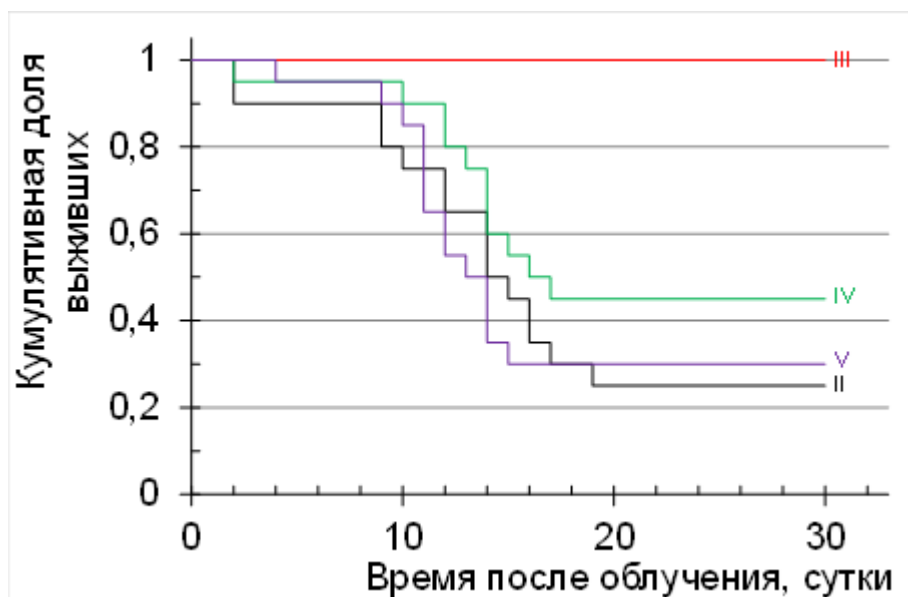


Рисунок 2. Динамика выживаемости самцов мышей ICR (CD-1) по Каплану-Майеру после воздействия рентгеновского излучения в дозе 6.5 Гр на фоне применения изучаемых схем совместного применения нескольких веществ для коррекции лучевого синдрома. Римские цифры соответствуют экспериментальным группам

Исследование было одобрено Этическим комитетом ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (выписка из протокола №113 от 07.02.2024 г.).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00383, <https://rscf.ru/project/23-24-00383/>.

Список литературы

1. Radioprotective properties of food colorant sodium copper chlorophyllin on human peripheral blood cells *in vitro* / M. Geric, G. Gajski, B. Mihaljevic [et al.] // Mutation research. Genetic toxicology and environmental mutagenesis. 2019. V. 845. P. 403027.

2. Expected role of photodynamic therapy to relieve skin damage in nuclear or radiological emergency: Review / K. Moloudi [et al.] // Environmental toxicology and pharmacology. 2024. V. 110. P. 104517.

3. Васин М.В. Препарат Б-190 (индралин) в свете истории формирования представлений о механизме действия радиопротекторов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 4. С. 378-395.

4. Protective effects of hominis placenta hydrolysates on radiation enteropathy in mice / S.Y. Jang, J.W. Park, Y. Bu [et al.] // Natural product research. 2011. V. 25. № 20. PP. 1988-1992.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE COMBINED USE OF SEVERAL RADIOPROTECTIVE DRUGS TO LIMIT THE CONTENT OF LEUKOCYTES AND PLATELETS AND ACCORDING TO THE SURVIVAL CRITERION OF MICE IRRADIATED AT A DOSE OF 6.5 Gy

Romodina L.A.¹, Nikitenko O.V.¹, Bychkova T.M.¹, Moskovskij A.A.¹, Il'yazov R.G.², Rodionova E.D.¹

¹State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Biological Agency, Picturesque str. 46, Moscow, Russian Federation, 123098

²Limited Liability Company Scientific and Production Center «LIPOST RI», Moskovskaya str. 134A, Yelabuga, Yelabuga district, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 423600

In this work, based on an assessment of the content of leukocytes and platelets in the blood 4 and 7 days after irradiation of mice with X-ray radiation at a dose of 6.5 Gy and an analysis of 30-day survival, a comparative assessment of the

treatment regimens we have developed for radiation sickness using the combined use of several substances was carried out. Complete survival was ensured by a regimen involving the administration of phenylephrine before irradiation, glutathione after it, trolox and granulocyte colony-stimulating factor in the form of pegfilgrastim the next day, followed by daily administrations of pegfilgrastim until 12 days after irradiation.

Keywords: *ionizing radiation, radioprotector, phenylephrine, glutathione, granulocyte-colony stimulating factor, chlorophyllin, vitamin C, vitamin E, placenta hydrolysate*

Key points

1. The studied treatment regimens for radiation sickness involved the combined use of several drugs: 1) phenylephrine, glutathione, tocopherol and granulocyte colony-stimulating factor in the form of pegfilgrastim, only this regimen contributed to the complete survival of mice irradiated at a dose of 6.5 Gy, 2) tocopherol, glutathione, ascorbic acid and copper chlorophyllin, 3) copper chlorophyllin, glutathione and human placenta hydrolysate (Laennec drug).

2. None of the applied regimens led to the correction of pancytopenic and immunobiological syndromes of radiation sickness a week after irradiation.

3. The combined use of copper chlorophyllin before irradiation and glutathione and placenta hydrolysate after it did not increase the survival rate of irradiated mice.

4. The combined use of several antioxidants helped to mitigate the severity of radiation-induced thrombocytopenia and reduce the mortality of irradiated mice, but did not ensure their complete survival.

УДК 539.1.074

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

Федоров С.Г.^{1,2}

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», 141570, Московская область, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, Российская Федерация

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31, Российская Федерация
e-mail: fedorov_sg@vniiftri.ru

Работа представляет собой обзор современного состояния использования ионизирующего излучения в лучевой терапии и радиационных технологиях. Рассматриваются методы и средства для оценки воздействия стохастических эффектов и разработка технологий усовершенствования эталонов единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы нейтронного излучения. Работа также описывает разработку аппаратурно-методического комплекса для измерения спектрального распределения нейтронов в смешанных полях гамма-нейтронного излучения. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения и их мощностей ГЭТ 117-2023 представляет собой основной элемент метрологического обеспечения дозиметрических измерений в различных областях, от здравоохранения и экологии до научных исследований, соответствуя современным требованиям к точности и прослеживаемости.

Ключевые слова: *нейтронное излучение, дозиметрия, поглощенная доза, лучевая терапия, методы и средства воспроизведения и передачи единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения*

В настоящее время все биологические эффекты и последствия воздействия ионизирующего излучения на человека разделяются на два класса: детерминированные и стохастические. Основной величиной, наиболее полно характеризующей степень воздействия всех видов ионизирующих излучений на объекты с преобладанием детерминированных эффектов (лучевая терапия, радиационные технологии и

аварийное облучение живого организма), являются поглощенная доза и мощность поглощенной дозы. Для оценки воздействия стохастических эффектов для целей радиационной безопасности (хроническое облучение персонала и населения) используется другая величина – эффективная доза, которая на практике реализуется через операционные (измеряемые)

величины амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы и их мощностей.

Для целей лучевой терапии используются различные виды ионизирующих излучений: фотонное (гамма и рентгеновское), протонное, электронное, нейтронное. Выбор конкретного вида ионизирующего излучения обусловлен необходимостью решения определенных терапевтических задач. В зависимости от глубины залегания поврежденных клеток и типа ткани, в которой они находятся, выбирается тип излучения. В случае, когда поврежденные клетки проявляют радиорезистентность к традиционным видам лучевой терапии (фотонная, протонная) или возникает ремиссия, применяется нейтронная лучевая терапия, а именно нейтронная терапия на быстрых нейтронах.

В рамках работ по совершенствованию Государственного первичного эталона единиц поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2023 были усовершенствованы методы и средства воспроизведения единицы поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы нейтронного излучения, основанные на применении разработанного аппаратно-методического комплекса, позволяющие расширить верхнее значение границы диапазона воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения с 1×10^{-3} до 2×10^{-3} Гр/с в диапазоне энергий от 0.05 до 14 МэВ с расширенной относительной неопределенностью воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения ($k=2$) не превышающей 2.7 %.

Разработаны методы и средства передачи на ядерно-физические установки, применяемые в нейтронной лучевой терапии, основанные на применении сцинтилляционного метода с набора детекторов для регистрации ионизирующего излучения, позволяющие обеспечить передачу единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения в смешанных полях гамма-нейтронного излучения с применением фокусирующих насадок с площадью поперечного сечения от 10 см^2 с расширенной относительной неопределенностью воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения ($k=2$) не превышающей 0.5 %. Измерительная система комплекса включает в себя блок регистрации, блок обработки сигнала, персональный

компьютер для управления, сохранения и дальнейшей обработки измеренных результатов. Блок обработки сигнала состоит из: блока питания, с тремя независимыми каналами, блока усиления, позволяющего осуществлять подстройку измеренного сигнала, аналогово-цифрового преобразователя, предназначенного для сбора, обработки и накопления информации, необходимой для набора аппаратурного спектра.

Для единиц амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы и их мощностей были усовершенствованы методы и средства воспроизведения, позволяющие расширить верхнее значение границы диапазона энергий с 10 до 20 МэВ с расширенной относительной неопределенностью воспроизведения единицы мощности поглощенной дозы нейтронного излучения ($k=2$) не превышающей 6.8 %. Разработанный аппаратно-методический комплекс позволяет осуществлять измерения спектрального распределения нейтронов в реальных полях смешанного гамма-нейтронного излучения, которые присутствуют на рабочих местах на предприятиях в области использования атомной энергии [1].

Государственного первичного эталона единиц поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного и индивидуального эквивалентов дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2023 возглавляет систему метрологического обеспечения дозиметрических измерений нейтронного излучения в области здравоохранения, экологии, атомной энергетики, промышленности и приборостроения, сфере обороны и безопасности, научных исследований и ряде других областей.

Метрологические характеристики усовершенствованного эталона отвечают современным отечественным и международным требованиям по точности и диапазонам воспроизведения, а также позволили обеспечить прослеживаемость клинических дозиметров, применяемых при проведении нейтронной лучевой терапии.

Список литературы

1. Федоров С.Г., Берлянд А.В., Дьяченко В.М. Расчет значений мощности амбиентного индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения на основе метода определения спектра // Альманах современной метрологии. 2021. № 3(27). С. 46-61.

METROLOGICAL SUPPORT FOR MEASUREMENTS OF ABSORBED DOSE RATE OF NEUTRON RADIATION FOR RADIATION THERAPY PURPOSES

Fedorov S.G.^{1,2}

¹ Federal State Unitary Enterprise Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Solnechnogorsk, Mendeleev work settlement, Moscow region, Russian Federation, 141570

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye highway 31, Moscow, Russian Federation, 115409

The paper presents a review of the current state of the use of ionizing radiation in radiation therapy and radiation technologies. The methods and means for assessing the impact of stochastic effects and the development of technologies for improving the standards of absorbed dose units and absorbed dose rate of neutron radiation are considered. The paper also describes the development of an equipment and methodological complex for measuring the spectral distribution of neutrons in mixed gamma-neutron radiation fields. The State Primary Standard of Units of Absorbed Dose, Ambient and Individual Equivalents of Neutron Radiation Dose and Their Rates GET 117-2023 is the main element of metrological support of dosimetry measurements in various fields, from healthcare and ecology to scientific research, meeting modern requirements for accuracy and traceability.

Keywords: *neutron radiation, dosimetry, absorbed dose, radiation therapy, methods and means of reproduction and transmission of the unit of absorbed dose rate of neutron radiation*

УДК (633.367 + 57.084.1):539.1.047: 57.033

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА ДИНАМИКУ ПРОРАСТАНИЯ, ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ РАЗВИТИЯ И ВЫЖИВАЕМОСТЬ ЛЮПИНА БЕЛОГО

Ханова А.С.^а, Горбатова И.В.^б, Шестерикова Е.М., Подлущий М.С., 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: ^аmicenyk-anastasi@mail.ru, ^бgorbatova.irina.96@mail.ru*

Для изучения влияния γ -излучения на динамику прорастания, развитие и выживаемость растений семена *Lupinus albus* L. подвергли облучению в диапазоне доз 25-1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/ч. Воздействие γ -излучения практически не повлияло на процент всхожести семян, однако с увеличением дозы статистически значимо снизились параметры, характеризующие скорость прорастания и синхронность: коэффициент Котовского, индекс Тимсона и индекс синхронизации Z. Отмечено статистически значимое уменьшение количества выживших растений в группах после воздействия γ -излучения на семена в дозах 400, 800 и 1200 Гр по сравнению с контролем на 60-е сутки выращивания в климатической камере. На 71-е сутки все культивируемые растения в группе воздействия 1200 Гр погибли. Статистически значимое уменьшение количества растений, находившихся в фазе образования и созревания боба, выявлено на 89-е сутки при дозе 800 Гр, а при дозе 25 Гр выявлено статистически значимое увеличение количества растений на этой стадии развития по сравнению с контролем. Дозы 25, 400 и 800 Гр показали значимое снижение количества растений, достигнувших фазы созревания семян. Рассчитана полулетальная доза (LD₅₀) для люпина белого, которая составила 473 Гр.

Ключевые слова: *L. albus, гамма-облучение, параметры прорастания семян, фенологические стадии развития, LD30 и LD50*

Продовольственная проблема – одна из глобальных проблем человечества, а дефицит белка на душу населения – следствие, вытекающее из этой проблемы. Для того, чтобы обеспечить продовольственную безопасность страны, необходимо увеличить производство продукции растениеводства с высоким содержанием белка, в частности увеличить процент возделываемых зернобобовых культур. Так, в южных регионах Российской Федерации климатические условия позволяют выращивать сою, а в более холодных регионах получение высокобелковых растительных продуктов можно достичь благодаря возделыванию неприхотливого к условиям произрастания люпина белого (*Lupinus albus* L.). Люпин белый – ценная

зернобобовая культура, положительные качества которой обусловлены не только способностью восстанавливать плодородие почв, но и высоким содержанием высокоусвояемого белка и масла, и низким содержанием алкалоидов, поэтому *L. albus* может использоваться и для пищевой промышленности, и для кормопроизводства. Чувствительность данной культуры к возбудителям антракноза и фузариоза значительно сокращает объемы ее возделывания. В связи с этим, встает необходимость в выведении новых устойчивых сортов люпина. Одним из эффективных инструментов для увеличения разнообразия генотипов зернобобовых культур является индуцированный мутагенез, в частности, радиационный [1]. Для

успешного применения γ -излучения в качестве мутагенного фактора в селекции *L. albus* требуется проведение ряда радиобиологических исследований для оценки радиочувствительности растений.

Таким образом, цель данной работы – изучение влияния γ -облучения семян в широком диапазоне доз на параметры прорастания, фенологические стадии развития и выживаемость люпина белого.

Для проведения эксперимента использовали семена *L. albus* сорта Мичуринский отечественной селекции. Семена были любезно предоставлены ВНИИ люпина – филиалом ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса» (г. Брянск, Россия). Сорт Мичуринский характеризуется универсальностью возделывания, высоким содержанием белка (37 %), низким содержанием алкалоидов в зерне (0.06 %), ранним цветением, устойчивостью к фузариозу и чувствительностью к антракнозу. Облучение семян проводили на уникальной научной гамма-установке ГУР-120 (^{60}Co ; НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, г. Обнинск) в дозах от 25 до

1200 Гр при мощности дозы 90 Гр/час. Эксперимент проводили в 3-х повторностях по 30 семян в каждой. Семена выращивали в контролируемых условиях климатической камеры ЛиА-2. Растения культивировали до стадии спелости семян. Для расчета параметров прорастания использовали пакет Germinationmetrics в среде программирования R [2]. Фенологические фазы развития люпина белого определяли по шкале, описанной Walker J. с соавторами [3]. Для анализа выживаемости использовали оценку Каплана–Мейера. Статистическую обработку результатов и визуализацию проводили в средах программирования Python версии 3.10, R версии 4.2.3, и ПО MS Office Excel (2019 г.).

В результате анализа параметров прорастания выяснили, что процент всхожести семян люпина белого не изменился под влиянием высоких доз гамма-излучения. Однако в дозе 100 Гр отмечено статистически значимое снижение процента прорастания (94 %, $p = 0.03$) по сравнению с контрольной группой (99 %) растений (рис. 1а).

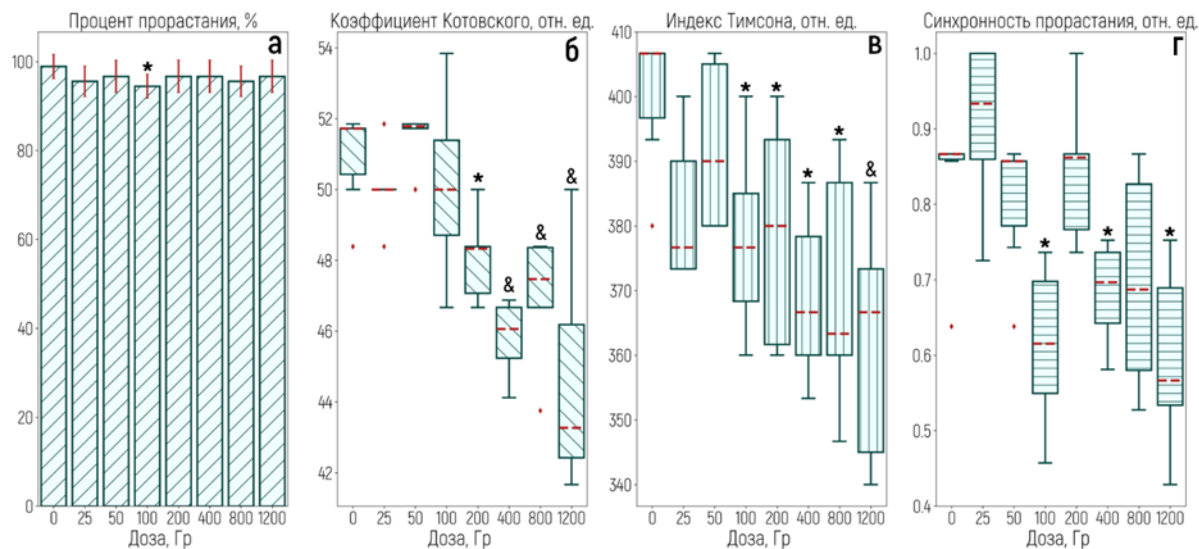


Рисунок 1. Параметры прорастания семян *L. albus*:
* – $p \leq 0.05$; & – $p \leq 0.01$

Для оценки скорости прорастания семян использовали коэффициент прорастания Котовского, который представляет собой обратную величину среднего времени прорастания семян, умноженную на 100 %. Так, для семян, подвергшихся гамма-облучению в дозах 200 ($p = 0.011$), 400 ($p = 0.005$), 800 ($p = 0.007$) и 1200 Гр ($p = 0.009$), выявлено статистически значимое снижение значений этого параметра по сравнению с необлученными семенами (рис. 1б). Также для анализа скорости прорастания семян рассчитывали индекс Тимсона – индекс энергии прорастания. Дозы в диапазоне от 100 до 1200 Гр статистически значимо ингибировали данный показатель (рис. 1в). Такой параметр, как синхронность прорастания (индекс синхронизации Z), был снижен по

сравнению с контролем в группах, подвергшихся гамма-облучению в дозах 100 ($p = 0.011$), 400 ($p = 0.027$) и 1200 Гр ($p = 0.012$) (рис. 1г).

Начиная с 60-х до 66-х суток и далее, все растения находились в фазе цветения (стадии 3.0-3.8) или частично перешли в фазу образования и созревания бобов (стадия 4.0), поэтому с этого момента данный временной промежуток для анализа представляет наибольший интерес. С 60-х суток до 68-х суток эксперимента наблюдали статистически значимое уменьшение количества выживших растений ($p = 0.049$) в группах, облученных в дозах 400, 800 и 1200 Гр по сравнению с контролем. К 71-м суткам эксперимента все растения, выросшие из семян, облученных в дозе 1200 Гр, погибли (рис. 2).

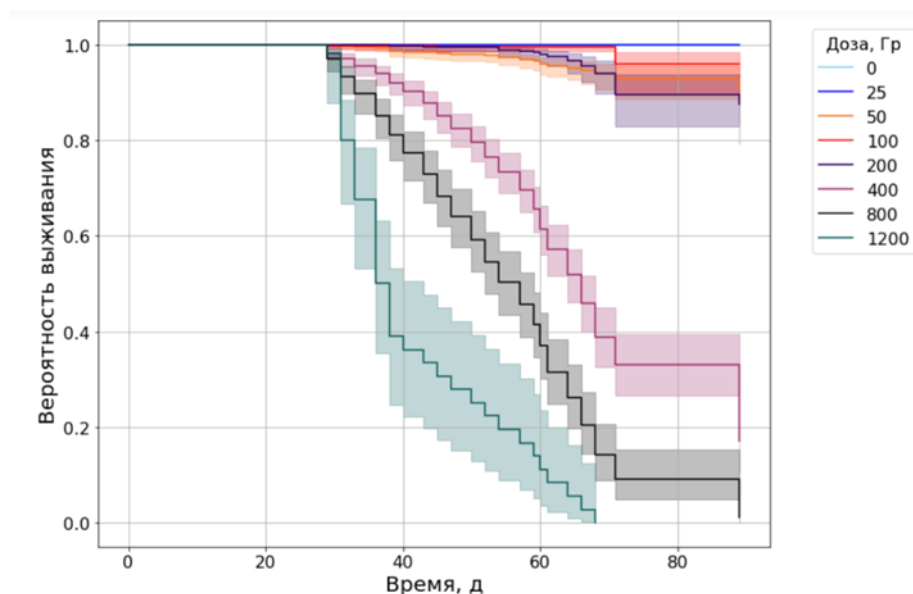


Рисунок 2. Кривые выживаемости Каплана-Мейера через 89 суток после гамма-облучения семян *L. albus*

На 89 день количество растений, находившихся в стадии образования и созревания боба (стадия 4.0), было статистически значимо больше в группе воздействия гамма-излучения в дозе 25 Гр, чем в контроле ($p = 0,049$). В группе 800 Гр количество растений на стадии 4.0 было значимо меньше по сравнению с контрольной группой. Что касается растений,

находившихся на стадии созревания семян (5.0), то их количество при дозах 25, 400, 800 Гр было статистически значимо меньше ($p = 0.049$), чем в контроле. Для оценки полуметальной дозы использовали логистическую модель ($R^2 = 0.98$), описывающую сигмоидальные (S-образные) кривые доза-ответ (рис. 3).

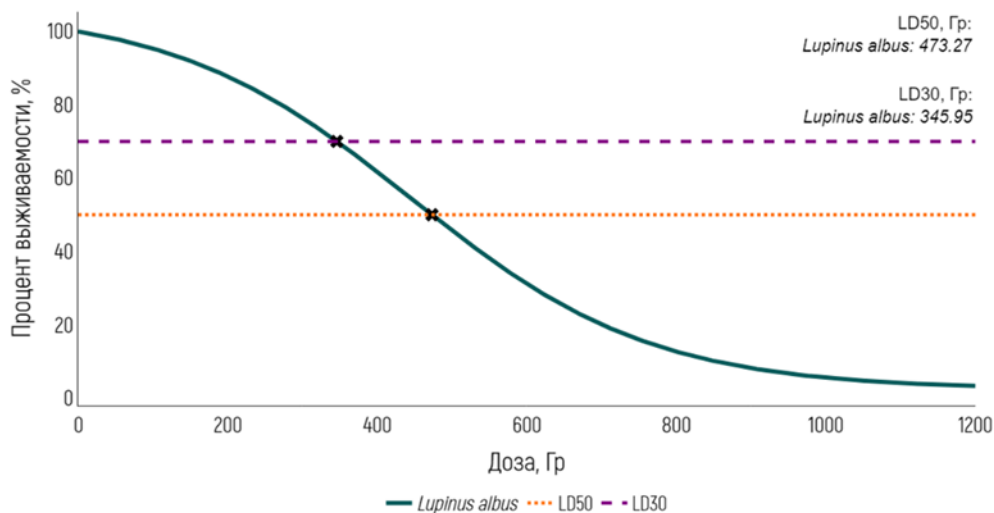


Рисунок 3. Влияние дозы гамма-облучения семян на выживаемость *L. albus* на 89 сутки культивирования в климатической камере роста

Так, LD30 и LD50 на 89-е сутки составила 346 и 473 Гр, соответственно. Также выявлено, что доза 800 Гр оказала негативное влияние на формирование и созревание бобов: плоды характеризовались небольшим размером и отсутствием в них семян.

Таким образом, в дальнейших исследованиях дозы выше 800 Гр будут расцениваться как ингибирующие рост и развитие люпина белого. Для

протокола радиационного мутагенеза рекомендуется использовать дозы в диапазоне от 200 до 500 Гр.

Список литературы

1. Анохина В.С., Дебелый Г.А., Конорев П.М. Люпин: селекция, генетика, эволюция. Минск: БГУ, 2012. 271 с.

2. Germinationmetrics: seed germination indices and curve fitting. R package version 0.1.3. 2019 / J. Aravind, S. Vimala Devi, J. Radhamani [et al.] // Accessed June 05, 2020. <https://cran.r-project.org/package=germinationmetrics>.

3. Procrop Lupin Growth & Development //Australia, State of New South Wales through NSW Department of Industry and Investment (Industry & Investment NSW). / J. Walker, K. Hertel, P. Parker [et al.] // District Agronomists. 2011.

EFFECTS OF GAMMA RADIATION ON SEED GERMINATION DYNAMICS, STAGES OF DEVELOPMENT, AND SURVIVAL OF WHITE LUPIN

Khanova A.S., Gorbatova I.V., Shesterikova E.M., Podlutskii M.S., 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

In order to study the effect of γ -radiation on the germination dynamics, stages of development, and survival of white lupin plants, seeds of *Lupinus albus* L. were irradiated at doses of 25, 50, 100, 200, 400, 800, and 1200 Gy at a dose rate of 90 Gy/h. The effect of γ -radiation had little or no impact on seed germination percentage. Statistically significant decreases in parameters characterizing the rate of germination and synchronization (Kotowski's coefficient, germination energy index, and germination synchrony Z index) were observed at higher doses. A statistically significant decrease in the number of surviving plants was detected in groups exposed to γ -radiation at doses of 400, 800, and 1200 Gy compared to the control group on the 60th day of cultivation in a climatic chamber. By the 71st day, all cultivated plants in the 1200 Gy exposure group had perished. A statistically significant decrease in the number of plants in the pod formation and ripening phase was noted on the 89th day at a dose of 800 Gy, while a statistically significant increase in the number of plants at this developmental stage was observed at a dose of 25 Gy compared to the control group. Doses of 25, 400, and 800 Gy caused a significant decrease in the number of plants reaching the seed maturation phase. For white lupin, the LD30 and LD50 were calculated to be 346 and 473 Gy, respectively.

Keywords: *L. albus*, gamma irradiation, seed germination parameters, phenological stages of development, LD30 и LD50

УДК (633.367 + 57.084.1):539.1.047: 57.033

ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ СЕМЯН *LUPINUS* L. И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОРОСТКАХ

Ханова А.С.^а, Смирнова А.С., Блинова Я.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: ^аmicenyk-anastasi@mail.ru

Для изучения влияния γ -излучения на морфофизиологические и биохимические параметры *Lupinus* L. семена трех однолетних видов люпина *L. angustifolius*, *L. luteus* и *L. albus* подвергли облучению в дозах 25, 50, 100, 200, 400, 800 и 1200 Гр. Воздействие γ -излучения никак не повлияло на процент проросших семян *L. luteus*. Доза 100 Гр значительно снизила процент прорастания у *L. albus* и увеличила данный показатель у *L. angustifolius* по сравнению с контролем. Выявлено, что наиболее чувствительными морфометрическими параметрами проростков у *Lupinus* L. в ответ на γ -облучение семян оказались длина гипокотила и длина побега. Статистически значимое ингибирование этих параметров наблюдали в дозах от 100 до 1200 Гр. Статистически значимый стимулирующий эффект отмечен в дозе 25 Гр у такого параметра, как длина побега у *L. albus*. Также анализ морфометрических параметров и фаз развития проростков *Lupinus* L. показал, что самым чувствительным к воздействию γ -излучения на семена оказались проростки *L. albus*, а самыми радиоустойчивыми – проростки *L. angustifolius*. Рассчитаны дозы, ингибирующие длину побегов люпина на 30 % или 50 %: RD₃₀ на 11-е сутки для *L. angustifolius* составила 1160 Гр, RD₅₀ для *L. luteus* – 1103 Гр, а для *L. albus* – 418 Гр, соответственно. Оценка активности ферментов антиоксидантной системы

показала, что в дозе 50 Гр значимо увеличивался показатель активности аскорбатпероксидазы у всех трех видов люпина. Высокие дозы γ -излучения значимо увеличивали активность гваяколовой пероксидазы у *Lupinus L.*

Ключевые слова: *L. angustifolius*, *L. luteus*, *L. albus*-, гамма-облучение, параметры прорастания, морфометрические параметры, РОХ, АРХ, САТ, фазы развития

Индукцированный мутагенез, в частности радиационный – один из главных инструментов для получения новых устойчивых к абиотическим и биотическим стрессовым факторам растений в селекции зернобобовых культур, в частности, в селекции однолетних видов *Lupinus L.* Для эффективного использования γ -излучения в протоколах радиационного мутагенеза необходимо провести ряд радиобиологических исследований для оценки фенотипического ответа и анализа радиочувствительности отечественных сортов различных видов люпина. Таким образом, цель данного исследования заключается в оценке влияния гамма-облучения семян *L. albus*, *L. luteus* и *L. angustifolius* на изменение морфофизиологических и биохимических параметров в проростках.

ВНИИ люпина – филиал ФГБНУ «ФНЦ кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса» (г. Брянск) любезно предоставил семена люпина белого сорта Мичуринский, люпина желтого сорта Надежный и люпина узколистного сорта Белорозовый 144. Сухие семена люпина подвергли γ -облучению в дозах 25, 50, 100, 200, 400, 800 и 1200 Гр в 3-х повторностях по 30 семян в каждой. Облучение проводили на уникальной научной установке ГУР-120 (^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, г. Обнинск). Мощность дозы составила 90 Гр/час. Семена выращивали в контролируемых условиях климатической камеры для культивирования растений. Параметры прорастания рассчитывали в среде программирования R (версия 4.2.3) с использованием пакета *Germinationmetrics* [1]. Фенологические фазы развития люпина определяли по шкале, описанной Walker J. с соавторами [2]. Для анализа активности ферментов антиоксидантной системы использовали спектрофотометр «NanoDrop OneC». Статистическую обработку и визуализацию результатов проводили в среде программирования Python (версия 3.10), R и ПО MS Office Excel (2019 г.).

Воздействие γ -излучения на семена люпина желтого не оказало значимого влияния на процент всхожести. В дозе 100 Гр выявлено статистически значимое снижение процента прорастания семян люпина белого, а у люпина узколистного отмечено статистически значимое увеличение процента всхожести по сравнению с контролем. При дозах 25, 100, 200, 400, 800 и 1200 Гр статистически значимо увеличивалось среднее время прорастания семян у *L. angustifolius*

сорта Белорозовый 144. У *L. albus* сорта Мичуринский среднее время прорастания увеличивалось в дозах от 200 до 1200 Гр, а у *L. luteus* сорта Надежный данный показатель значимо увеличивался только при дозах 100 и 1200 Гр.

Для анализа эффекта и оценки его значимости рассчитывали отношение морфометрических параметров проростков из облученных семян к контрольным, и сравнивали полученное значение с 1 [4]. Если рассчитанный коэффициент был значимо больше 1, делали вывод о наличии стимулирующего эффекта после γ -облучения семян. Если коэффициент был значимо меньше 1, то делали вывод об ингибирующем воздействии γ -излучения на морфометрические параметры проростков, а близкие к 1 значения, без статистической значимости, принимали за отсутствие эффекта. Так, оценка морфометрических параметров показала, что доза 25 Гр оказала стимулирующее воздействие на биомассу проростков *L. angustifolius*, а доза 200 Гр – на длину корней (рис. 1). Дозы от 100 до 1200 Гр статистически значимо ингибировали длину корня, а дозы 100, 400, 800 и 1200 Гр – длину побега. Также наблюдали статистически значимое уменьшение биомассы проростков после γ -облучения семян в дозах 100, 400, 800 и 1200 Гр.

Статистически значимый стимулирующий эффект после γ -облучения наблюдали у сорта Надежный при дозах 25 и 100 Гр по биомассе проростка, а при дозе 100 Гр – по длине корня (рис. 2). Дозы от 100 до 1200 Гр ингибировали длину гипокотыля, а дозы от 200 до 1200 Гр – длину побега. Дозы 100, 800 и 1200 Гр оказали негативное влияние на биомассу проростков люпина желтого.

Из рисунка 3 видно, что доза 25 Гр оказала значимый стимулирующий эффект на такие морфометрические параметры люпина белого, как длина побега и длина гипокотыля. Также в результате оценки выявлено, что дозы в диапазоне от 100 до 1200 Гр статистически значимо ингибировали все морфометрические параметры проростков *L. albus*: длины гипокотыля, корня и побега, и биомассу.

Для оценки доз, при которых длина побегов всех трех видов люпина уменьшилась бы на 30 и 50 %, использовали логистическую модель, описывающую сигмоидальные (S-образные) кривые доза-ответ (рис. 4).

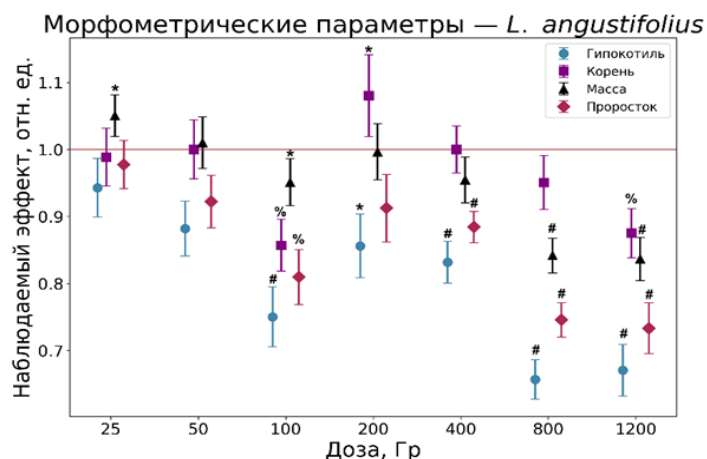


Рисунок 1. Эффект гамма-облучения семян *L. angustifolius* в различных дозах на морфометрические параметры проростков
* – $p \leq 0.05$; & – $p \leq 0.01$; % – ≤ 0.001 ; # – ≤ 0.0001

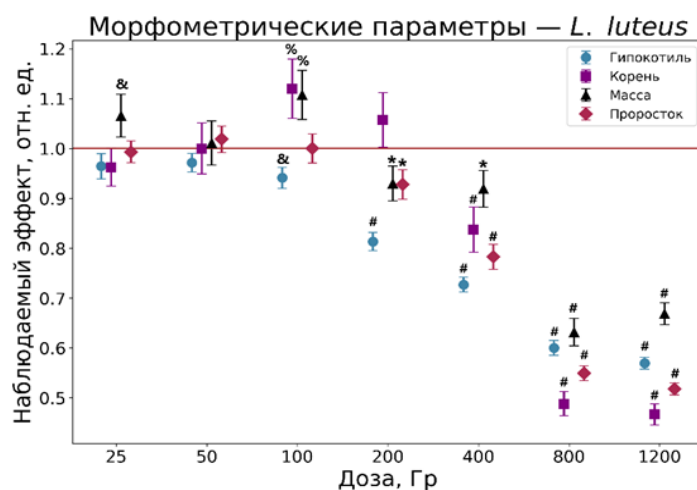


Рисунок 2. Эффект гамма-облучения семян *L. luteus* сорта Надежный в различных дозах на морфометрические параметры проростков
* – $p \leq 0.05$; & – $p \leq 0.01$; % – ≤ 0.001 ; # – ≤ 0.0001

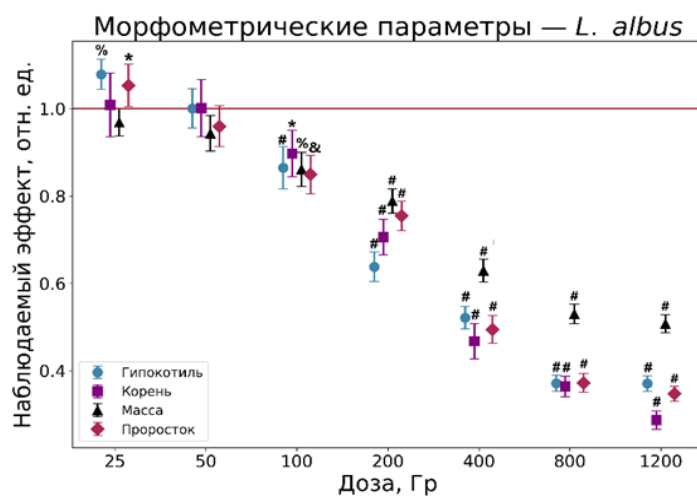


Рисунок 3. Эффект гамма-облучения семян *L. albus* сорта Мичуринский в различных дозах на морфометрические параметры проростков
* – $p \leq 0.05$; & – $p \leq 0.01$; % – ≤ 0.001 ; # – ≤ 0.0001

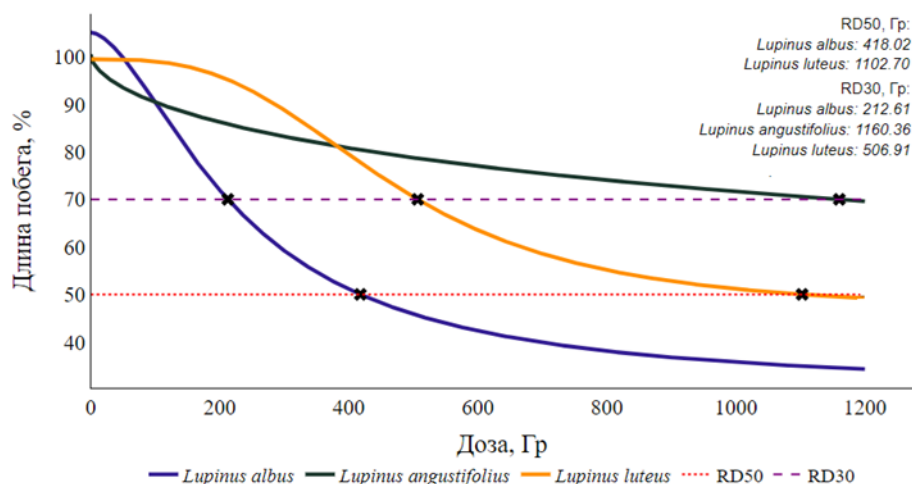


Рисунок 4. Влияние дозы γ -облучения семян на изменение длины побегов *Lupinus L.* в зависимости от дозы облучения семян

Так, RD30 на 11-е сутки для *L. angustifolius* составила 1160 Гр, RD30 и RD50 для *L. luteus* – 507 и 1103 Гр, а для *L. albus* – 213 и 418 Гр, соответственно.

Высокие дозы γ -излучения оказали негативное влияние на способность образовывать первые истинные листья у *L. luteus* (стадия 1.0 – начало

образования первой пары истинных листьев; 1.1 – фаза образования первого листа и т.д.) (рис. 5б). Дозы в диапазоне от 400 до 1200 Гр оказали угнетающее воздействие на развитие *L. albus* (рис. 5в). Развитие *L. angustifolius* ингибировалось только в максимальной из исследованных доз – 1200 Гр (рис. 5а).

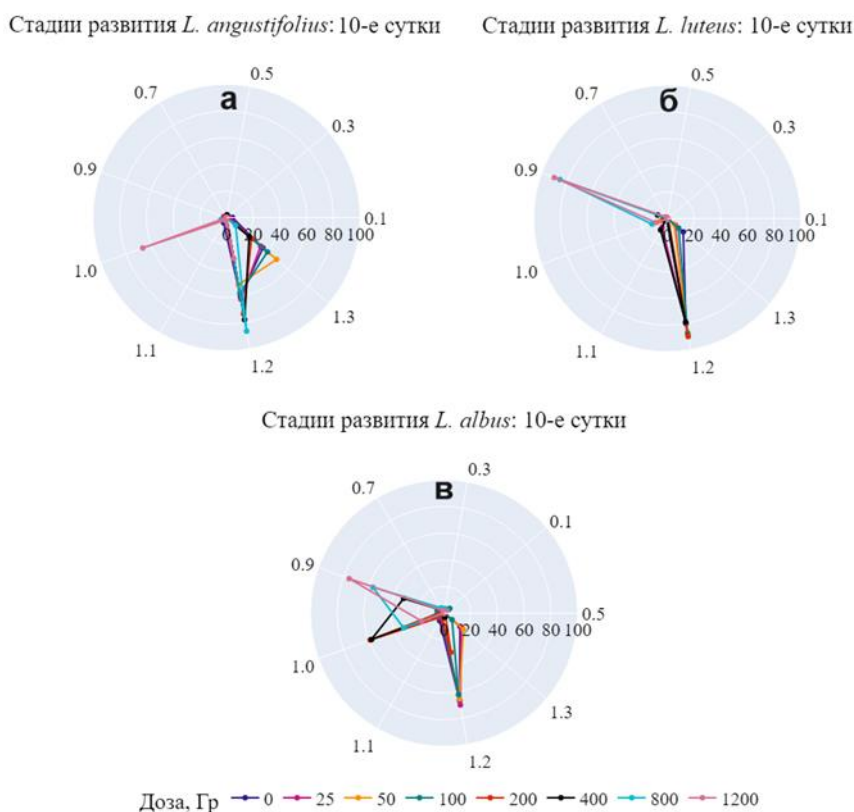


Рисунок 5. Стадии развития трех однолетних видов *Lupinus L.*

Анализ активности ферментов антиоксидантной системы в тканях первых истинных листьев показал, что активность гваяколовой пероксидазы (РОХ) у *L. angustifolius* статистически значимо увеличивалась в

диапазоне доз от 50 до 1200 Гр, а активность каталазы (САТ) – в дозах 50, 200, 400, 800 и 1200 Гр. Активность аскорбатпероксидазы (АРХ) статистически значимо увеличивалась в дозах 800 и 1200 Гр. Также

выявлено, что доза 800 Гр значимо увеличивала активность ПОХ у *L. luteus*, а доза 50 Гр увеличивала активность АРХ. Значимое снижение активности САТ отмечено в дозах 25, 50 и 200 Гр. Оценка активности ферментов антиоксидантной системы в листьях *L. albus* показала значимое увеличение активности ПОХ в диапазоне доз от 200 до 1200 Гр. Активность САТ статистически значимо увеличивалась в дозах 25 и 50 Гр, а снижение ее активности наблюдали при дозе 1200 Гр. Показатель активности АРХ значимо увеличивался при дозе 50 Гр.

Список литературы

1. Germinationmetrics: seed germination indices and curve fitting. R package version 0.1.3. 2019 / J. Aravind, S. Vimala Devi, J. Radhamani [et al.] // Accessed June 05, 2020. <https://cran.r-project.org/package=germinationmetrics>.
2. Procrop Lupin Growth & Development //Australia, State of New South Wales through NSW Department of Industry and Investment (Industry & Investment NSW). / J. Walker, K. Hertel, P. Parker [et al.] // District Agronomists. 2011.

GAMMA-IRRADIATION OF *LUPINUS L.* SEEDS AND ITS EFFECT ON MORPHOPHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHANGES IN SEEDLINGS

Khanova A.S., Smirnova A.S., Blinova Ya.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

In order to study the effects of γ -radiation on the morphophysiological and biochemical parameters of *Lupinus sp.* L., seeds from three annual species (*L. angustifolius*, *L. luteus*, and *L. albus*) were irradiated with doses of 25, 50, 100, 200, 400, 800, and 1200 Gy. Gamma-radiation had no effect on the germination percentage of *L. luteus* seeds. A dose of 100 Gy significantly reduced the germination percentage of *L. albus* while increasing it for *L. angustifolius* compared to the control. It was found that the most sensitive morphometric parameters of *Lupinus L.* seedlings to γ -irradiation were hypocotyl length and seedling length. Statistically significant inhibition of these parameters was observed at doses ranging from 100 to 1200 Gy. A statistically significant stimulatory effect was noted at a dose of 25 Gy on the seedling length of *L. albus*. The analysis of morphometric parameters and developmental stages of *Lupinus L.* seedlings revealed that *L. albus* seedlings were the most sensitive to γ -radiation, while *L. angustifolius* seedlings were the most radioresistant. The inhibitory doses reducing seedling length by 30 % and 50 % were calculated as follows: RD₃₀ on the 11th day for *L. angustifolius* was 1160 Gy; RD₃₀ and RD₅₀ were 507 and 1103 Gy for *L. luteus* and 213 and 418 Gy for *L. albus*, respectively. Evaluation of antioxidant enzyme activity indicated a significant increase in ascorbate peroxidase activity at 50 Gy across all three *Lupinus* species. High doses of γ -radiation significantly increased the guaiacol peroxidase activity in *Lupinus L.*

Keywords: *L. angustifolius*, *L. luteus*, *L. albus*, gamma irradiation, germination parameters, morphometric parameters, ПОХ, АРХ, САТ, phases of development

УДК 581.143.32:57.017.64: 57.045:58.084.1

ВЛИЯНИЕ МОДЕЛИРУЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КУЛЬТУРЫ *LACTUCA SATIVA*

Чередникова Н.Н.^{1,а}, Бабина Д.Д.², Шестерикова Е.М.², Король М.Ю.², Празян А.А.²,
Сабуров В.О.³, Моисеев А.С.³, Казаков Е.И.³, Казакова Е.А.^{2,б}

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 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

³ 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. Королёва, д. 4, Российская Федерация
e-mail: ^a 89204187030n@gmail.com, ^e elisabethafeb19@gmail.com

Проведена оценка влияния моделируемых условий космической среды на морфологические параметры растения-кандидата латук посевной (*Lactuca sativa* L.). Показано, что клиностамирование сочетанное с облучением протонами, а также только облучение может оказывать ингибирующее действие на вегетативные органы растений, в том числе на предполагаемые для использования в рационе питания астронавтов при межпланетных перелетах.

Ключевые слова: космическое растениеводство, *Lactuca sativa* L., клиноста, протоны, морфологические изменения

Освоение космоса в современном мире считается перспективным направлением, для развития которого необходимо скоординированное решение большого количества задач специалистами разного профиля и специализации. Одной из таких задач является развитие космического растениеводства, нацеленного на обеспечение свежим питанием астронавтов в межпланетных перелетах и создания более комфортного и безопасного пребывания человека в экстремальных условиях космоса [1].

Многими исследователями показано, что в качестве оптимального сорта-кандидата для жизнеобеспечения человека в космосе может использоваться латук посевной (*Lactuca sativa* L.). Культура обладает рядом преимуществ, необходимых для роста в космосе, таких как короткий жизненный цикл, быстрое прорастание, большое количество свежей биомассы, минимальное внимание со стороны персонала при выращивании [2]. В тоже время при изучении влияния космической среды на растения как в реальных, так и моделированных условиях было выявлено множество изменений на разных уровнях организации растительного организма из-за воздействия суровых стрессоров, в частности микрогравитации и космического излучения. Поэтому, совершенствуя космическое растениеводство, необходимо расширять знания о влиянии экстремальных условий космоса на растения-кандидаты для более точного прогнозирования и планирования межпланетных космических полетов [3].

Цель данной работы – оценить влияния моделируемого воздействия космической среды (клиностамирования в сочетании с облучением протонами) на морфологические характеристики культуры *Lactuca sativa*.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были использованы растения *Lactuca sativa* сорта «Мунред». Для моделирования космических условий для салата было проведено комбинирование облучения протонами и клиностамирования (К+П), также выполнено только облучение протонами (П), только имитация микрогравитации в клиностае (КЛ). Контролем служили проростки без воздействия (К).

Для оценки влияния экспериментальных условий были посажены по 18 семян салата в три чашки Петри на каждое условие. В качестве питательной среды для выращивания *L. sativa* использовали среду Мурасиге-Скуга половинной концентрации. Семена проращивали в фитотроне MLR-351H в условиях длинного дня. На 10 сутки прорастания проростки салата были подвергнуты воздействию вышеописанных условий. Моделирование микрогравитации проводили с помощью 3D-клиноста, вращающего чашки Петри со скоростью 60 об./мин, суммарное время вращения 1 час. Облучение проростков протонами энергией 100 МэВ производили на протонном ускорителе «Прометеус». Суммарная поглощенная доза составила 10 Гр (фракционировано подавалась доза по 2 Гр). Такая доза теоретически может быть накоплена при межпланетных перелетах, при неоднократном попадании корабля в зону воздействия солнечных бурь [4].

Далее из каждой чашки Петри в рандомном порядке были отобраны по 5 растений контрольной, облученной протонами, клиностамированной и комбинированной (клиностамирование + облучение) групп. Общее количество растений составило 60 (по 15 на условие). Для каждого растения были измерены длина побегов и корней с помощью линейки. После проростки были пересажены в фальконы объемом 50 мл с раствором Хогланда, pH = 6.0. Дальнейшее культивирование *L. sativa* до 30 суток проводили в фитотроне ЛиА-Х.

На 15, 20, 25, 30 сутки проводили оценку морфологических параметров для каждого растения. Фиксацию роста осуществляли методом фотографирования. Затем каждая фотография обрабатывалась с помощью программы Image Pro Plus (версия 4.5), где измеряли высоту побегов, длину корней и площадь кроны. На 30 сутки для каждой группы оценивали отдельно свежую массу корней и побегов для каждого растения с помощью аналитических весов. Также на 30 сутки были отсканированы листья салата для анализа площади поверхности листовых пластинок с помощью программы Image Pro Plus.

Данные по морфологическим параметрам растений представлены в формате медиана (Q1; Q3). Была проведена проверка на наличие выбросов. Значения, находящиеся на 1,5 межквартильного размах выше и ниже от третьего и первого квартилей

соответственно, исключались из дальнейшего анализа. Различия между контрольным и экспериментальными условиями сравнивали с помощью U-критерия Манна – Уитни. Для расчетов и визуализации полученных данных применяли Microsoft Office Excel 2021 и программу Statistica 12.0.

Результаты

У облученных протонами образцов и у растений, подвергшихся комбинированному воздействию, на

15 и 20 сутки было зафиксировано статистически значимое снижение длины корней (П: 20 сутки – $p = 0.047$, 15 сутки – $p = 0.019$) и (К+П: 20 сутки – $p = 0.028$, 15 сутки – $p = 0.026$) по сравнению с контрольными образцами. На более поздние сутки наблюдения различия нивелировались. При этом было отмечено увеличение длины побегов на 20 сутки наблюдения для условий клиностатирование + облучение и только облучение ($p = 0.011$ и $p = 0.0002$, соответственно) (табл. 1).

Таблица 1

Морфологические характеристики растений *Lactuca sativa*, подвергнутых экспериментальным условиям на 10, 15, 20, 25 и 30 сутки культивирования

Условие	М (Q1; Q3)	Длина побегов, мм					Длина корней, мм				
		Сутки культивирования									
		10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
К	Q1	8.00	10.75	10.75	20.81	27.78	20.00	45.28	114.18	131.72	135.94
	М	9.00	12.19	12.38	23.63	31.47	22.00	65.53	138.62	133.92	141.74
	Q3	10.25	13.69	12.75	25.56	32.44	25.75	77.07	152.97	141.61	150.52
К+П	Q1	9.25	9.66	12.63	21.13	27.24	22.00	37.80	96.72	116.02	130.87
	М	11.00	10.64	13.69*	23.06	34.09	24.00	43.35*	110.48*	132.47	143.60
	Q3	11.75	11.86	14.41	25.88	36.56	25.75	50.55	126.49	151.02	161.51
КЛ	Q1	8.50	11.13	10.63	10.75	28.75	21.25	46.73	109.24	132.43	137.01
	М	10.00	12.07	12.00	20.31	31.24	25.00	62.83	124.24	148.26	144.66
	Q3	10.75	15.51	13.81	18.75	35.01	26.50	71.46	135.05	162.08	155.24
П	Q1	8.63	10.36	13.56	22.03	25.40	24.00	34.13	94.79	118.94	142.69
	М	9.00	11.37	14.25***	25.38	27.54	25.50*	44.30*	115.55*	136.21	146.77
	Q3	10.75	12.29	15.16	28.38	30.00	26.75	49.64	123.95	154.97	167.20

Примечание: К – контроль; К+П – комбинация условий облучение протонами и клиностатирование; П – облучение протонами; КЛ – клиностатирование, М – медиана

Ячейка* – $p < 0.05$; Ячейка** – $p < 0.01$; Ячейка*** – $p < 0.001$

Также для исследуемых растений был оценен параметр площадь поверхности кроны, фиксируемый с 15 суток в силу начала активного формирования кроны. Уже на 15 сутки наблюдалось значительное статистически значимое снижение площади кроны у растений после облучения протонами ($p = 0.005$) по сравнению с контролем. На 25 и 30 сутки эксперимента также было зафиксировано снижение площади кроны для облученных растений, при этом исследуемый параметр снизился и для растений, подвергнутых облучению + клиностатированию. Но наибольшая разница по сравнению с контролем отмечена для условия облучение протонами (табл. 2).

На 30 сутки был также рассмотрен параметр массы для экспериментальных и контрольных растений. Было зафиксировано значительное статистически значимое уменьшение массы для облученных

образцов и подвергшихся совместному воздействию по сравнению с контролем (табл. 2).

На 30 сутки культивирования были проведены измерения площади поверхности листьев для экспериментальных и контрольных образцов растений и зафиксировано статистически значимое уменьшение площади поверхности листьев для облученных протонами образцов и образцов после комбинированного воздействия (К+П: $p = 0.012$; П: $p = 0.00008$).

Если рассматривать возможность использования салата *Lactuca sativa* с целью внедрения данного сорта-кандидата в свежий растительный рацион астронавтов, то в качестве наиболее важных из морфологических параметров для оценки можно расценивать площадь поверхности листовых пластин, площадь кроны и массу растений (побегов), так как именно листья салата будут употребляться в пищу.

Площадь кроны и свежая масса, оцененные для растений *Lactuca sativa*, подвергнутых экспериментальным условиям

Условие	Медиана (Q1; Q3)	Площадь кроны, см ²				Масса свежая, г		
		Сутки культивирования				Масса об-щая	Масса корня	Масса по-бега
		15	20	25	30			
Контроль	Q1	1.7	3.3	17.3	25.9	1.546	0.382	1.175
	Медиана	2.1	7.1	18.6	30.0	1.965	0.552	1.317
	Q3	2.2	8.2	19.6	35.2	2.115	0.707	1.479
К+П	Q1	1.4	5.4	11.7	15.1	0.877	0.127	0.714
	Медиана	1.9	6.4	16.0*	20.0**	1.187**	0.239**	0.936**
	Q3	2.1	7.7	18.8	26.4	1.494	0.402	1.135
КЛ	Q1	1.7	4.8	16.0	23.2	1.277	0.251	0.909
	Медиана	1.9	6.6	17.7	29.4	1.661	0.486	1.244
	Q3	2.0	7.6	20.3	31.7	2.041	0.640	1.350
П	Q1	1.2	4.0	8.4	12.4	0.751	0.123	0.634
	Медиана	1.5**	4.9	12.28***	17.5***	1.028***	0.161***	0.732***
	Q3	1.9	5.9	14.5	22.0	1.252	0.288	0.993

Примечание: Ячейка* – $p < 0.05$; Ячейка** – $p < 0.01$; Ячейка*** – $p < 0.001$

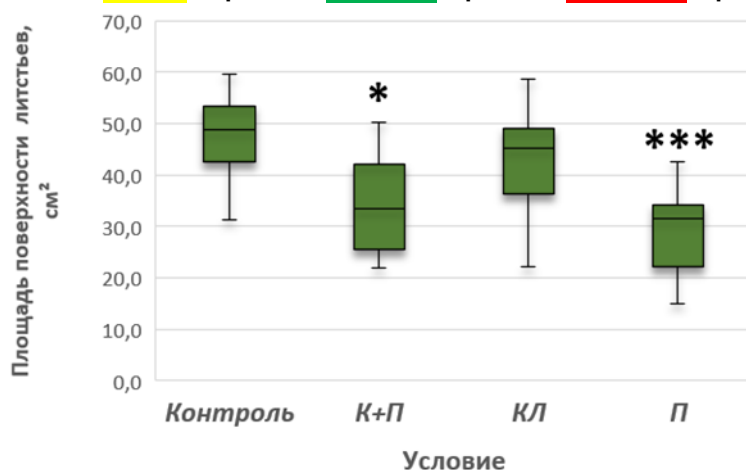


Рисунок 1. Площадь поверхности листьев у экспериментальных и контрольных растений *Lactuca sativa* после 30 суток культивирования.

* – различия значимы по сравнению с контролем, $p < 0.05$; *** – различия значимы по сравнению с контролем, $p < 0.001$

Заключение

В ходе данного исследования показано, что влияние моделируемых условий космической среды способно изменить морфологические характеристики салата *L. sativa*.

При поддержке гранта Президента РФ № МК-3142.2021.1.4.

Список литературы

1. Space farming: Horticulture systems on spacecraft and outlook to planetary space exploration / M. Nguyen, M. Knowling, N. Tran [et al.] // Plant Physiology and Biochemistry. 2023. V. 194. PP. 708-721.

2. Cultivar-specific performance and qualitative descriptors for butterhead salanova lettuce produced in closed soilless cultivation as a candidate salad crop for human life support in space / C. El-Nakhel, M. Giordano, A. Pannico [et al.] // Life. 2019. V. 9. № 3. P. 61.

3. Space farming: Need for fresh vegetable crop / V. Kumar, S. Singh, R. Jakhwal [et al.] // Annals of Horticulture. 2023. V. 16. № 1. PP. 65-71.

4. Effects of simulated space radiations on the tomato root proteome / A. Desiderio, A.M. Salzano, A. Scalonì [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2019. V. 10. P. 1334.

THE EFFECT OF SIMULATED IMPACT OF THE SPACE ENVIRONMENT ON THE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF *LACTUCA SATIVA* CROPE

Cherednikova N.N.¹, Babina D.D.², Shesterikova E.M.², Korol' M.Y.², Prazyan A.A.², Saburov V.O.³, Moiseev A.S.³, Kazakov E.I.³, Kazakova E.A.²

¹Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039

²Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

³A. 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

The influence of simulated space environment conditions on the morphological parameters of the candidate plant lettuce (*Lactuca sativa* L.) were evaluated. It has been shown that clinostatization combined with proton irradiation, as well as irradiation alone, can have an inhibitory effect on vegetative organs, including those intended for use in the diet of astronauts during interplanetary flights.

Keywords: space farming, *Lactuca sativa* L., clinostat, protons, morphological changes

Many researchers have shown that seed lettuce (*Lactuca sativa* L.) can be used as the optimal candidate variety for human life support in space. The purpose of this study is to evaluate the effects of simulated exposure to the space environment (clinostating in combination with proton irradiation) on the morphological characteristics of *Lactuca sativa* crope. *Lactuca sativa* plants of the "Munred" variety were used as the object of the study. Four influences were chosen to simulate

space conditions: combination of irradiation and clinostating, proton irradiation alone, imitation of microgravity in a clinostat, and control. It has been established that clinostating in combination with proton irradiation, as well as proton irradiation alone, can have an overwhelming effect on vegetative organs, including those that can be used in the diet of astronauts during interplanetary flights.

УДК 616-03:636.3:539.1.047

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ β -ОБЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА ОВЕЦ МОДЕЛЬНЫМИ ОПЛАВЛЕННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Шаповалов С.Г.^а, 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: ^аshapovalovstanislav93@gmail.com

Представлен анализ основных закономерностей формирования поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки отделов пищеварительного тракта овец после однократного поступления в организм с кормом «трехкомпонентных» и «урановых» радиоактивных частиц, моделирующих локальные выпадения наземного ядерного взрыва. Полученные результаты могут быть экстраполированы на сценарии загрязнения природной среды оплавленными радиоактивными частицами различного генезиса.

Ключевые слова: модельные оплавленные радиоактивные частицы, пищеварительный тракт, овцы, поглощенные дозы

Введение

В течение относительно непродолжительного периода времени использования атомной энергии в военных и мирных целях были зарегистрированы десятки случаев неконтролируемого выброса существенного количества радиоактивных веществ в различных физико-химических формах во внешнюю окружающую среду. Одной из основных форм таких радиоактивных веществ являются труднорастворимые оплавленные радиоактивные частицы (ОРЧ), которые могут представлять собой как топливные частицы уран-графитовой смеси (аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1), так и частицы локальных выпадений наземного ядерного взрыва. В случае инкорпорирования в ЖКТ животных или человека такие частицы становятся источниками внутреннего облучения, приводя, в большинстве случаев, к внутренним радиационным поражениям различной степени тяжести [1].

Целью настоящего исследования являлся анализ закономерностей формирования поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки пищеварительного тракта овец модельными оплавленными радиоактивными частицами. Результаты, полученные в ходе текущего исследования, могут быть применены в задачах быстрого реагирования в животноводстве в острый период аварий реакторного типа и других ядерных и радиационных инцидентов, приводящих к радиоактивному загрязнению окружающей природной среды.

Материалы и методы

В качестве источника основных исходных данных для выполнения настоящей работы выступили архивные материалы, собранные в ходе экспериментов по изучению радиационного воздействия частиц локальных выпадений наземных ядерных взрывов на сельскохозяйственных животных, проведенных на базе уникального радиологического комплекса ФИЦВиМ.

Изучение динамики формирования поглощенных доз β -облучения поверхностного слоя слизистой

оболочки отделов ЖКТ полигастричных животных проводили с использованием домашних овец породы «Прекос» средней массой 30 кг, благополучных по инфекционным и инвазионным заболеваниям. В ходе экспериментальных исследований на овцах использовались силикатные ОРЧ «урановой» и «трехкомпонентной» моделей, которые приближенно моделировали радиационные характеристики продуктов мгновенного деления (ПМД) возрастом от 10 до 15 ч [2].

Для получения ОРЧ «урановой» модели, наиболее полно имитирующей радиационные характеристики частиц локальных выпадений наземного ядерного взрыва на силикатных почвах, стеклосферы диаметром от 80 до 160 мкм, на поверхность которых наносились соли ^{235}U (уранил $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), активировались в потоке тепловых нейтронов. Более широко для изучения поражающего действия β -излучения от ПМД применялись частицы «трехкомпонентной» модели, которые после нейтронной активации содержали в силикатной матрице ^{165}Dy (42 %), ^{142}Pr (45 %) и ^{90}Y (13 %). Данная модель наиболее точно имитировала скорость радиоактивного распада ПМД возрастом 10 ч. Растворимость «урановых» частиц в кислой и щелочной среде составляла не более 5 %, что соответствует растворимости радионуклидов в составе частиц наземного ядерного взрыва [3]. Растворимость «трехкомпонентных» ОРЧ в аналогичных средах составляла не более 1-2 %.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены величины средних поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки отделов ЖКТ овец после однократного перорального поступления ОРЧ «трехкомпонентной» модели с удельной активностью 123 МБк/кг массы тела животных, рассчитанные с помощью камерной модели транспорта радиоактивных частиц в ЖКТ овец [4], в сравнении с поглощенными дозами, рассчитанными по экспериментальным данным концентрации ОРЧ в химусе отделов ЖКТ овец [2].

Таблица 1

Средние поглощенные дозы β -облучения слизистой оболочки отделов пищеварительного тракта овец после однократного перорального поступления ОРЧ «трехкомпонентной» модели с удельной активностью 123 МБк/кг массы тела животных, рассчитанные с помощью камерной модели транспорта модельных ОРЧ в ЖКТ овец и на основе экспериментальных данных

Поглощенная доза, Гр	Отделы ЖКТ			
	Преджелудки	Сычуг	Тонкий отдел кишечника	Толстый отдел кишечника
Эксперимент	1.4±0.3	12.9±3.3	1.5±0.5	1.6±0.2
Моделирование	1.1	12.0	1.4	1.6

Как видно из таблицы 1, было получено удовлетворительное согласие (расхождения не более 21 %) между сформированными средними поглощенными

дозами, рассчитанными по экспериментальным данным концентрации ОРЧ в химусе ЖКТ овец, и дозами, рассчитанными с помощью вышеупомянутой

камерной модели транспорта модельных частиц в пищеварительном тракте экспериментальных животных.

На рисунке 1 представлена динамика формирования средних поглощенных доз β -облучения

поверхностного слоя слизистой оболочки отделов пищеварительного тракта овец после однократного перорального поступления ОРЧ «трехкомпонентной» и «урановой» моделей с активностью 3700 МБк на животное.

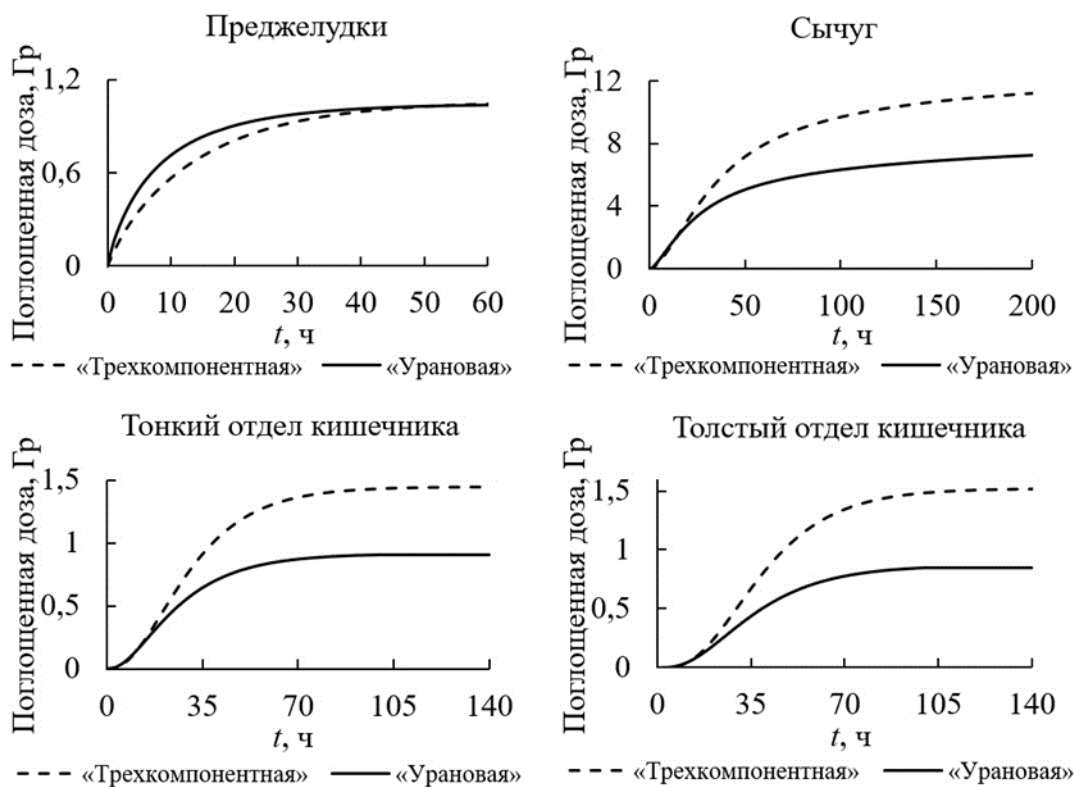


Рисунок 1. Динамика формирования средних поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки отделов ЖКТ овец после однократного перорального поступления модельных ОРЧ с активностью 3700 МБк на животное

Из рисунка 1 видно, что «урановая» и «трехкомпонентная» модели (при условии перорального поступления ОРЧ с одинаковыми величинами активности) достаточно близки между собой в плане типичности процесса дозообразования в поверхностном слое слизистой оболочки для каждого из отделов ЖКТ всех задействованных экспериментальных животных. При поступлении как «трехкомпонентных», так и «урановых» ОРЧ более чем 95 % поглощенной дозы в преджелудках овец (рубец, сетка и книжка) формируется приблизительно через 48 ч после единоразового потребления корма, содержащего модельные частицы. Наряду с этим из рисунка также можно заметить, что процесс формирования поглощенной дозы в тонком и толстом отделах кишечника занимает более 100 ч, а в сычуге – более чем 200 ч. При таких длительных сроках формирования поглощенных доз начинают проявляться различия в их величине, обусловленные, в свою очередь, различиями в скорости радиоактивного распада продуктов ядерного деления (ПЯД), включенных в состав задействованных моделей. Так поглощенная доза от частиц «трехкомпонентной» модели на 28 % в сычуге, на

36 % в тонком отделе кишечника и на 46 % в толстом отделе кишечника превосходит сформированную поглощенную дозу от «урановых» ОРЧ. Поглощенные дозы в преджелудках и в отделах кишечника близки между собой по величине, но меньше дозы β -облучения в сычуге в среднем (по отделам) в 9 раз для частиц «трехкомпонентной» модели и в 10 раз для частиц «урановой» модели.

Список литературы

1. Шаповалов С.Г., Козьмин Г.В. Дозиметрические показатели поражения пищеварительного тракта моногастрических животных инкорпорированными радиоактивными частицами // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 2. С. 157-171.
2. Теоретические и экспериментальные разработки дозиметрических моделей сельскохозяйственных объектов при радиоактивном загрязнении территорий / Л.И. Пантелеев, Б.Н. Анненков, И.А. Сарapultьцев [и др.]. Обнинск: ВНИИРАЭ, 1981. 180 с.

3. Radioactive particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques. IAEA-TECDOC-1663. Vienna: IAEA, 2011. 77 p.

4. Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте овец / Г.В. Козьмин, В.Г. Епи-махов, А.С. Снегирев [и др.] // Радиационная биология. Радиозэкология. 2018. Т. 58. № 3. С. 305-316.

PATTERNS OF FORMATION OF ABSORBED DOSES OF β -IRRADIATION OF THE DIGESTIVE TRACT OF SHEEP BY MODEL FUSED RADIOACTIVE PARTICLES

Shapovalov S.G., 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*

The analysis of the main patterns of formation of absorbed doses of β -irradiation of the mucous membrane of the digestive tract of sheep after a single intake of "three-component" and "uranium" radioactive particles into the body with food, simulating local precipitation of a ground-based nuclear explosion., is presented. The results obtained can be extrapolated to scenarios of environmental pollution by fused radioactive particles of various genesis.

Keywords: *fused radioactive particles, digestive tract, sheep, absorbed doses*

Секция

РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

RADIATION TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE



ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО РАДИОЗАЩИТНОГО СРЕДСТВА НА КАЧЕСТВО МЯСА КРОЛИКОВ

Галлямова М.Ю.^{1,а}, Семенов В.Г.², Ишмухаметов К.Т.¹, Курбангалеев Я.М.¹,
Калимуллин Ф.Х.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности», 420075, г. Казань, ул. Научный городок-2, Республика Татарстан, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный аграрный университет», 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 29

e-mail: ^а marina_rb@inbox.ru

В работе представлены результаты изучения физико-химических показателей мяса кроликов, полученного от разных экспериментальных групп. Выявлено, что применение радиозащитного средства с профилактической целью не оказало отрицательного влияния на качество продукции, что позволяет использовать мясо профилактированных кроликов без каких-либо ограничений.

Ключевые слова: ветеринарно-санитарная экспертиза, гамма-облучение, кролики, лучевая болезнь, мясо, радиозащитное средство

Обеспечение населения качественной и безопасной пищевой продукцией, а также совершенствование производства сельскохозяйственного сырья и продовольствия, соответствующих определенным экологическим, санитарно-эпидемиологическим, ветеринарным и другим правилам, являются базовыми позициями в общей Стратегии национальной безопасности Российской Федерации в области продовольственной безопасности [1].

Мясная промышленность является основной частью пищевой отрасли страны, в связи с чем строгое выполнение правил ветеринарно-санитарного контроля мясной продукции непосредственно перед поступлением к потребителям является важным этапом, который должен проводиться в обязательном порядке [2, 3]. При этом отдельное внимание стоит уделять мясу и мясной продукции, полученным от животных, подозрительных в заболевании, профилактированных или перенесших лечение препаратами, в связи с возможным влиянием последних на качество и безопасность получаемой продукции [4-6].

Целью работы явилось исследование качества мяса кроликов разных экспериментальных групп для оценки влияния профилактического радиозащитного препарата на физико-химические показатели.

Материалы и методы

Работа выполнена в Испытательном центре и Лаборатории радиационного контроля и радиозологии ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ». В качестве объекта исследований было выбрано мясо кроликов. Предварительно проводился эксперимент на годовалых кроликах породы Шиншилла, которые по принципу аналогов были разделены на 4 группы (табл. 1). Для профилактики было использовано радиозащитное средство микробного происхождения, а именно продукты метаболизма радиомодифицированного штамма *Escherichia coli* «ПЛ-6» [8]. Радиозащитное средство вводили кроликам однократно подкожно в дозе 1.0 мл за 10 суток до внешнего гамма-облучения.

Таблица 1

Схема исследований

Группа	Количество животных, гол	Характеристика группы	Средняя живая масса, кг
I	5	Биологический контроль	2.82±0.20
II	5	Применение профилактического радиозащитного средства	2.76±0.18
III	5	Применение профилактического радиозащитного средства + внешнее гамма-облучение в ЛД _{100/30} 11 Гр	2.82±0.18
IV	5	Внешнее гамма-облучение в ЛД _{100/30} 11 Гр	2.79±0.18

Качество мяса кроликов оценивалось по следующим параметрам: содержание влаги и сухого вещества (ГОСТ 33319), белка (ГОСТ 25011), жира (ГОСТ

23042), углеводов, количество золы и энергетическая ценность (МУ 4237-86).

Результаты исследований

Данные, полученные при проведении ветеринарно-санитарной оценки качества мяса кроликов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Содержание питательных веществ в мясе кроликов

Показатель	Группа животных			
	I	II	III	IV
Влага, %	72.16±0.29	72.89±0.29	73.40±0.33*	74.01±0.05*
Сухое вещество, %	27.84±0.33	27.11±0.32	26.60±0.37*	25.99±0.06*
Белок, %	21.77±0.41	21.09±0.29	20.64±0.33	20.20±0.11*
Жир, %	6.07±0.11	6.03±0.08	5.96±0.10	5.79±0.06
Зола, %	1.19±0.01	1.19±0.01	1.18±0.01	1.18±0.01
Энергетическая ценность, кДж	593.21±4.28	580.20±6.33	570.25±7.37*	556.39±0.82*

* – Различия статистически значимы по сравнению с контрольными значениями; $p < 0.05$, t -тест

Из представленных в таблице 2 данных следует, что количество питательных веществ (сухое вещество, белок, жир) в образцах мяса, полученных от животных, не подвергнутых внешнему гамма-облучению, выше, чем в образцах мяса от облученных животных: в 1 и 2 группах показатель сухого вещества составил 27.84 % и 27.11 %, соответственно, в то время, как в мясе облученных кроликов (3 и 4 группы) – 26.60 % и 25.99 %. Содержание белка в мясе необлученных животных было выше, чем у облученных – 21.77 % и 21.09 % (1 и 2 группы) против 20.64 % и 20.20 % (3 и 4 группы). Уровень жира так же был выше в мясе необлученных животных – 6.07 % и 6.03 %, в 3 и 4 группах составил 5.96 % и 5.79 %, что на 1.8 % и 4.6 % ниже показателей в образцах мяса группы биологического контроля.

Энергетическая ценность мяса в образцах, полученных от животных после применения профилактического радиозащитного средства, составила 580.20 кДж (2 группа) и 570.25 кДж (3 группа), что на 2.2 % и 3.9 % ниже относительно группы биологического контроля. В образцах мяса от животных 4 группы данный показатель равен 556.39 кДж, что менее энергетической ценности в образцах мяса 1 группы (биоконтроль) на 6.2 %.

В результате проведенной ветеринарно-санитарной оценки образцов мяса кроликов, полученных от разных экспериментальных групп, было установлено, что изученные качественные показатели в мясе на фоне применения радиозащитного средства, не уступают показателям группы биологического контроля, что позволяет использовать данную продукцию без ограничений.

Список литературы

1. Комплексный подход к проблеме обеспечения радиационной безопасности продукции АПК РФ / Г.И. Рахматуллина [и др.] // Молодежь в науке – 2022: тезисы докладов XIX Международной конференции молодых ученых, 2022. С. 380-382.

2. Оценка качества мяса говядины микробиологическим и хромато-масс-спектрометрическим методами / А.А. Саматова [и др.] // Бултеровские сообщения. 2023. Т. 74. № 4. С. 127-132.

3. Паразитологический контроль безопасности пищевых продуктов / А.А. Саматова [и др.] // Ветеринария. 2022. № 6. С. 70-72.

4. Оценка радиационной обстановки в Воронежской области применительно к производственной деятельности АПК / К.Т. Ишмухаметов [и др.] // Ветеринарный врач. 2024. № 1. С. 58-65.

5. Радиозащитное воздействие композиционного аписогенно-монтмориллонитового препарата / М.Ю. Галлямова [и др.] // Зыкинские чтения: сб. матер. нац. науч.-практич. конф., посвящ. памяти д-ра мед. наук, проф. Л.Ф. Зыкина / Под редакцией О.С. Ларионовой, И.А. Сазоновой. Саратов, 2020. С. 54-59.

6. Санитарно-гигиенические показатели продуктов убоя при радиационных поражениях животных на фоне применения радиопротектора на основе веществ микробного происхождения / В.Г. Тюрин [и др.] // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2023. № 1(45). С. 69-76.

7. Хасиятуллин А.Ф. Ветеринарно-санитарная экспертиза мяса поросят, употреблявших корма загрязненные микотоксинами на фоне применения хитин-глюканового комплекса // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2024. Т. 258. № 2. С. 208-213.

8. Оценка биологического и радиозащитного действия метаболитов, полученных от радиомодифицированных вариантов *Escherichia coli*, на лабораторных животных / М.Ю. Галлямова [и др.] // Инновационные решения актуальных вопросов биологической и токсикологической безопасности: сб. матер. Всероссийской науч.-практич. конф. с междунар. участием. Казань, 2023. С. 17-19.

INFLUENCE OF PREVENTIVE RADIOPROTECTIVE AGENT ON THE QUALITY OF RABBIT MEAT

Gallyamova M.Yu.^{1,a}, Semenov V.G.², Ishmukhametov K.T.¹, Kurbangaleev Ya.M.¹, Kalimullin F.H.¹

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Center for toxicological, radiation, and biological safety», Nauchny Gorodok-2 st., Kazan, Russian Federation, 420075

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Chuvash State Agrarian University», K. Marksa str 29, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation, 428003

The paper presents the results of a study of the physicochemical parameters of rabbit meat obtained from different experimental groups. It was revealed that the use of a radioprotective agent for prophylactic purposes did not have a negative impact on the quality of products, which allows the use of meat from prevented rabbits without any restrictions.

Keywords: *veterinary and sanitary examination, gamma irradiation, rabbits, radiation sickness, meat, radioprotective agent*

Providing the population with high-quality and safe food products, as well as improving the production of agricultural raw materials and food that comply with certain environmental, sanitary-epidemiological, veterinary and other rules, are basic positions in the overall National Security Strategy of the Russian Federation in the field of food security.

The purpose of the work was to study the quality of rabbit meat from different experimental groups to assess the effect of a preventive radioprotective drug on physicochemical parameters.

The work was carried out at the Testing Center and Laboratory of Radiation Monitoring and Radioecology of the FSBSI «FCTRBS-ARRVI». Rabbit meat obtained

from four experimental groups was chosen as the object of research.

The quality of rabbit meat was assessed according to the following parameters: moisture and dry matter content, protein, fat, calculation of energy value, carbohydrate content and determination of the amount of ash was carried out according.

As a result of the veterinary and sanitary assessment of rabbit meat samples obtained from different experimental groups, it was found that the studied quality indicators in meat against the background of the use of a radioprotective agent are not inferior to the indicators of the biological control group, which allows the use of these products without restrictions.

УДК 539.1.07

БЫСТРОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Золотов С.А.^a, Близнюк У.А., Студеникин Ф.Р.

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
e-mail: ^a zolotov.sa15@physics.msu.ru

Для упрощения задачи планирования радиационной обработки разработаны программные обеспечения «DosePreview by IRT» и «Demetra by IRT», позволяющие рассчитывать глубинные дозовые распределения и подбирать оптимальные параметры работы ускорителя. В основе «DosePreview» лежит база данных глубинных дозовых распределений от моноэнергетических электронов 0.1 – 20 МэВ, рассчитанная с помощью Geant4. В основе «Demetra by IRT» лежат аналитические зависимости, связывающие характеристики пучка электронов и поверхностную дозу, доставляемую объекту. Разработанные инструменты могут значительно упростить и повысить качество планирования радиационной обработки, что в конечном итоге поможет сократить потери продуктов и обеспечить продовольственную безопасность.

Ключевые слова: *планирование радиационной обработки, глубинные дозовые распределения, Geant4*

В условиях глобального продовольственного кризиса проблема голода становится одной из самых острых и актуальных для человечества. По данным Организации Объединенных Наций, каждый год порядка девяти миллионов человек погибают от голода [1, 2] (для сравнения, смертность от онкологических заболеваний составляет ~10 миллионов человек в год [3]). В то же время почти 30 % всей еды в мире выбрасывается. По данным ООН, накормить мир можно было бы, всего лишь наполовину сократив потери или отходы [4].

Радиационная обработка пищевой и сельскохозяйственной продукции может стать ключевым инструментом в решении мирового продовольственного кризиса. Использование радиационной обработки позволяет продлить срок хранения готовых продуктов и повысить их безопасность за счет подавления патогенных микроорганизмов и паразитов. Радиационная обработка также способна уничтожать вредителей в сельскохозяйственных урожае, что может помочь в борьбе с болезнями растений и увеличить объем годового сбора урожая. Также радиационная обработка может снизить зависимость сельского хозяйства от химических пестицидов, тем самым уменьшая экологическую нагрузку на окружающую среду и снижая риск воздействия химикатов на конечный продукт.

Однако, несмотря на все преимущества радиационной обработки, планирование этого процесса представляет собой значительную сложность. Неправильный выбор дозы или схемы облучения может привести как к недостаточной эффективности обработки, так и к повреждению продукта. Вдобавок, необходимо обеспечить высокую однородность распределения поглощенной дозы по объему объекта. Доставка отдельным частям продукта дозы ниже необходимого уровня ведет к сохранению жизнеспособности патогенных микроорганизмов и вредителей, что не только снижает эффективность обработки, но и создает потенциальные риски для здоровья потребителей. Избыточное облучение негативно сказывается на питательной ценности продукта и его органолептических характеристиках (текстуре, вкусе и визуальных качествах продукта).

Однородность распределения поглощенной дозы оценивается как $K = D_{\min} / D_{\max}$ – отношение минимальной дозы в объеме продукта D_{\min} к максимальной дозе D_{\max} . Как правило, D_{\min} и D_{\max} оцениваются исходя из глубинного распределения поглощенной дозы, рассчитанного методом компьютерного моделирования. Наиболее точным инструментарием для компьютерного моделирования прохождения излучения через вещество является Geant4 (Geant4 Collaboration, CERN, Switzerland) [5-7]. Geant4 содержит в себе наиболее точные и актуальные сечения взаимодействия излучения с веществом и обладает модульной структурой, что позволяет пользователям адаптировать функционал под специфику своих исследований. Но несмотря на свою мощность, Geant4 может быть сложным в освоении для новичков.

Требуется значительное время для того, чтобы понять все нюансы работы с этим инструментарием. Также моделирование с использованием Geant4 требует значительных вычислительных ресурсов. Поэтому интересной представляется задача разработки программного обеспечения для быстрого планирования радиационной обработки, включающего в себя расчет глубинных дозовых распределений и определение параметров работы ускорителя, обеспечивающих рассчитанное распределение. В рамках данной работы были разработаны программы «DosePreview by IRT» [8] и «Demetra by IRT» [9], решающие обозначенные задачи.

Программа «DosePreview by IRT» (находится в открытом доступе [10]) рассчитывает глубинное дозовое распределение по известному энергетическому спектру ускорителя электронов. В основе «DosePreview» лежит рассчитанная с помощью Geant4 база данных глубинных дозовых распределений от моноэнергетических электронов 0.1-20 МэВ. Глубинное дозовое распределение от спектра $\Phi(E)$ рассчитывается как сумма глубинных дозовых распределений, создаваемых моноэнергетическими пучками:

$$D(\Phi(E)) = \sum D(E_i)\Phi(E_i), \quad (1)$$

где $D(E_i)$ – глубинное дозовое распределение, создаваемое электронами с энергией E_i , $\Phi(E_i)$ – вес энергии E_i в спектре $\Phi(E)$, $E_i = i dE$, $dE = 0.1$ МэВ, шаг по энергии в базе данных глубинных дозовых распределений.

Показано, что глубинное дозовое распределение, рассчитанное по формуле (1), отклоняется от глубинного дозового распределения, рассчитанного в Geant4 с использованием спектра $\Phi(E)$, не более, чем на 3 % [11].

Программа «Demetra by IRT» позволяет для заданных параметров обработки D (планируемая поверхностная доза), L (длина объекта), W (ширина объекта) и m (масса объекта) рассчитать оптимальные параметры работы ускорителя, при которых достигается максимальная скорость обработки: H (ширина развертки), E (энергия электронов), I (ток ускорителя), $V_{\text{конв}}$ (скорость конвейера), а также определить необходимость двустороннего облучения. В основе алгоритма лежат аналитические зависимости, связывающие характеристики пучка электронов и поверхностную дозу, доставляемую объекту.

Разработанные инструменты могут значительно упростить и повысить качество планирования радиационной обработки, что в конечном итоге поможет сократить потери продуктов и обеспечить продовольственную безопасность.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2024. The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
2. In world of wealth, 9 million people die every year from hunger, WFP Chief tells Food System Summit | World Food Programme. Дата обращения: 19 января 2023. Архивировано 19 января 2023 года.
3. Глобальное бремя онкологических заболеваний растет / Всемирная Ассоциация Здравоохранения: [сайт] – 2024 – URL: <https://www.who.int/ru/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (дата обращения 20.09.2024).
4. HLPE, 2014. Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome 2014.
5. Recent Developments in Geant4 / *J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis [et al.]* // Nucl. Instrum. Meth. A 835. 2016. PP. 186-225.
6. Geant4 Developments and Applications / *J. Allison [et al.]* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 53. 2006. PP. 270-278.
7. Geant4 – A Simulation Toolkit / *S. Agostinelli [et al.]* // Nucl. Instrum. Meth. A 506. 2003. PP. 250-303.
8. Dose Preview by IRT (свидетельство о регистрации прав на ПО, базу данных). Авторы: Черняев Александр Петрович, Ханкин Вадим Валерьевич, Близняк Ульяна Александровна, Золотов Сергей Александрович, Студеникин Феликс Рикардович. Номер: 2023669628. Дата получения: 18 сентября 2023 г.
9. DEMETRA by IRT (свидетельство о регистрации прав на ПО, базу данных). Авторы: Черняев Александр Петрович, Ханкин Вадим Валерьевич, Близняк Ульяна Александровна, Золотов Сергей Александрович, Студеникин Феликс Рикардович. Номер: 2023669934. Дата получения: 22 сентября 2023 г.
10. Золотов С.А., Близняк У.А., Студеникин Ф.Р. Dose preview by IRT (2023) <https://industrial-rt.ru/dosepreview/>
11. Разработка программы расчета распределения поглощенной дозы по глубине в однородных объектах при радиационной обработке электронами с энергией до 20 МэВ / *С.А. Соколов, У.А. Близняк, П.Ю. Борщеговская [и др.]* // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2023 / Под ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. География. Москва: ООО МАКС Пресс, 2023. С. 1039-1040.

FAST PLANNING OF FOOD AND AGRICULTURAL PRODUCTS RADIATION PROCESSING

Zolotov S.A., Bliznyuk U.A., Studenikin F.R.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

To simplify the task of radiation processing planning, the software «DosePreview by IRT» and «Demetra by IRT» have been developed to calculate the depth dose distributions and select the optimal accelerator operation parameters. «DosePreview» is based on the database of depth dose distributions from monoenergetic electrons 0.1 - 20 MeV, calculated using Geant4. «Demetra by IRT» is based on analytical dependencies that relates the electron beam characteristics and the surface dose delivered to an object The developed tools can greatly simplify and improve the quality of radiation treatment planning, which will ultimately help to reduce product losses and ensure food safety.

Keywords: *radiation treatment planning, depth dose distributions, Geant4*

ВЛИЯНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И ФИТОПАТОГЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАРТОФЕЛЯ СОРТОВ ГАЛА И ФИОЛЕТОВЫЙ

Зубрицкая Я.В.^{1,2,a}, Близняк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Ипатова В.С.², Малюга А.А.³, Никитченко А.Д.¹, Родин И.А.^{1,4}, Черняев А.П.^{1,2}, Чибисова М.С.¹, Чуликова Н.С.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

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 zubritckaia.iv18@physics.msu.ru

Исследование влияния низкоэнергетических электронов и рентгеновского излучения на продуктивность картофеля сорта Гала и Фиолетовый и фитопатогенное состояние их урожая показало различия в эффекте радиационной обработки в зависимости от типа излучения и сорта культуры. Облучение в дозах 15, 20 и 30 Гр ускоренными электронами повысили урожайность сорта Фиолетовый в 1.35, 1.18 и 1.58 раз, а обработка рентгеновским излучением снижала поражение нового урожая сетчатым некрозом до 60.4-66.0 % в сравнении с контролем. Исходя из полученных карт дозовых распределений и распределений показателей линейной передачи энергии, радиационная обработка имеет поверхностный характер. При этом рентгеновское излучение с энергией фотонов 80 кэВ проникает в более глубокие структуры клубней по сравнению с ускоренными электронами с энергией 1 МэВ, но сохраняет высокие показатели линейной передачи энергии в поверхностных слоях. Линейная передача энергии для ускоренных электронов имеет меньшие показатели на поверхности и увеличивается ближе к центру клубней. Подобные различия при облучении дополнялись физиологическими особенностями сортов Гала и Фиолетовый.

Ключевые слова: радиационная обработка, сельское хозяйство, защита растений, картофель, *Rhizoctonia solani*, ускоренные электроны, рентген

Применение радиационной обработки в сельском хозяйстве зарекомендовало себя как экологичный метод борьбы с патогенными грибами, вызывающими такие заболевания растений как фузариоз и альтернариоз [1, 2] или паразитами, такими как клопы и долгоносики [3, 4]. Вместе с этим ионизирующее излучение оказывает влияние и на сам посадочный материал, будь то стимуляция или подавление его ростовых процессов [5]. Требуемые дозы могут зависеть от особенностей культуры. Так, для картофеля значения доз, положительно влияющих на ростовые показатели, в зависимости от сорта могут варьироваться от единиц до десятков Грей [6, 7]. В связи с рекомендациями МАГАТЭ к переходу от радиоактивных источников к контролируемым источникам ионизирующего излучения [8], представляет интерес проведение дополнительных исследований по влиянию поверхностного облучения низкоэнергетическими электронами и тормозными фотонами.

Цель работы заключалась в исследовании влияния обработки низкоэнергетическими электронами и рентгеновским излучением на урожайность и фитосанитарное состояние семенного картофеля.

В качестве объектов исследования был выбран картофель сортов Гала и Фиолетовый с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* (*R. solani*). Облучение клубней в диапазоне доз 5-30 Гр проводилось ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ на линейном ускорителе электронов УЭЛР-1-25-Т-001 (НИИЯФ МГУ, Россия) и рентгеновским излучением с максимальной энергией 80 кэВ на установке РАП-100 с рентгеновской трубкой 1BPV23-100 и молибденовым анодом (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Россия). С учетом малого пробега низкоэнергетических электронов и фотонов в целях повышения равномерности обработки, облучение клубней проводилось с двух противоположных сторон.

Посредством компьютерного моделирования с использованием инструментария Geant4 были получены карты дозового распределения и распределения показателей линейной передачи энергии (ЛПЭ) в клубнях (рис. 1). Карты дозовых распределений (рис. 1 а, б) показали, что для обоих типов излучения большая часть дозы поглощается в верхних слоях клубня, что помогало эффективно бороться со склероциями *R. Solani*, залегающими на поверхности. При этом

рентгеновское излучение также затрагивало более глубокие слои клубней. Карты ЛПЭ распределений для двух типов излучений значительно отличались друг от друга. В то время как для рентгеновского излучения значения ЛПЭ достигали максимума в поверхностных слоях, аналогично его дозовому распределению, для ускоренных электронов значения ЛПЭ были выше во внутренних структурах клубня, в которых находились его питательные запасы.

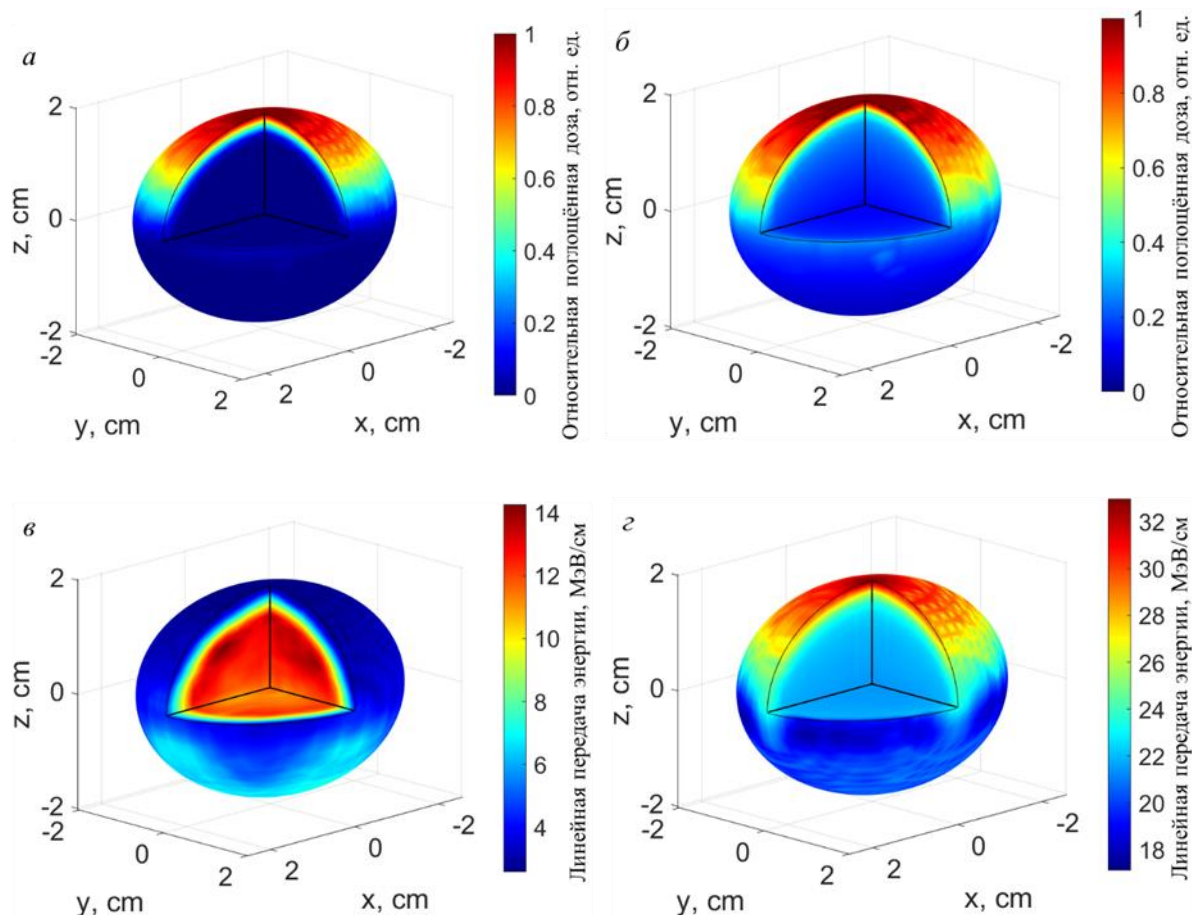


Рисунок 1. Карты распределения (а, б) дозы и (в, г) ЛПЭ в фантоме клубня картофеля при его облучении (а, в) ускоренными электронами с энергией 1 МэВ (б, г) рентгеновским излучением с энергией 80 кэВ

Последующие полевые исследования проводились на опытном поле СФНЦ РАН в почвенно-климатических условиях, типичных для лесостепной зоны Западной Сибири. Для анализа были выбраны такие показатели, как урожайность культуры и степень заражения нового урожая сетчатым некрозом – одной из форм заболевания, вызываемого *R. Solani*.

В результате анализа картофеля сорта Фиолетовый было получено, что обработка рентгеновским излучением в диапазоне 5-30 Гр снижает урожайность культуры, однако активно борется с заболеванием на клубнях нового урожая, снижая его распространение на 15.7-60.4 % (рис. 2). Наименьшее негативное

влияние на урожайность оказывала обработка в дозе 10 Гр, снижая показатель на 10 %. Распространенность сетчатого некроза при этом снижалась на 15.7 %. Облучение ускоренными электронами, в сравнении, менее эффективно боролось с сетчатым некрозом. Наибольший эффект оказала обработка в дозах 10 и 25 Гр, снижая показатель на 33 и 12.8 % относительно контроля. При облучении в дозе 20 Гр распространенность заболевания находилась на уровне контрольного образца. С другой стороны, обработка в дозах 15, 20 и 30 Гр увеличила урожайность культуры в 1.35, 1.18 и 1.58 раз.

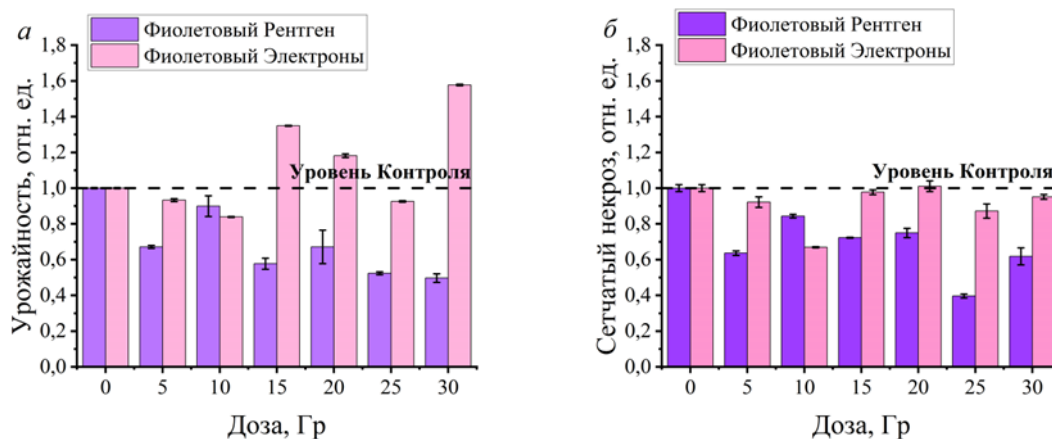


Рисунок 2. Относительные значения (а) урожайности картофеля сорта Фиолетовый и (б) поражения сетчатым некрозом клубней нового урожая

Для сорта Гала обработка любым из используемых видов излучения приводила к снижению продуктивности культуры (рис. 3). Наименьшее негативное воздействие оказывали дозы 5 и 25 Гр в случае рентгеновского излучения и 5 и 30 Гр в случае ускоренных электронов. При облучении в данных дозах урожайность снижалась менее, чем на 6.2 и 20 %, соответственно.

Анализ фитосанитарного состояния показал нелинейную зависимость распространенности

сетчатого некроза на клубнях нового урожая от доз излучения. Наиболее эффективной оказалась обработка рентгеновским излучением в дозах 15 и 30 Гр, при которой распространенность заболевания уменьшалась на 52 и 66 %. При обработке клубней ускоренными электронами в дозах 10 и 15 Гр, спад распространенности сетчатого некроза составил 57 и 56 %, соответственно.

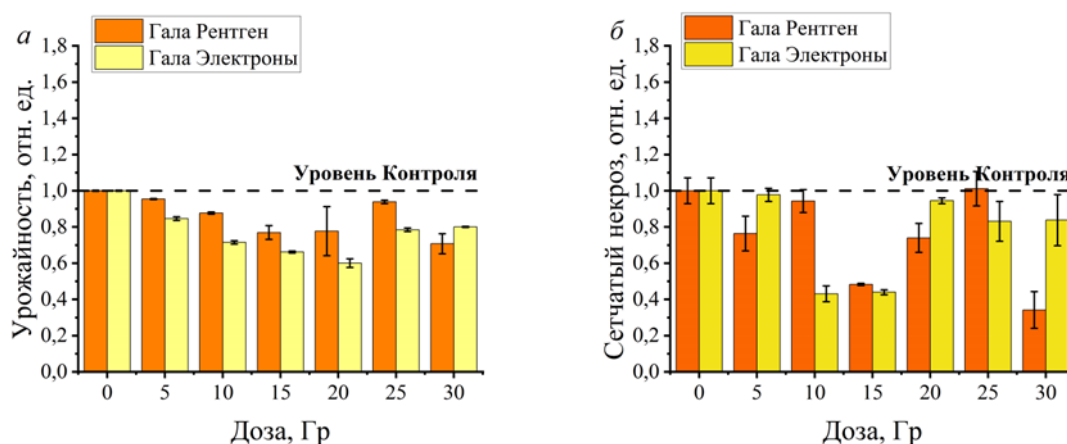


Рисунок 3. Относительные значения (а) урожайности картофеля сорта Гала и (б) поражения сетчатым некрозом клубней нового урожая

Различия во влиянии между сортами могут быть объяснены их морфологическими особенностями [9]. Клубни сорта Фиолетовый характеризуются большей глубиной залегания глазков и высоким содержанием антиоксидантов. Подобное сочетание могло стать причиной сохранения и повышения урожайности культуры при ее поверхностном облучении ускоренными электронами. Картофель сорта Гала характеризуется неглубоким залеганием глазков, из-за чего они подвергались большему влиянию излучения при обработке, что приводило к снижению урожайности. Исходя из полученных результатов эффективными

дозами обработки для картофеля сорта Фиолетовый являются 30 Гр в случае облучения ускоренными электронами и 10 Гр для рентгеновского излучения. Для сорта Гала подобных доз выявлено не было.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Mansur A.R., Yu C.C., Oh D.H. Efficiency of gamma irradiation to inactivate growth and fumonisin

production of *Fusarium moniliforme* on corn grains // Journal of Microbiology and Biotechnology. 2014. V. 24. № 2. PP. 209-216.

2. Влияние импульсной рентгеновской обработки на грибные инфекции в семенах пшеницы / А.А. Ис-емберлинова, С.А. Нужных, М.В. Чубик [и др.] // Современные проблемы радиобиологии, радиозологии и агроэкологии: сборник докладов международной молодежной конференции (Обнинск, 03-04 октября 2019 года). Обнинск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», 2019. С. 268-270.

3. The competitive mating of irradiated brown marmorated stink bugs, *Halyomorpha halys*, for the sterile insect technique / Suckling D. M. [et al.] // Insects. 2019. V. 10. № 11. С. 411.

4. Tilton E.W., Burditt A.K. Insect disinfection of grain and fruit // Preservation of food by ionizing radiation. CRC Press, 2018. PP. 215-229.

5. Effect of proton beam irradiation on germination, seedling growth, and pasting properties of starch in rice / Kim S.K. [et al.] // Journal of Crop Science and Biotechnology. 2012. V. 15. PP. 305-310.

6. Al-Safadi B., Ayyoubi Z., Jawdat D. The effect of gamma irradiation on potato microtuber production in vitro // Plant cell, tissue and organ culture. 2000. V. 61. № 3. PP. 183-187.

7. Impact of gamma irradiation pretreatment on biochemical and molecular responses of potato growing under salt stress / Mohamed E. A. [et al.] // Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2021. V. 8. PP. 1-11.

8. Madsen M. Industrial Irradiation for a Better World. International Atomic Energy Agency. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iaea.org/bulletin/industrial-irradiation-for-a-better-world> (дата обращения: 10.09.2024).

9. Jaromír L., Karel H., Matyáš O. Colored potatoes // Advances in potato chemistry and technology. Academic Press, 2016. PP. 249-281.

EFFECT OF LOW-ENERGY ELECTRON AND X-RAY RADIATION ON PRODUCTIVITY AND PHYTOPATHOGENIC STATUS OF POTATO VARIETIES GALA AND VIOLET

Zubritskaya Ya.V.^{1,2}, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Ipatova V.S.², Malyuga A.A.³, Nikitchenko A.D.¹, Rodin I.A.^{1,4}, Chernyaev A.P.^{1,2}, Chibisova M.S.¹, Chulikova N.S.³, 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 Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Central st. 2B, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Russian Federation, 630501

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

The study of the effect of low-energy electrons and X-ray irradiation on productivity of potato varieties Gala and Fioletovy and phytopathogenic status of their yields showed differences in the effect of radiation treatment depending on the type of radiation and crop variety. Irradiation at doses of 15, 20 and 30 Gy by accelerated electrons increased the yield of the Fioletovy variety 1.35, 1.18 and 1.58 times, while X-ray treatment reduced the new crop damage by net necrosis up to 60.4-66.0 % in comparison with the control. Based on the obtained maps of dose and Linear energy transfer (LET) distributions, radiation treatment has a superficial character. X-rays penetrate into deeper tuber structures compared to accelerated electrons, but retain high LET values in surface layers. The LET for accelerated electrons has lower values at the surface and increases closer to the center of the tubers. Such differences in irradiation were complemented by physiological features of Gala and Fioletovy varieties.

Keywords: radiation treatment, agriculture, plant protection, potato, *Rhizoctonia solani*, accelerated electrons, X-ray

The usage of radiation treatment in agriculture has proven to be an environmentally friendly method of controlling pathogenic fungi and pests on plants. At the same time, ionizing radiation also affects the planting material itself, whether it stimulates or suppresses its

growth processes. The doses required may depend on the characteristics of the crop and the ionizing radiation. The aim of the study was to investigate the effect of treatment with low-energy electrons and X-rays on yield and phytosanitary condition of seed potatoes.

Potato varieties Gala and Fioletovy with natural infection by the fungus *Rhizoctonia solani* (*R. solani*) were selected as research objects. Irradiation of tubers in the dose range of 5-30 Gy was carried out with 1 MeV accelerated electrons generated by a continuous electron accelerator UELR-1-25-T-001 with a maximum energy of 1 MeV and RAP-100 X-ray apparatus with a 1VRV23-100 X-ray tube with the molybdenum anode.

Maps of dose distribution and linear energy transfer index (LET) distribution in tubers were obtained by computer modeling using Geant4 toolbox. For both types of radiation, most of the dose was absorbed in the upper layers of the tuber, but X-rays also affected deeper tuber layers. For X-rays, the LET values reached a maximum in the surface layers, similar to its dose distribution, while for accelerated electrons, the LET values were higher in the inner structures of the tuber, where its nutrient stores were located.

It was obtained that treatment of potato variety Fioletovy with X-ray radiation in the range of 5-30 Gy reduces the crop yield, but actively fights with net necrosis on tubers of new crop, reducing its spread by 15.7-60.4 %. Irradiation with accelerated electrons, in comparison, was less effective against reticular

necrosis. On the other hand, irradiation at doses of 15, 20 and 30 Gy increased crop yields by 1.35, 1.18 and 1.58 times.

For variety Gala, treatment with any of the used types of radiation led to a decrease in crop productivity. Analysis of phytosanitary condition showed non-linear dependence of the spread of net necrosis on tubers of new crop on radiation doses. The most effective was the treatment with X-ray radiation in doses of 15 and 30 Gy, at which the prevalence of the disease decreased by 52 and 66 %. When tubers were treated with accelerated electrons at doses of 10 and 15 Gy, the reduction in the prevalence of net necrosis was 57 and 56 %, respectively.

Variations in the effect obtained from radiation treatment could be due to differences in the interaction of accelerated electrons and X-rays with matter, as well as morphological features of potato varieties, such as eye depth and chemical composition.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. №22-63-00075) for Lomonosov Moscow State University

УДК 637.07, 637.137, 637.143

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ В ПРИМЕНЕНИИ ХОЛОДНОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МОЛОЧНЫХ КОНСЕРВОВ

Ильюхина Ю.В.^а, Тимакова Р.Т.

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: ^аjanine86@mail.ru

Микробиологическая безопасность сухих молочных консервов – сухого кобыльего молока сублимационной сушки обеспечивается технологическим эффектом в результате холодной стерилизации сухого молока. Установлена возможность пролонгированного воздействия на сохранение органолептических показателей сухого молока и инактивационного воздействия на микроорганизмы, количественное содержание которых соответствует требованиями технического регламента ТР ТС 033/2013 при хранении до 24 месяцев. Эффективность применения излучения определена полученными положительными результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: доза, кГр, холодная стерилизация, гамма-излучение, сухое молоко, молочные консервы

Молоко и продукция его переработки относятся к категории скоропортящихся и особоскоропортящихся продуктов, требующих особых условий хранения и отличающихся короткими сроками годности согласно требованию СанПиН 2.3.2.1324-03 «Гигиенические требования к срокам годности и условиям хранения пищевых продуктов», что требует совершенных способов их предохранения от порчи. Консервирование молочной продукции основано на принципах абииоза/осмоанабииоза/ксеноанабииоза. Хранимоспособность сухого молока определяется

качеством исходного сырья, технологическими параметрами сушки (температура, продолжительность обработки, непрерывность и цикличность процессов) и условиями хранения [1].

После проведения низкотемпературной пастеризации активизируется процесс спорообразования клостридий и реактивируются кишечная палочка и стафилококк [2].

В этих условиях обработки молока потоком ускоренных электронов дозой до 10 кГр способствует уничтожению микрофлоры до регламентируемых

показателей, отмечают [3], сохраняя пищевую ценность продукта и органолептические показатели [4]. Однако ускоренные электроны обладают меньшей проникающей способностью.

Соответственно, эффективность обработки зависит от вида облучателя и дозы излучения, микробиологической обсемененности и других факторов [5].

Обработка сухого кобыльего молока разными дозами γ -излучения в пределах 1.5-2.5 кГр обеспечивает соответствие микрофлоры требованиям технических регламентов [6].

В процессе дальнейшего хранения сухих молочных консервов возможна повторная контаминация и увеличение микробиологической обсемененности продукта, что приводит к порче продукта.

Цель исследования – оценка динамики регламентируемых микробиологических показателей в сухом кобыльем молоке в процессе хранения.

Объект и методы исследований

Для проведения эксперимента сырое кобылье молоко было высушено в результате лиофилизации и затем обработано дозой γ -излучения 2.5 кГр в Региональном центре облучательных технологий «Эра». Источники гамма-облучения – Co^{60} [7]. Микробиологические показатели установлены по стандартизованным методикам в аккредитированной лаборатории.

Результаты исследований

Опытным путем установлено, что в процессе холодной стерилизации в сухом молоке сохранена целостность пищевой системы; органолептические показатели соответствовали требованиям ГОСТ Р 52975-2008. Вкус, запах и цвет молока не изменились, не зафиксировано изменение сыпучести молока, не произошло агломерирование частиц сухого молока.

Общая обсемененность определялась по КМАФАнМ в образцах молока, обработанных излучением, на периоде хранения до 24 месяцев. Результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

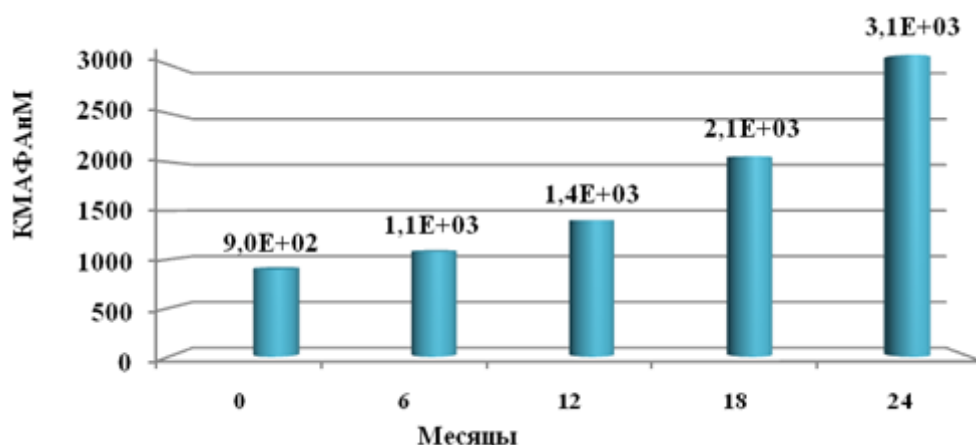


Рисунок 1. Динамика показателя КМАФАнМ в сухом кобыльем молоке в процессе хранения

По результатам проведенных исследований установлено, что в результате обработки γ -излучением дозой 2.5 кГр КМАФАнМ уменьшилось более чем в 300 раз, при этом в процессе хранения до 12 месяцев увеличение КМАФАнМ выявлено в 1.6 раза с последующим нарастанием количества микроорганизмов после 18 месяцев хранения. В тоже время количественные параметры показателя КМАФАнМ соответствуют требованиям технического регламента ТР ТС 033/2013, в образцах не обнаружены БГКП, *Staphylococcus aureus* и *Salmonella*. В процессе хранения органолептические показатели не изменились.

Таким образом, пролонгированный эффект сохранения молочных консервов, в частности сухого кобыльего молока, обусловлен на первом этапе консервирующим фактором обезвоживания продукта, на втором этапе – абиотическим воздействием на микробную среду в результате холодной стерилизации

без температурного воздействия на продукт. Эффективность холодной стерилизации доказана в процессе хранения, исходя из поставленных целей, что повышает потребительскую ценность сухих молочных консервов и способствует продлению сроков годности.

Список литературы

1. Тимакова П.Т. Радиационная обработка молока // Молочная промышленность. 2020. № 5. С. 30-31.
2. Свириденко Г.М., Комарова Т.В., Ускова Е.Е. Исследование остаточной микрофлоры молока после пастеризации // Пищевые системы. 2022. Т. 5. № 4. С. 344-352. doi: 10.21323/2618-9771-2022-5-4-344-352.
3. Изменение аминокислотного состава молока при стерилизации бета-излучением /

А.С. Кривоногова, А.А. Баранова, П.С. Кривоногов [и др.] // Ветеринария Кубани. 2015. № 5. С. 22-25.

4. Рогов И.А., Чоманов У.Ч., Данильчук Т.Н. Эффективность метода обработки быстрыми электронами для снижения порчи пищевого сырья и продовольственных товаров // Health, Food & Biotechnology. 2020. Т. 2. № 1. С. 84-97. DOI: 10.36107/hfb.2020.il.s291.

5. 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 / Под редакцией Н.И. Санжаровой. Обнинск, 2023. С. 9-16..

6. Тимакова Р.Т., Ильюхина Ю.В., Старцев В.Г. Влияние низкодозового γ -излучения на безопасность сублимированного кобыльего молока // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 82-86. DOI: 10.53859/02352451_2023_37_7_0.

7. Патент № RU 2811463 С1, Российская Федерация. МПК А23С 9/00. Способ производства сухого кобыльего молока: 2022133034; заявл. 15.12.2022, опубл. 12.01.2024 / Р.Т. Тимакова (RU), В.Г. Старцев (RU), Ю.В. Ильюхина (RU) [и др.] // Заявители и патентообладатели: ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет» (RU), Крестьянское фермерское хозяйство Старцев В.Г. (RU). 20 с.

TECHNOLOGICAL FEATURES IN THE APPLICATION OF COLD STERILIZATION FOR PROCESSING CANNED MILK

Ilyukhina Iu.V., Timakova R.T.

Ural State University of Economic, 8 Marta st./Narodnaya Volya 62/45, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, Russian Federation, 620144

The microbiological safety of canned milk powder – freeze-dried mare's milk powder is ensured by the technological effect as a result of cold sterilization of milk powder. The possibility of prolonged exposure to the preservation of organoleptic parameters of milk powder and inactivation effects on microorganisms, the quantitative content of which meets the requirements of technical regulations TR CU 033/2013, when stored for up to 24 months, has been established. The effectiveness of the radiation application is determined by the obtained positive results of experimental studies

Keywords: dose, kGy, cold sterilization, gamma radiation, milk powder, canned milk

УДК: 539.1.047

ВЛИЯНИЕ ПРЕДПОСЕВНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЕННОГО КАРТОФЕЛЯ НА БИОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛИ КЛУБНЕЙ НОВОГО УРОЖАЯ

Ипатова В.С.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Болотник Т.А.³, Зубрицкая Я.В.^{1,2}, Козлова Е.К.^{2,4}, Малюга А.А.⁵, Никитченко А.Д.², Опруненко А.Ю.³, Родин И.А.^{3,4}, Чуликова Н.С.⁵, Черняев А.П.^{1,2}

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

⁵ 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: ^a ipatova.vs15@physics.msu.ru

Проведено исследование влияния низкоэнергетических ускоренных электронов и рентгеновского излучения на биохимические показатели картофеля, выращенного из двух сортов семенного картофеля, с целью повышения надежности методов предпосевного облучения семенного картофеля. Анализ восстанавливающих сахаров спустя 4 месяца хранения показал увеличение их концентрации в клубнях нового урожая сорта Гала и снижение в клубнях сорта Фиолетовый. ГХ-МС анализ летучих органических соединений показал, что предпосевное облучение семенного картофеля приводит к заметным различиям в содержании альдегидов, кетонов, спиртов и углеводов в течение четырехмесячного хранения клубней картофеля. Было показано, что различные летучие соединения, такие как бутаналь, 3-метил, изопропанол и 2,3-бутандион могут служить индикатором окислительных, ферментативных и гнилостных процессов в картофеле во время хранения. Обнаружены потенциальные биохимические маркеры воздействия ионизирующего излучения на семенной картофель в клубнях нового урожая спустя 4 месяца хранения.

Ключевые слова: ускоренные электроны, рентгеновское излучение, картофель, восстанавливающие сахара, летучие органические соединения, газовая хромато-масс спектрометрия, биохимические маркеры

Радиационные технологии широко применяются во многих сферах жизнедеятельности человека, способствуя прогрессу в здравоохранении, промышленности, защите окружающей среды и производстве энергии [1, 2]. При планировании облучения различных биообъектов и живых организмов необходимо уделять особое внимание радиочувствительности объектов [3]. Воздействие ионизирующего излучения на биологические мишени (жиры, белки, углеводы, мембраны клеток и пр.) в различных биообъектах может значительно изменить клеточные функции и способствовать биологическому повреждению. Помимо этого, при окислении этих биомишеней образуются различные высоко- и низкомолекулярные соединения, которые могут способствовать дальнейшему распространению окислительного повреждения в клетках [4]. Понимание этих взаимодействий имеет решающее значение для оценки рисков, связанных с радиационным воздействием, и разработки защитных мер в медицине и промышленности.

Цель работы заключалась в исследовании влияния обработки семенного картофеля низкоэнергетическими электронами и рентгеновским излучением на биохимические показатели нового урожая при его длительном хранении.

В качестве объектов исследования был выбран картофель сортов Гала и Фиолетовый с естественным заражением грибом *Rhizoctonia solani* (*R. solani*). Семенной материал облучался на ускорителе электронов УЭЛР-1-25-Т-001 (НИИЯФ МГУ, Россия) с максимальной энергией 1 МэВ и на рентгеновском аппарате

РАП-100 с рентгеновской трубкой 1BPV23-100 и молибденовым анодом, максимальная энергия тормозных фотонов – 80 кэВ (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Россия). Для обеспечения максимальной равномерности дозы облучение клубней проводилось с двух противоположных сторон.

Определение восстанавливающих сахаров (ВС) в контрольных и облученных клубнях картофеля нового урожая проводилось спектрофотометрическим методом согласно ГОСТ Р 54905-2012. Для этого картофель предварительно перетирали на терке и из каждой пробы взвешивали по 5 г в пластиковые стаканчики, далее добавляли 12,5 мл воды и помещали на шейкер на 1ч 30 мин, а затем – в ультразвуковую баню на 30 мин. Полученные экстракты переносили в центрифужные пробирки вместимостью 50 мл и центрифугировали в течение 10 мин при 7500 об/мин. Отфильтрованную надосадочную жидкость в объеме 1 мл, содержащую определенную концентрацию ВС, смешивали с 1 мл 0.705 М ацетатного буфера и затем добавляли в смесь 3 мл реагента 3,5-динитросалициловой кислоты (ДНС) и инкубировали на кипящей водяной бане в течении 5 мин. Далее пробирку с реакционной смесью охлаждали под струей холодной воды до комнатной температуры. После этого проводилось определение оптической плотности проб при длине волны 540 нм, в качестве холостой пробы использовался раствор, содержащий 2 мл буфера и 3 мл ДНС.

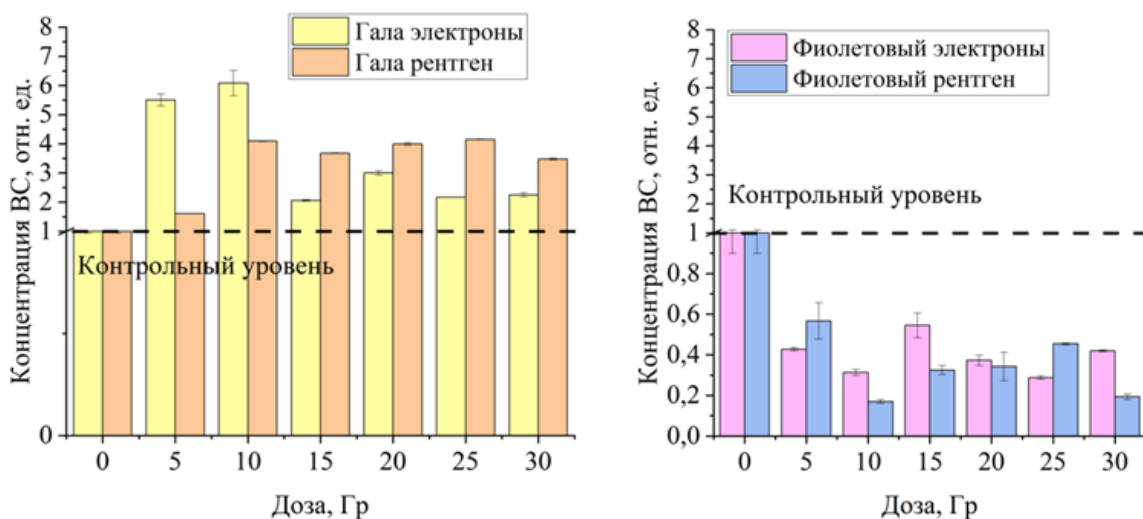


Рисунок 1. Гистограммы зависимости восстанавливающих сахаров в клубнях нового урожая сорта Гала (слева) и Фиолетовый (справа) от дозы облучения ускоренными электронами и тормозными фотонами спустя 4 месяца хранения

Для образцов сорта Гала наблюдалось устойчивое увеличение ВС для обоих видов излучения в более чем в 1.5-6.0 раз (рис. 1). При этом для клубней сорта Фиолетовый концентрация ВС нелинейно снижалась в более чем 2 раза от дозы облучения при обработке ускоренными электронами и тормозными фотонами. Снижение восстанавливающих сахаров указывает на ингибирование прорастания клубней картофеля, в то время как их увеличение напротив, на стимуляцию роста [5].

Газовый хромато-масс-спектрометрический анализ (ГХ-МС) позволил выявить большое количество разнообразных летучих органических соединений в клубнях нового урожая спустя 4 месяца хранения: 15 соединений в картофеле сорта Гала и 21 соединение в картофеле сорта Фиолетовый. На рисунке 2 представлены зависимости содержания наиболее интересных соединений, которые показали четкую зависимость от дозы или резкое различие в поведении после облучения электронным пучком и рентгеновским облучением.

Данные летучие соединения могут являться косвенными показателями различных биохимических

процессов, происходящих в картофеле при его хранении. Так, альдегиды (бутаналь, 3-метил) могут быть индикаторами окислительных процессов, спирты и кетоны (изопропанола и 2,3-бутандиона) могут указывать на ферментативные процессы и последующие этому процессы гниения картофеля. Наличие в образцах углеводорода о-ксилла может быть объяснено влиянием химической обработки в процессе ухода за посадками. Однако прямой корреляции между концентрациями ВС и содержанием летучих органических соединений в данном исследовании для обоих сортов картофеля выявлено не было.

Помимо этого, в клубнях нового урожая, полученных из облученного семенного материала, были обнаружены соединения, которые отсутствовали в контрольных образцах (рис. 3), а именно: спирт 2-пропанол, 1-этокс и кетон 2-гексанон, 3-метил у картофеля сорта Фиолетовый и спирт 1-пропанол, 2-метил у сорта Гала.

Данные соединения могут служить индикаторами проведения радиационной обработки предпосевных клубней картофеля, что является на сегодняшний день одной из актуальных научных задач [6, 7].

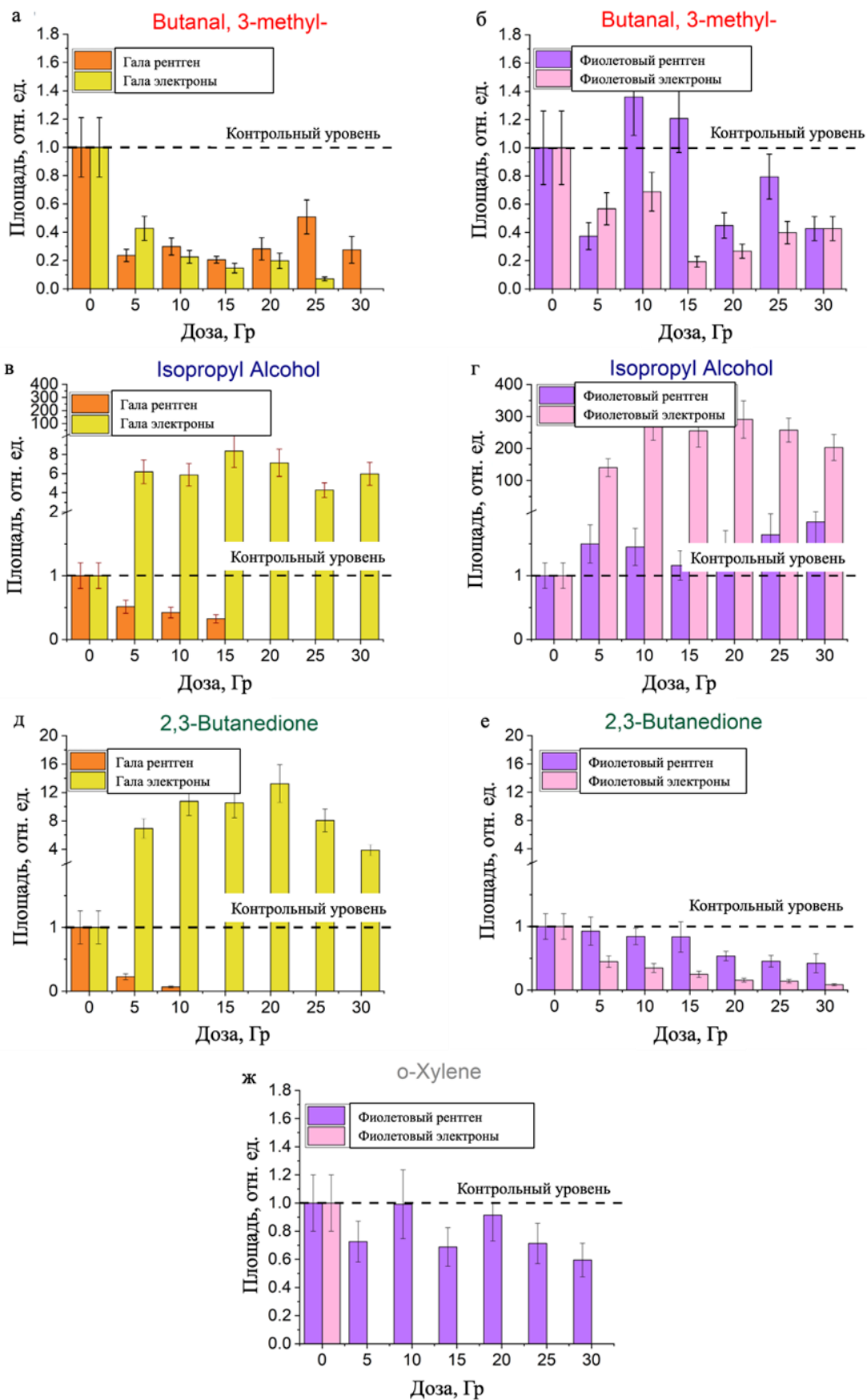


Рисунок 2. Гистограммы содержания бутаналь,3-метила (**а, б**), изопропилового спирта (**в, г**), 2,3-бутандиона (**д, е**) и о-ксилол (**ж**) в клубнях картофеля сортов Гала (**а, в, д**) и Фиолетовый (**б, г, е, ж**), выращенных из картофеля, облученного ускоренными электронами и тормозными фотонами

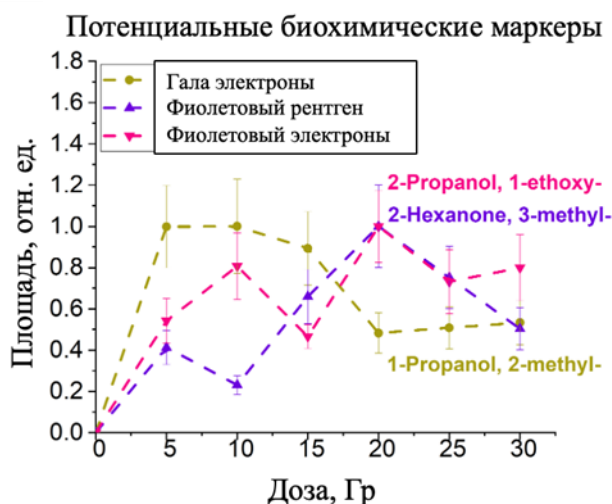


Рисунок 3. Зависимость содержания спирта 1-пропанол,2-метил в образцах картофеля сорта Гала (желтые точки), спирта 2-пропанол,1-этокс и кетона 2-гексанон,3-метил в образцах картофеля сорта Фиолетовый (розовые и фиолетовые точки) от дозы облучения

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. М.: МГУ, 2019. 231 с.
2. Chmielewski A.G. Radiation technologies: The future is today // Radiation Physics and Chemistry. 2023. V. 213(2). P. 111233.
3. Dileep S.Y., Manasa K. Irradiation in food processing: A Review // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2018. PP. 905-912.
4. Xiong Y. L., Guo A. Animal and Plant Protein Oxidation: Chemical and Functional Property Significance // Foods. 2020. V. 10. № 1. P. 40.

5. Исследование воздействия рентгеновского излучения на концентрацию восстанавливающих сахаров в картофеле и на его прорастание / В.М. Авдюхина, У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская [и др.] // Вестник МГУ. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. № 3. С. 99-103.

6. Identification of volatile markers in potato brown rot and ring rot by combined GC-MS and PTR-MS techniques: Study on in vitro and in vivo samples / S. Blasioli, E. Biondi, D. Samudrala [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2014. V. 62. PP. 337-347.

7. Volatile Organic Compounds and Physiological Parameters as Markers of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Infection with Phytopathogens / A. Steglinska, K. Pielech-Przybylska, R. Janas [et al.] // Molecules. 2022. V. 27. P. 3708.

INFLUENCE OF PRE-SOWING RADIATION TREATMENT OF SEED POTATOES ON BIOCHEMICAL PARAMETERS OF NEW HARVEST TUBERS

Ipatova V.S.¹, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Bolotnik T.A.³, Zubritskaya Y.V.^{1,2}, Kozlova E.K.^{2,4}, Malyuga A.A.⁵, Nikitchenko A.D.², Oprunenko A.Yu.³, Rodin I.A.^{3,4}, Chulikova N.S.⁵, Chernyaev A.P.^{1,2}

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

²Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Physics), Leninskie Gory 1, bld. 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Chemistry), Leninskie Gory 1, bld. 3, Moscow, Russian Federation, 119991

⁴Federal 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

⁵Siberian Federal Scientific Center of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Central st. 2B, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Novosibirsk district, Russian Federation, 630501

The effect of low-energy accelerated electrons and X-ray radiation on biochemical parameters of potatoes grown from two varieties of seed potatoes was studied in order to improve the reliability of methods of pre-sowing irradiation of seed potatoes. Analysis of reducing sugars after 4 months of storage showed an increase in their concentration in tubers of the new crop variety Gala and a decrease in tubers of the variety Purple. GC-MS analysis of volatile organic compounds showed that pre-sowing irradiation of seed potatoes resulted in marked differences in the content of aldehydes, ketones, alcohols and hydrocarbons during four months storage of potato tubers. It has been shown that various volatile compounds such as butanal, 3-methyl, isopropanol and 2,3-butanedione can serve as indicators of oxidative, enzymatic and putrefactive processes in potatoes during storage. Potential biochemical markers of the impact of ionizing radiation on seed potatoes in new harvest tubers after 4 months of storage were found.

Keywords: *accelerated electrons, X-ray, potato, reducing sugars, volatile organic compounds, gas chromatography-mass spectrometry, biochemical markers*

УДК 637.07-636.033

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ УБОЯ БЫЧКОВ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАТРИЯ НУКЛЕИНАТА И ЭСТРОГЕННОГО ПРЕПАРАТА КОРОВАМ-МАТЕРЯМ ДО ОТЕЛА

Кляпнев А.В.^{1,а}, Семенов В.Г.^{2,б}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева», 603107, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный аграрный университет», 428003, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 29, Чувашская Республика, Российская Федерация
e-mail: ^а a_klyapnev@mail.ru, ^б semenov_v.g@list.ru

Животноводческая продукция в обязательном порядке должна проходить ветеринарно-санитарную экспертизу для защиты здоровья населения РФ. В статье представлены результаты ветеринарно-санитарной экспертизы продуктов убоя бычков черно-пестрой голштинизированной породы после сочетанного использования натрия нуклеината и синэстрола 2 % их матерям-коровам в условиях молочно-товарной фермы Нижегородской области. Проводили ветеринарно-санитарный осмотр туш и внутренних органов, лабораторные исследования мяса. Оценивали органолептические, микробиологические, физико-химические показатели образцов мяса, аминокислотный азот, а также содержание в них тяжелых металлов (свинца, кадмия, мышьяка и ртути), измеряли активность радионуклидов стронция-90 и цезия-137. Исследованные продукты убоя признаны безопасными и качественными.

Ключевые слова: *иммуностимуляторы, бычки, продукты убоя, мясо, ветеринарно-санитарная экспертиза, биобезопасность*

Целью работы стало определение безопасности и качества мяса бычков, матерям-коровам которых инъецировали иммуностимулирующий препарат натрия нуклеинат и аналог эстрогенов синэстрол 2 % за 3-9 суток до отела.

Материал и методы исследования

Научно-хозяйственный опыт проведен на молочно-товарной ферме СПК Нижегородской области. Лабораторные исследования мяса выполнены на базе Арзамасской межрайонной ветеринарной лаборатории и Нижегородского филиала ФГБУ ВНИИЗЖ.

Для проведения исследований были сформированы 2 группы глубокоостельных коров. До отела коровам 1-й группы инъецировали физ. раствор (контрольная группа), коровам 2-й группы сочетанно инъецировали иммуностимулятор натрия нуклеинат и синэстрол 2 % в соответствии с инструкциями по применению (опытная группа). От подопытных коров были получены бычки, которых распределили в группы, соответствующие их матерям-коровам. Для оценки качества мяса бычков разных групп проводили контрольный убой в 18 мес. трех животных из каждой группы.

Проводили ветеринарно-санитарный осмотр продуктов убоя животных. Образцы говядины

исследовались с помощью микроскопических, органолептических, физико-химических методов исследований. Осмотр начинали с головы. Обязательному исследованию подлежали нижнечелюстные, околушные, заглочные средние и боковые лимфатические узлы. При осмотре головы обращали внимание на состояние слизистой оболочки ротовой полости, а также на губы, десны и язык. Массетеры разрезались с каждой стороны с целью обнаружения цистицеркоза. Наружные массетеры разрезались двумя разрезами, а внутренние – одним. Исследование ливера проводили после осмотра головы, для этого он вынимался в естественной связи с трахеей, подвешивался на крючок. Ливер при осмотре поворачивали средостением к себе. Проводили вскрытие средостенных, а также бронхиальных лимфатических узлов. Исследовались легкие прощупыванием, а затем вскрытием каждого легкого, параллельно средостению. Проводили исследование сердца. Осматривали перикард, эпикард. Разрезали сердце, исследуя эндокард и клапанный аппарат. Определяли наличие остатков крови. После исследования сердца, проводили осмотр печени. Обращали внимание на ее цвет и размеры. Вскрывали порталные лимфоузлы. Осмотр печени проводился с целью обнаружения гноя. Гной может появиться в результате деятельности гнилостных микроорганизмов или же актиномикозного поражения. Печень разрезали, вскрывали желчные ходы с целью обнаружения фасциол, дикроцелиумов, эхинококков, бруцеллезных и туберкулезных узелков. Затем осматривали селезенку. Обращали внимание на размеры, края. Почку осматривали, прощупывали. Вскрытие почек не проводилось. Проводили вскрытие почечных лимфоузлов. Проводили осмотр желудка, желудочных лимфатических узлов.

После проведения осмотра внутренних органов переходили к осмотру туши. При этом обращали внимание на степень обескровливания, наличие инфильтратов, кровоизлияний. Осматривали костальную плевру и брюшину. На цистицеркоз исследовали остаток диафрагмы. Вскрытие лимфатических узлов на туше не проводили из-за отсутствия показаний.

Микроскопическому исследованию подвергались все образцы мяса. Проводилось оно согласно ГОСТ 21237-75. Данный стандарт распространяется на мясо и субпродукты от всех видов убойного скота, устанавливает методы микроскопического и бактериологического исследования. Определяли количество микроорганизмов на поверхности мяса и в более глубоких слоях туши. От количества микроорганизмов зависит сохранность мяса и его качество. Для исследования поверхностных слоев обожженного предметное стекло прикладывали к поверхности мяса, делая 5 мазков-отпечатков с каждого образца мышечной ткани или органа. Приготовленные мазки-отпечатки просушивали на воздухе, фиксировали над пламенем спиртовой горелки и окрашивали по Граму.

Приготовленные препараты рассматривали под микроскопом с иммерсией. Для определения микробиологической безопасности мяса подсчитывали количество бактерий в поле зрения. На каждом предметном стекле исследовали не менее 25 полей зрения. Для микробиологической оценки глубинных слоев из образцов мяса стерильными ножницами вырезали небольшие кусочки с предварительно обожженной шпателем поверхности мышечной ткани или органа. Срезанной стороной кусочки мяса прикладывали к обожженному предметному стеклу. Готовые отпечатки мазков из глубинных слоев мяса фиксировали над пламенем горелки и окрашивали по Граму. Готовые препараты внимательно рассматривали под микроскопом с иммерсией, при этом подсчитывали количество бактерий в поле зрения. На предметном стекле исследовали не менее 25 полей зрения.

Органолептические исследования проводились согласно ГОСТ 7269-2015. Согласно данному ГОСТ, определяли внешний вид и цвет, консистенцию, запах, состояние жира и сухожилий, прозрачность и запах бульона. Физико-химические исследования проводились согласно ГОСТ 23392-2016. На мясо всех видов убойных животных распространяется данный стандарт, он устанавливает методы физико-химического анализа свежести. Мы проводили: реакцию с сернистой медью, реакцию на пероксидазу, а также определяли pH.

Содержание amino-аммиачного азота определяли по ГОСТР 55479-2013 Мясо и мясные продукты. Метод определения amino-аммиачного азота.

Определение в мышечной ткани содержания тяжелых металлов: свинца и кадмия – по ГОСТ 30178-96; мышьяка – по ГОСТ 26930-86; ртути – по ГОСТ 26927-86. Уровни радионуклидов цезия-137 и стронция-90 определяли в соответствии с МУК 2.6.1.1194-03.

Результаты исследования

Ветеринарно-санитарную экспертизу начинали с осмотра продуктов убоя подопытных животных. Сначала осматривали голову. Проводили осмотр лимфатических узлов нижнечелюстных, околушных, заглочных средних и боковых. При осмотре лимфатических узлов патологических изменений обнаружено не было. Также обращали внимание на состояние слизистой оболочки ротовой полости, осматривали губы, десны и язык. При осмотре слизистых оболочек, повреждений и изменений не обнаружили. Наружные массетеры разрезали двумя разрезами, а внутренние – одним. Цистицерков не выявили. После осмотра головы приступали к осмотру ливера. Проводили вскрытие средостенных и бронхиальных лимфатических узлов. Лимфатические узлы имели нормальные размеры и цвет. Легкие прощупывали, затем вскрывали, параллельно средостению, при этом патологических изменений в них не установлено. Проводили исследование сердца. Сердце конусовидной формы, толщина мышечной стенки правого

и левого желудочков находилось в соотношении 1:3. Цвет красный, состояние жировой ткани в норме. Проводили два продольных и поперечных разреза, цистицерков не обнаружили. Осматривали печень. Цвет печени красно-коричневый, она не увеличена. Печень пальпировали, неприятного запаха и гнойного поражения не было. Разрезали печень и желчные ходы, при этом фасциол, дикроцелиумов, эхинококков, бруцеллезных и туберкулезных узелков не выявили. Осматривали селезенку, при осмотре отклонений от нормы не выявили. Цвет селезенки красно-коричневый, с наличием полосок-трабекул серо-белого цвета. Почка плотной консистенции, красно-бурого цвета, не вскрывались, т.к. для этого показаний не было. Почечные лимфоузлы в норме. При осмотре желудка, желудочных лимфатических узлов изменений не выявлено. Переходили к осмотру туши. Туша обескровлена, инфильтраты и кровоизлияния отсутствовали. При исследовании остатка диафрагмы цистицерков не обнаружили. Показания для вскрытия лимфатических узлов отсутствовали.

Проводили определение количества микроорганизмов в образцах и глубинных слоях мяса. В процессе исследования образцов мяса мы получили следующие результаты: количество кокков и палочковидных бактерий в пробах мяса контрольной группы составило 1.40 ± 0.10 , в пробах мяса опытной – 1.20 ± 0.05 . Следы распада мышечной ткани во всех пробах отсутствовали, что свидетельствовало о свежести всех образцов. При оценивании органолептических показателей мяса установили, что у всех проб мяса имелась корочка подсыхания. Мясо было темно-красного цвета. Консистенция плотная и упругая (ямка при надавливании быстро выравнивалась). Запах специфичный для говядины. Жир имел белый оттенок, при раздавливании был плотным. Запах прогоркания жира отсутствовал. Сухожилия упругие и плотные. Бульон прозрачный, запах специфичный для мясного бульона из свежей говядины.

Оценивали результаты реакции с сернокислородной медью. В результате проведенной реакции бульон после мяса, полученного от подопытных животных, был прозрачным, осадок и хлопья отсутствовали, т.е. реакция была отрицательной во всех пробах. При проведении реакции на пероксидазу установили, что вытяжка из мяса, полученного от подопытных животных, в течение минуты приобрела сине-зеленый цвет, который быстро изменился на буро-коричневый. Таким образом, реакция была положительной во всех пробах.

По результатам исследования уровень pH мяса у образцов 1-й и 2-ой групп составил соответственно 5.70 ± 0.10 и 5.60 ± 0.05 . Проводили исследование уровня амино-аммиачного азота в образцах говядины. Установили, что пробы мяса, полученные от бычков 1-й группы, содержали 0.95 ± 0.09 мг амино-аммиачного азота, от бычков 2-й группы – 0.80 ± 0.05 мг, т.е. уровень данного соединения был в норме, что свидетельствует о доброкачественности всех проб мяса.

Содержание свинца составило 0.08 ± 0.03 мг/кг в мясе животных 1 группы, 0.06 ± 0.02 мг/кг – 2 группы. Мышьяк, ртуть и кадмий во всех пробах не обнаружены. Радиологическое исследование животноводческой продукции является крайне важным при исследовании ее безопасности [1-3]. В образцах мяса подопытных бычков удельная активность цезия-137 составила 3.20 Бк/кг, при допустимом уровне 200.0 Бк/кг, а стронция-90 – отсутствовала.

Заключение

В результате исследования после осмотра туш и ветеринарно-санитарной экспертизы образцов говядины, полученных от животных 1-й и 2-й групп, учитывая результаты органолептических, биохимических, микробиологических, спектрометрических и радиобиологических анализов, заключили, что исследуемое мясо является безопасным и качественным и может быть реализовано в оптовой и розничной торговле. Инъекцированные коровам до отела препараты натрия нуклеинат и синэстрол 2 % не вызывают снижения качества говядины, полученной от их потомства.

Список литературы

1. Радиозащитные ветеринарные препараты на основе веществ микробного происхождения – приоритетное направление радиационной безопасности / *К.Н. Вагин, В.Г. Семенов, Р.Н. Низамов [и др.]*. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2023. 250 с.

2. Радиационно-экологический мониторинг в Орловской области / *К.Т. Ишмухаметов, Р.Н. Низамов, И.Р. Юнусов, М.Ю. Галлямова // Вестник Чувашского ГАУ. 2022. № 1. С. 47-50.*

3. Концептуальные основы конструирования иммуноотерапевтических средств при многофакторной экопатологии: монография / *Р.Н. Низамов, Ж.Р. Насыбуллина, К.Н. Вагин [и др.]*. Казань: ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ», 2021. 362 с.

ASSESSMENT OF THE SAFETY AND QUALITY OF SLAUGHTER PRODUCTS AFTER THE APPLICATION OF SODIUM NUCLEINATE AND ESTROGEN PREPARATION TO MOTHER COWS BEFORE CALVING

Klyapnev A.V.¹, Semenov V.G.²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State Agricultural Academy», Gagarin ave. 97, Nizhny Novgorod, Russian Federation, 603107

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Chuvash State Agrarian University», K. Marksa str 29, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation, 428003

Livestock products must undergo veterinary and sanitary examination to protect the health of the population of the Russian Federation. The article presents the results of veterinary and sanitary examination of slaughter products of black-and-white holsteinized bulls after the combined use of sodium nucleinate and sinoestrol 2 % to their mother cows in the conditions of a dairy farm in the Nizhny Novgorod region. Veterinary and sanitary inspection of carcasses and internal organs, laboratory tests of meat were carried out. Organoleptic, microbiological, physicochemical indicators of meat samples, amino-ammonia nitrogen, as well as the content of heavy metals - lead, cadmium, arsenic and mercury were assessed, the activity of strontium-90 and cesium-137 radionuclides was measured. The studied slaughter products were recognized as safe and high-quality.

Keywords: *immunostimulants, bulls, slaughter products, veterinary and sanitary examination, biosafety*

УДК 614.3

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПИЩЕВОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ, А ТАКЖЕ НЕПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ТОВАРОВ НАРОДНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ

Костылев Д.В., Есаулова О.В.^а, Никифоров С.И.

Федеральное бюджетное учреждение науки «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

Научно-исследовательский центр «РадБиоТех», Москва, Россия

e-mail: ^а esaulovaov@fferisman.ru

Облучение пищевой, сельскохозяйственной продукции и товаров народного потребления проводят для борьбы с паразитами и патогенными микроорганизмами, подавления роста и созревания, уничтожения насекомых, а также для продления срока хранения пищевой продукции и товаров народного потребления.

Пищевые продукты, сельскохозяйственную продукцию и товары народного потребления облучают на специализированных радиационно-технологических промышленных установках (далее – РТУ) с использованием ускорителей электронов и гамма-установок. Облучение продукции осуществляется электронным или фотонным (тормозным) излучением.

При правильном проведении радиационная обработка является безопасным и надежным

промышленным процессом, широко распространённым в мире.

Так как процесс облучения пищевой, сельскохозяйственной продукции и товаров народного потребления является специальным технологическим процессом, возможность проверки результатов которого является длительным и технологически сложным процессом, то особую значимость приобретают вопросы организации производственного контроля и порядок проведения санитарно-эпидемиологических процедур

Организация производственного контроля и проведения санитарно-эпидемиологических экспертиз на соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам, обеспечивающим безопасность продукции, при радиационной

обработке ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции, а также непродовольственных товаров народного потребления, с применением радиационно-технологических промышленных установок, работающих в режимах электронного (до 10 МэВ), тормозного излучения (с максимальной энергией до 5 МэВ), и гамма-установок (на основе источников ^{60}Co или ^{137}Cs), проводимой со следующими целями:

- уничтожения патогенных микроорганизмов и паразитов;
- снижения количества микроорганизмов, вызывающих порчу продукции;
- продления сроков годности (хранения) продукции;
- фитосанитарной обработки продукции;
- подавления прорастания луковиц, клубней и корнеплодов.

Целью мероприятий по организации производственного контроля и проведения санитарно-эпидемиологических экспертиз является обеспечение соответствия производственных процессов требованиям санитарных норм по обеспечению безопасности продукции при промышленной обработке ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции и непродовольственных товаров народного потребления, достижения требуемой эффективности процесса облучения, а также соответствия обработанной продукции государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам, требованиям нормативных правовых актов РФ и ЕАЭС и государственных стандартов.

Производственный контроль и проведение санитарно-эпидемиологических экспертиз на соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам в практической деятельности распространяется на организации, предоставляющие и заказывающие услуги по обработке ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции, независимо от их формы собственности и ведомственной принадлежности, в целях единообразного исполнения требований о проведении производственного контроля в соответствии с СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» и СП 1.1.1058-01 «Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» при радиационной обработке ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции; для применения органами и организациями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека при проведении санитарно-эпидемиологических экспертиз, исследований, оценок на соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам при обработке ионизирующим излучением пищевой, сельскохозяйственной продукции и непродовольственных товаров народного

потребления, а также при проведении контрольных надзорных мероприятий в целях оценки результативности производственного контроля, обеспечивающего соответствие процесса обработки продукции ионизирующим излучением и обработанной продукции установленным санитарно-гигиеническим требованиям.

Производственный контроль и проведение санитарно-эпидемиологических экспертиз на соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам при планировании и проведении производственного контроля организациями, осуществляющими обработку ионизирующим излучением непродовольственных товаров народного потребления, пригодных для такой обработки, за исключением обработки ионизирующим излучением при стерилизации изделий медицинского назначения и при обработке различных материалов и изделий с целью модификации их свойств или излучения их радиационной стойкости.

Производственным контролем и проведением санитарно-эпидемиологических экспертиз на соответствие государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам предусматривается организация производственного контроля на этапе подготовки и проведения радиационной обработки ионизирующим излучением пищевой и сельскохозяйственной продукции, а также непродовольственных товаров народного потребления, включая сведения о безопасных параметрах процесса обработки, содержание программы обязательных предварительных мероприятий и программы организации производственного контроля для обеспечения безопасности обработанной продукции; применения метода анализа опасностей, предусматривающий систематическую идентификацию, оценку и управление опасными факторами, существенно влияющими на безопасность пищевой и сельскохозяйственной продукции в процессе ее производства, хранения, транспортирования, реализации в соответствии с ХАССП; порядок проведения санитарно-эпидемиологической экспертизы технологии радиационной обработки продукции ионизирующим излучением; порядок проведения санитарно-эпидемиологической экспертизы для подтверждения возможности установления пролонгированных сроков годности пищевой и сельскохозяйственной продукции, обработанной ионизирующим излучением; порядок проведения санитарно-эпидемиологической экспертизы деятельности по производству продукции с пролонгированными сроками годности при ее обработке ионизирующим излучением; а также рекомендации по применению программно-аппаратного комплекса «Радуризация» (далее- ПАК «Радуризация») с целью унификации системы сбора, хранения, обработки и оценки данных при проведении радиационно-гигиенического контроля с оформлением на основании результатов контроля удостоверений качества и безопасности на каждую партию обработанной продукции.

Список литературы

1. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011).
2. СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ».
3. СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов».
4. СП 1.1.1058-01 «Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».
5. СанПиН 2.3.2.1324-03 «Гигиенические требования к срокам годности и условиям хранения пищевых продуктов».
6. ГОСТ ISO 11140-1-2011 «Стерилизация медицинской продукции. Химические индикаторы. Часть 1. Общие требования».
7. ГОСТ ISO 14470-2014 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к разработке, валидации и повседневному контролю процесса облучения пищевых продуктов ионизирующим излучением».
8. ГОСТ ИСО/АСТМ 51431-2012 «Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением».
9. ГОСТ 33339-2015 «Радиационная обработка пищевых продуктов. Основные технические требования».

УДК: 635.652:52-732

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ СЕМЯН НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ ФАСОЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ

Коцюбинская О.А.^{1,а}, Бондаренко Е.В.², Казыдуб Н.Г.¹, Блинова Я.А.², Кузьмина С.П.¹, Чернов Р.В.¹

¹ 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

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 oa.kotsyubinskaya@omgau.org

Морфометрические характеристики фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) изменяются в зависимости от доз гамма-облучения, проявляя сортоспецифичность. В данной работе рассматриваются морфометрические показатели, характерные для сортов фасоли обыкновенной селекции Омского ГАУ в условиях южной лесостепи Западной Сибири. В полевых условиях наибольшую чувствительность к облучению семян в диапазоне доз 25-75 Гр показали зерновые сорта Лыдинка и Омский Рубин. Наименьшая примененная доза 25 Гр не оказала выраженного гормонального эффекта на исследуемые морфометрические параметры изученных сортов. Наибольшая примененная доза 75 Гр проявила наиболее выраженный отрицательный эффект, приведя к статистически значимому снижению высоты растений, уменьшению диаметра корневой шейки и числа цветоносов у всех облученных сортов.

Ключевые слова: фасоль овощная и зерновая, сорта селекции Омского ГАУ, гамма-облучение, доза, длина растения, морфометрические показатели

Ионизирующее излучение – физический агент с доказанной эффективностью для индукции мутагенеза у растений. Как показала Зеленая революция 60-70-х годов прошлого столетия, мутационная селекция играет важную роль в решении проблем, связанных с продовольственной безопасностью. Если пятьдесят лет назад мутационная селекция растений была сосредоточена преимущественно на повышении урожайности, сегодняшние усилия в первую очередь сфокусированы на повышении устойчивости

культур к болезням, вредителям и последствиям изменения климата, включая экстремальные погодные явления. В зависимости от дозы и типа применяемого ионизирующего излучения облучение семян может привести к развитию эффекта гормезиса, проявляющегося в виде усиленного роста, ускоренного развития, повышенной толерантности к стрессовым факторам или накопления вторичных метаболитов в ответ на облучение в низких дозах [1]. Цель данной работы заключалась в определении изменений

морфометрических показателей четырех сортов фасоли обыкновенной, выращенных в полевых условиях, в ответ на гамма-облучение семян в диапазоне доз 25-75 Гр.

Сухие семена урожая 2023 г. сортов фасоли овощной (Маруся и Памяти Рыжковой) и зернового назначения (Льдинка и Омский Рубин) [2-4] подверглись γ -облучению на уникальной научной установке ГУР-120 (источник – ^{60}Co , НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ) в дозах 25, 50 и 75 Гр с мощностью дозы 60 Гр/час в трех повторностях (по 35 семян в каждой) для каждого экспериментального условия и посеяны в поле Учебно-опытного хозяйства Омского ГАУ. Оценка морфометрических показателей растений проводили в фазу начала цветения растений 11

июня 2024 г. (рис. 1) с 9 растений каждой повторности каждого экспериментального условия (всего 27 шт.). В варианте облучения 75 Гр каждого сорта из высеянных 105 семян взошло и развилось около 20-27 растений, в зависимости от генотипа, в связи с чем фитомассу растений этой группы не определяли. Статистический анализ выполнен в среде R версии 4.3.3 с применением критерия Крускала-Уоллеса с апостериорным тестом Данна и поправкой на множественность FDR. Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0.05$.

Гамма-облучение семян фасоли повлияло на все исследуемые морфометрические показатели с разной степенью выраженности (табл. 1).

А. Сорт Маруся



Б. Сорт Памяти Рыжковой



В. Сорт Льдинка



Г. Сорт Омский Рубин



Рисунок 1. Примеры развития растений сортов фасоли овощной Маруся (А), Памяти Рыжковой (Б), и фасоли зерновой Льдинка (В), Омский Рубин (Г) при разных дозах гамма-облучения семян, 2024 г.

Таблица 1

Морфометрические показатели растений фасоли обыкновенной в зависимости от дозы гамма-облучения семян, 2024 г. (Me [IQR])

Параметр	Доза, Гр	Маруся	Памяти Рыжковой	Льдинка	Омский Рубин
Высота растения, см	0	49.0 [5.0]	47.0 [3.0]	49.0 [0.0]	54.0 [1.0]
	25	33.0 [10.0]*	44.0 [2.0]	44.0 [7.0]	48.0 [2.0]
	50	41.0 [2.0]	50.0 [6.0]	33.0 [2.0]*	32.0 [18.0]*
	75	33.0 [5.0]*	23.0 [6.0]*	23.0 [5.0]*	25.0 [15.0]*
Диаметр корневой шейки растения, см	0	0.9 [0.1]	1.0 [0.2]	1.0 [0.2]	1.0 [0.3]
	25	0.9 [0.1]	0.8 [0.1]	0.6 [0.1]*	0.9 [0.2]
	50	0.9 [0.1]	0.8 [0.1]	0.7 [0.1]*	0.7 [0.1]*
	75	0.7 [0.0]*	0.7 [0.0]*	0.6 [0.2]*	0.6 [0.1]*
Число листовых пластин, шт.	0	47 [5]	41 [9]	30 [28]	95 [15]
	25	55 [13]	38 [3]	27 [10]	77 [50]
	50	40 [2]*	28 [9]*	24 [8]	51 [6]*
	75	45 [10]	27 [9]*	22 [8]	60 [13]*
Число цветоносов, шт.	0	23 [4]	15 [8]	17 [3]	30 [5]
	25	25 [2]	15 [6]	17 [3]	14 [23]
	50	15 [1]*	13 [5]	10 [11]	15 [9]*
	75	11 [2]*	6 [2]*	9 [4]*	7 [11]*
Число ветвей, шт.	0	4 [2]	4 [4]	4 [0]	7 [1]
	25	3 [2]	4 [2]	2 [1]*	4 [1]*
	50	4 [0]	5 [4]	3 [1]	5 [2]*
	75	4 [1]	2 [1]*	3 [2]*	2 [2]*
Общая фитомасса растения, г	0	61.2 [10.5]	93.3 [17.9]	66.9 [44.3]	146.2 [66.1]
	25	92.1 [29.3]	78.7 [3.4]	38.1 [34.7]*	81.0 [65.9]
	50	50.6 [22.2]	69.4 [25.7]*	35.5 [4.3]*	59.7 [20.1]*

Данные представлены в виде Me [IQR] = медиана и межквартильный размах. * – Статистически значимые различия от контроля (0 Гр) того же сорта при $p < 0.05$.

Доза 75 Гр проявила наиболее выраженный эффект, приведя к статистически значимому снижению высоты растений, уменьшению диаметра корневой шейки и числа цветоносов у всех облученных сортов. У растений, облученных в дозе 50 Гр, отмечено статистически значимое уменьшение высоты растений, диаметра корневой шейки и фитомассы для обоих зерновых сортов, а также фитомассы у растений Памяти Рыжковой, числа листовых пластин у сортов Памяти Рыжковой и Омский Рубин, числа цветоносов у сортов Маруся и Омский Рубин и числа ветвей у сорта Омский Рубин. В варианте облучения в дозе 25 Гр у растений сорта Лыдинка зафиксированы статистически значимо меньшие значения диаметра корневой шейки, в 2 раза меньшее количество ветвей, и на 43 % меньшее значение фитомассы. Облучение в дозе 25 Гр повлияло и на второй зерновой сорт – Омский Рубин, у облученных растений которого зафиксировано значимо меньшее число ветвей по сравнению с необлученной группой. У растений сорта Маруся из группы 25 Гр отмечено значимое снижение высоты растений, что, однако, не повлияло на другие показатели. Более того, у этих растений обнаружены более высокие значения фитомассы, числа цветоносов, числа листовых пластин, но разница с контролем была статистически незначима.

Таким образом, морфометрические показатели фасоли обыкновенной являются важными характеристиками, которые помогают в определении сорта, его качества и устойчивости к различным климатическим условиям. Гамма-облучение семян в диапазоне доз 25-75 Гр влияет на морфометрические показатели фасоли, проявляя сортоспецифичность. В полевых условиях наибольшую чувствительность к облучению

семян показали зерновые сорта Лыдинка и Омский Рубин. Наиболее выраженный отрицательный эффект проявила доза 75 Гр. Наименьшая примененная доза 25 Гр не оказала выраженного гормезисного эффекта на исследуемые морфометрические параметры изученных сортов.

Список литературы

1. Volkova P.Yu., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants // *Current Opinion in Toxicology*. 2022. V. 30. P. 100334. DOI: 10.1016/j.cotox.2022.02.007.

2. Коцюбинская О.А., Казыдуб Н.Г., Антошкин А.А. Продуктивность сортов фасоли овощной селекции Омского ГАУ в южной лесостепи Западной Сибири // *Науч.-практ. журн. «Овощи России»*. 2020. № 1. С. 68-73.

3. Коцюбинская О.А., Казыдуб Н.Г. Экологическая пластичность и стабильность новых сортов фасоли овощной селекции Омского ГАУ при разных сроках посева в южной лесостепи Западной Сибири // *Известия ФНЦО*. 2023. № 2. С. 33-40. DOI 10.18619/2658-4832-2023-2-33-40.

4. Фасоль зерновая и овощная в западной Сибири: селекция, агротехника, использование / Н.Г. Казыдуб, О.А. Коцюбинская, С.П. Кузьмина, М.М. Плетнева; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2022. 225 с. ISBN 978-5-907507-38-8.

THE EFFECT OF GAMMA IRRADIATION OF SEEDS ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF COMMON BEAN PLANTS

Kotsyubinskaya O.A.¹, Bondarenko E.V.², Kazydub N.G.¹, BlinovaYa.A.², Kuzmina S.P.¹, Chernov R.V.¹

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin», Institutskaya sq. 1, Omsk, Omsk region, Russian Federation, 644008

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

The morphometric characteristics of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) vary depending on the doses of gamma irradiation showing intraspecies specificity. Irradiation can affect parameters such as plant height, shape, leaf size, number of flowers, number of beans and seeds in a bean, as well as the rate of plant growth and development. This article examines the morphometric parameters characteristic to common bean varieties of Omsk State Agrarian University selection in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. In field conditions, the grain varieties L'dinka and Omskiy Rubin showed greater sensitivity to seed irradiation in the dose range of 25-75 Gy than the green bean varieties. The lowest applied dose of 25 Gy did not have a pronounced hormesis effect on the studied morphometric parameters of the varieties under study. The highest applied dose of 75 Gy showed the most pronounced negative effect, leading to a statistically significant decrease in plant height, diameter of the root collar and the number of flower-bearing stems in all irradiated varieties.

Keywords: vegetable and grain beans, variety of Omsk State Agrarian University selection, gamma irradiation, plant length, morphometric parameters

УДК 539.1.04

МОДИФИКАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ МИОГЛОБИНА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ 8 СУТОК

Кузунова Е.А.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,3}, А.П. Черняев^{1,3}, Борщеговская П.Ю.^{1,3}, Родин И.А.^{2,4}, Торопыгина М.И.⁴, Ипатова В.С.¹, Золотов С.А.¹, Козлова Е.К.^{1,4}

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 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

³ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцина Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, 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: ^а kuzunova.ea21@physics.msu.ru

В работе приведены результаты исследования развития окислительных процессов в миоглобине под воздействием излучения в разные дни хранения мышечной ткани говядины. Показано, что увеличение времени облучения ультрафиолетом при длине волны 254 нм до 30 минут и продолжительности хранения образцов до 8 суток ускоряет формирование метмиоглобина из оксимиоглобина. Основные изменения в результате воздействия ультрафиолетом происходят на ранних стадиях хранения, в первые четыре дня, когда процессы порчи тканей еще незначительны, и эффект тем сильнее, чем больше время облучения. При дальнейшем хранении изменение форм миоглобина в результате окисления вследствие хранения превалирует.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, окислительные процессы, миоглобин, оксимиоглобин, метмиоглобин

Одним из приоритетных направлений научно-технического развития в мире является обеспечение населения качественными безопасными продуктами питания. Основная цель обработки продуктов – подавление широкого спектра вредителей, фитопатогенов, патогенных и условно-патогенных бактерий, вирусов при сохранении питательных свойств и внешнего вида продуктов. Схожие цели подавления микроорганизмов и сохранения целостности, функциональности и свойств ставятся перед обработкой контаминирующих объектов трансплантологии, для сохранения медицинских сред, тканей, в том числе донорской крови. Методы обработки могут иметь как положительные, так и отрицательные стороны получаемых эффектов. Для каждого продукта целесообразен подбор своего оптимального метода [1, 2].

Одним из надежных, активно внедряющихся методов является радиационная обработка. При данном виде воздействия не происходит нагревание образцов, возможна обработка в упаковке, не происходит нарушения тканей при работе в разрешенных

диапазонах энергий и доз излучения [2]. Однако радиационная обработка может приводить к изменению молекул тканей: при воздействии ионизирующим излучением образуются свободные радикалы, которые взаимодействуют с атомами и молекулами вещества, нарушаются химические связи молекул. Так, например, излучение способно развить окислительные процессы в молекуле гемоглобина, являющимся железосодержащим белком, необходимым для переноса кислорода в ткани: ион железа Fe^{2+} в молекуле под воздействием радикалов переходит в Fe^{3+} .

При нормальном функционировании организма белок гемоглобин может находиться в одной из трех форм: оксигемоглобин (oxyHb), дезоксигемоглобин (deoxyHb) и метгемоглобин (metHb). Изменение формы белковых молекул является маркером изменения тканей. Интересным представляется оценка степени окислительных процессов, индуцированных излучением, приводящих к нарушениям молекул тканей.

Для изучения развития окислительных процессов в гемоглобине в модельных экспериментах по воздействию излучения можно использовать ультрафиолет (УФ). Действие УФ на раствор гемоглобина оказывает схожее действие с ионизирующим излучением за счет ионизации излучением воды, разложения ее на свободные радикалы, среди которых окисляется перекись водорода, окисляющая железо гемоглобина [4].

В качестве модельного объекта в данной работе был выбран легкодоступный белок миоглобин, выделенный из мышечной ткани говядины. Миоглобин имеет схожую структуру с глобулами гемоглобина: так же содержит железо, способное окисляться под действием излучения, участвует в жизни организма в трех формах: оксимиоглобин (oxMb), дезоксимиоглобин (deoxMb) и метмиоглобин (metMb) [4]. Молекула гемоглобина состоит из 4-х полипептидных цепей с гемом в каждой, в то время как миоглобин представляет собой 1 полипептидную связь с гемом. Миоглобин и гемоглобин – родственные белки, их спектральные свойства схожи.

В качестве объекта исследования было выбрано мясо говяжьей вырезки, хранившейся при температуре 4 °С. Каждый день в течение 8 суток наблюдения из говяжьей вырезки приготавливали 21 кусок мяса массой 4 г. Каждый кусок помещали в 6 мл раствора 0.9 % NaCl, далее происходило экстрагирование миоглобина в раствор в течение 20 минут, после чего куски мяса удалялись из растворов. Затем 18 образцов растворов из 21 были подвергнуты воздействию УФ-излучения лампы ООО «Ферропласт Медикал» (Россия, Ярославская область) с длиной волны 254 нм в течение 5, 10, 15, 20, 25 и 30 минут. Оставшиеся 3 образца использовались в качестве контрольных необлученных образцов.

Поскольку процессы окисления, вызванные ионизирующим излучением, бактериальная активность, кислород и активные формы кислорода (АФК), возникающие в результате ионизирующего излучения, влияют на органолептические свойства и химический состав облученной говядины, необходимо контролировать концентрацию метгмиоглобина C_{MetMb} во время хранения.

Изменения концентраций производных миоглобина в облученных и необлученных растворах оценивались по спектрам миоглобина, измеренным с помощью спектрофотометра УФ-3000 («ТМ ЭКОВью», Россия), приобретенном при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина» МГУ имени М.В. Ломоносова [5]. Измерения спектров миоглобина в растворах проводились в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм как сразу после облучения, так и на 1-е – 8-е сутки после облучения.

Количественная оценка концентраций производных миоглобина в говядине основана на аппроксимации экспериментально измеренных спектров растворов миоглобина функцией вида:

$$A_l(\lambda)_{теор} = \epsilon_{Mb,l} C_{Mb} L + \epsilon_{MbO_2,l} C_{MbO_2} L + \epsilon_{MetMb,l} C_{MetMb} L + \frac{E}{\lambda} + K, (1)$$

где l – количество длин волн; $\epsilon_{Mb,l}(\lambda)$, $\epsilon_{MbO_2,l}(\lambda)$ и $\epsilon_{MetMb,l}(\lambda)$ – молярные коэффициенты поглощения Mb, MbO₂, MetMb, соответственно; C_{Mb} , C_{MbO_2} , и C_{MetMb} – концентрации Mb, MbO₂, MetMb, соответственно; $L = 1$ см – толщина слоя раствора; E и K – коэффициенты рассеяния [6].

В зависимости от времени облучения ультрафиолетом цвет раствора образцов менялся. На рисунке 1 показано фото измерительных кювет с раствором миоглобина, подвергнутому облучению. Чем больше было время воздействия УФ, тем больше менялся окрас раствора: переходил из красного в коричневый. Изменение цвета облученного раствора объясняется окислением железа, содержащимся в миоглобине, что свидетельствует о переходе оксимиоглобина в метмиоглобин, который является маркером порчи мяса.

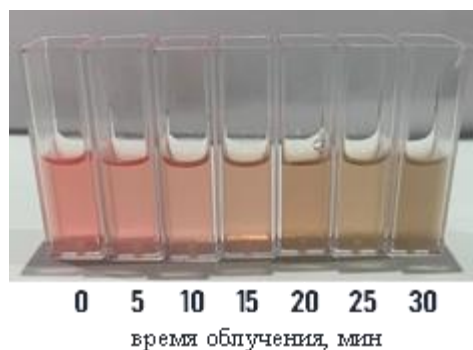


Рисунок 1. Изменение цвета раствора миоглобина в зависимости от времени облучения УФ

На рисунке 2 показана зависимость содержания C_{MetMb} в растворах миоглобина от времени облучения в 0 и 7 день хранения ткани. Показано, что при облучении ультрафиолетовым излучением 30 минут достаточно для перехода оксимиоглобина MbO₂ в метмиоглобин MetMb и дезоксимиоглобин Mb уже на начальном этапе хранения.

Экспериментально установлено, что в необлученных образцах говядины в течение 8 суток наблюдения концентрация метмиоглобина увеличивалась, что свидетельствует о развитии окислительных процессов в мясе при хранении, вызванных как бактериальной активностью, так и активными формами кислорода, присутствующими в необлученных образцах.

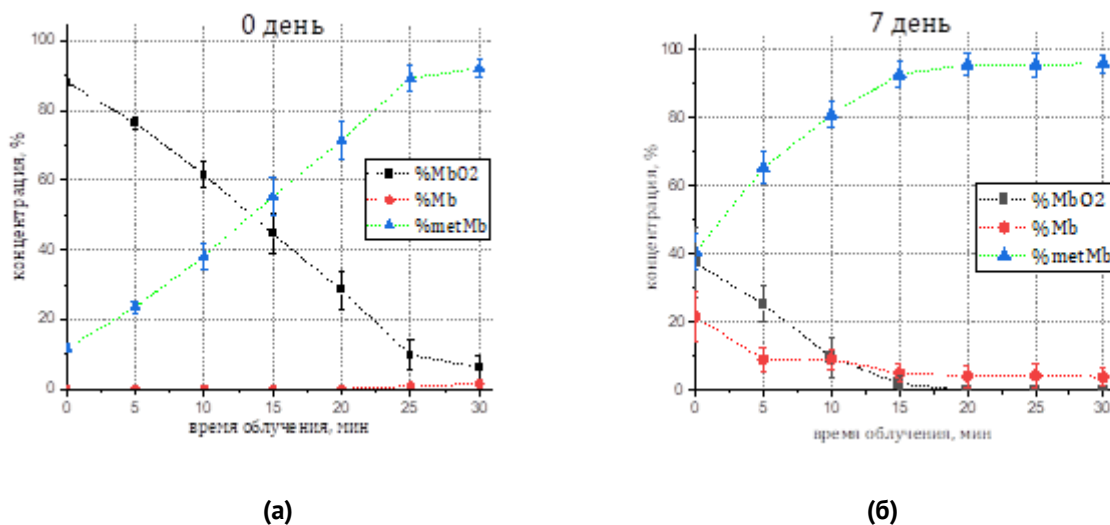


Рисунок 2. Зависимости концентраций различных форм миоглобина от времени облучения на 0 (а) и 7 (б) дни хранения

На рисунке 3 показана зависимость концентраций различных форм миоглобина от времени хранения. Получено, что с увеличением времени облучения ультрафиолетовым излучением концентрация метмиоглобина увеличивалась в растворах миоглобина, облученных в разные дни хранения ткани. Таким образом, обработка ультрафиолетовым излучением приводила к окислению оксимиоглобина в метмиоглобин за счет активных форм кислорода, возникающих в растворах при облучении.

Экспериментально получено, что с увеличением времени хранения ткани изменяется чувствительность молекул миоглобина. Согласно теории мишени [7], изменяется количество актов ионизации, необходимых для повреждения молекулы миоглобина. Другими словами, чем позже проводится облучение, тем более подвержены молекулы воздействию, что необходимо учитывать, в том числе при планировании обработки.

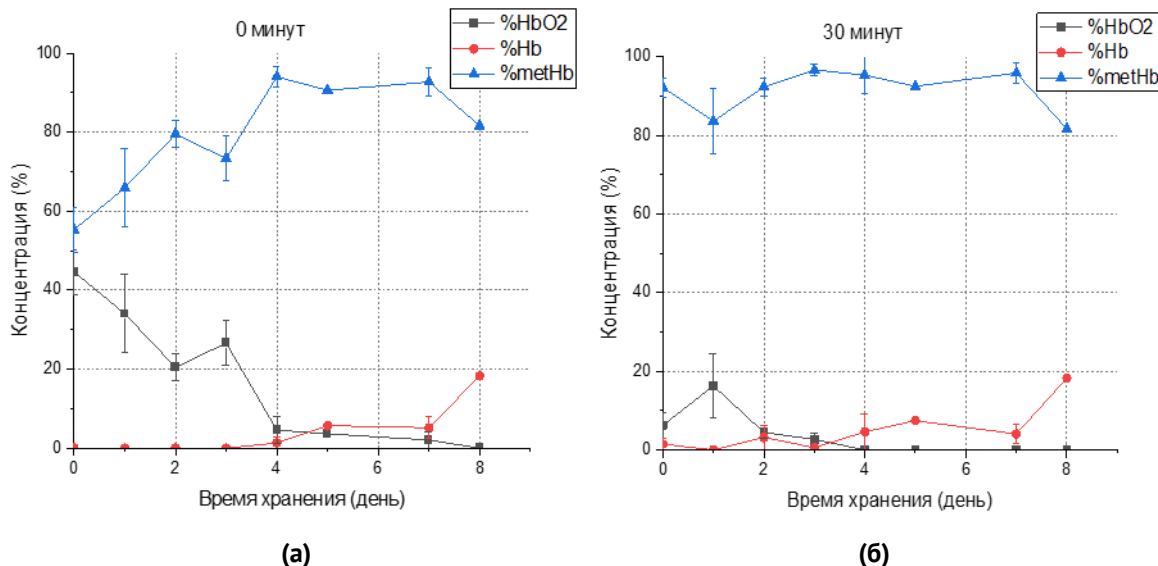


Рисунок 3. Зависимости концентраций различных форм миоглобина от времени хранения для 0 (а) и 30 (б) минут облучения

На переход из MbO₂ в metMb влияет два фактора: порча ткани в процессе хранения и облучение УФ.

В работе было показано, что в течение первых 4 суток деструктивные процессы в мясе от хранения незначительны. При воздействии ультрафиолетового

излучения с длиной волны 254 нм наблюдается нарастающий эффект перехода оксимиоглобина в метмиоглобин для времен облучения до 20 минут. При большем времени облучения весь оксимиоглобин переходит в метмиоглобин. При дальнейшем хранении процессы порчи мяса преобладают над воздействием излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. М.: Издательство Московского университета, 2019. 231 с.

2. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов / А.С. Алимов [и др.] // Известия

Российской академии наук. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 6. С. 819-823.

3. Окислительные процессы при действии ультрафиолетового излучения на красные клетки крови / Е.К. Козлова [и др.] // Медицинская физика 2. 2014. С. 63-70.

4. Физика и биофизика / В.Ф. Антонов, А.М. Черныш, Е.К. Козлова, А.В. Коржуев. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 472.

5. ИСТИНА. Спектрофотометр УФ-3000 (ТМ ЭКОВЬЮ) URL: <https://istina.msu.ru/equipment/card/615320740/> (дата обращения: 20.09.2024).

6. Hemoglobin Derivatives in Beef Irradiated with Accelerated Electrons / U. Bliznyuk [et al.] // Molecules. 2023. V. 28. P. 5773.

7. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 448 с.

MODIFICATION OF VARIOUS FORMS OF MYOGLOBIN AS A RESULT OF EXPOSURE TO ULTRAVIOLET RADIATION AND STORAGE FOR 8 DAYS

Kuzunova E.A.¹, Bliznyuk U.A.^{1,3}, Chernyaev A.P.^{1,3}, Borshchegovskaya P.Y.^{1,3}, Rodin I.A.^{2,4}, Toropygin M.I.⁴, Ipatova V.S.¹, Zolotov S.A.¹, Kozlov E.K.^{1,4}

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 Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Chemistry), Leninskie Gory 1, bld. 3, Moscow, Russian Federation, 119991

³ Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, bld. 2, 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

The paper presents the results of a study of the development of oxidative processes in myoglobin under the influence of radiation on different days of storage of beef muscle tissue. It has been shown that an increase in the time of ultraviolet irradiation at a wavelength of 254 nm to 30 minutes and the duration of sample storage up to 8 days accelerates the formation of metmyoglobin from oxymyoglobin. The main changes as a result of UV exposure occur in the early stages of storage, in the first four days, when the processes of tissue damage are still insignificant, and the effect is stronger the longer the exposure time. During further storage, the change in the forms of myoglobin as a result of oxidation due to storage prevails.

Keywords: ultraviolet radiation, oxidative processes, myoglobin, oxymyoglobin, metmyoglobin

The method of radiation treatment of food products, in particular meat, to extend the shelf life and ensure quality, has proven itself well on the world market. In this paper, the model effect of the influence of ultraviolet (UV) radiation on oxidative processes in myoglobin is studied. The experimental results showed that UV radiation, acting on myoglobin, leads to the oxidation of iron molecules contained in the protein, which leads to a decrease in the concentration of oxymyoglobin MbO₂ and an increase in the concentration of

metmyoglobin (metMb), and manifests itself in a change in the color of the solution.

An assessment of changes in the shape of myoglobin was carried out depending on the time of irradiation on different days of storage (for 8 days). The concentration of metmyoglobin increased both with increasing exposure time and with the duration of sample storage. Indicators of oxidative processes in non-irradiated samples indicate a significant influence of bacterial activity and reactive oxygen species.

The transition of MbO₂ to (metMb) occurred already with a relatively short irradiation time (30 minutes). UV radiation accelerated the transition from one form of protein to another, especially during the first 4 days of storage, when the destructive processes from tissue damage were still insignificant.

With an increase in the storage time of meat, the influence of destructive processes became more

pronounced, and after 4 days, the processes of spoilage of meat prevailed over the effects of radiation.

This work contributes to the understanding of the processes occurring in biomolecules during their oxidation as a result of exposure to radiation at different time periods, including for planning food processing, their safety and quality preservation.

УДК 519.635.8: 519.682.3: 57.032: 57.038

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА» ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРЫ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB

Кусак А.А.^{1,а}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Никитченко А.С.¹, Ипатов В.С.², Близнюк У.А.^{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

e-mail: ^а kusak.aa22@physics.msu.ru

В настоящее время поведение биологических объектов описывается различными математическими моделями. В частности, одной из самых известных и фундаментальных моделей является система уравнений Лотки-Вольтерры. В этой работе были изучены основные детали и принципы построения математических моделей, особенно модель «Хищник-жертва» Лотки-Вольтерры. Решение системы уравнений было реализовано в программном пакете MATLAB с помощью численного метода Рунге-Кутты 4 порядка, с возможностью нахождения параметров системы при вводе экспериментальных данных для проверки соответствия с теорией.

Keywords: математическая модель, биология, радионуклиды, модель Лотки-Вольтерры «Хищник-жертва», MATLAB

Модель «Хищник-Жертва» является важной и нужной во многих научных задачах. Например, в биологии, где надо оценить конкурирующее поведение различных популяций микроорганизмов или распространение радионуклидов в среде [1]. Вдобавок систему уравнений Лотки-Вольтерры можно использовать в медицине для оценки конкурирующей способности раковых клеток [2].

Под моделью обычно понимают материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания замещает исходный объект наблюдения – оригинал, сохраняя некоторые важные его черты [3]. По Ляпунову моделирование – это теоретическое исследование объекта, при котором изучается некоторая вспомогательная искусственная система, включающая в себя все необходимые свойства объекта в условиях поставленной задачи исследования.

Математическое моделирование в медицине направлено на изучение физиологических процессов в организме человека в норме и патологии с помощью математических прообразов. Возможны как

персонализированные, так и осредненные по популяции математические модели. Персонализированные модели используются для диагностики или прогноза результата лечения конкретного пациента, а осредненные модели – для выявления новых взаимосвязей, вытекающих из физических и/или физиологических законов, положенных в основу примера [4]. В то время как моделирование в иммунологии направлено на изучение инфекционных и иммунофизиологических процессов в организме человека и на поиск эффективных управляющих воздействий на инфекционные процессы для построения действенных методов терапии. В эпидемиологии – на изучение распространения заболеваний в человеческой популяции и управляющие воздействия противоэпидемических мероприятий.

В данной работе были исследованы различные применения математического моделирования в биологии и медицине, а также была создана компьютерная программа для подсчета параметров системы на основе уравнений «Хищник-жертва» Лотки-

Вольтерры. Программа была реализована в пакете MATLAB.

Данную модель независимо придумали Альфред Джеймс Лотка (1925) и Вито Вольтерра (1926). Лотка А.Д. предложил идею в исследовании автокаталитических реакций (1910), а затем расширил для анализа взаимоотношений «Хищник-жертва» в своей публикации «On the true rate of natural increase as exemplified by the population of the United States» (1925). Та же система уравнение была опубликована Вито Вольтеррой в 1926 [5] для объяснения необычной закономерностей популяции рыб в Адриатическом море, обнаруженной во время Первой Мировой войны.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = N(a - bP) & (1) \\ \frac{dP}{dt} = P(cN - d) & (2) \end{cases}'$$

где a – коэффициент рождаемости жертв, d – коэффициент убыли в единицу времени в единицу времени. Вклад в рост скорости численности хищника регулируется параметром c , соответственно b регулирует сокращение численности жертв из-за влияния хищников.

В уравнениях популяционной динамики, как и в уравнениях химической кинетики, используется «принцип соударений», когда скорость реакции пропорциональна произведению концентраций

реагирующих компонентов. Согласно представлениям химической кинетики, скорость бимолекулярной реакции взаимодействия двух веществ пропорциональна вероятности столкновения этих веществ, т.е. произведению их концентрации. Точно так же, в соответствии с гипотезами Вольтерра, скорость размножения хищников (гибели жертв) пропорциональна вероятности встреч особей хищника и жертвы, т.е. произведению их численностей. Такое сходство уравнений в химических и экологических моделях позволяет применить для математического моделирования кинетики популяций те же методы исследований, что и для систем химических реакций [6].

Программа выполняет 2 противоположные задачи: моделирует теоретическую зависимость относительных единиц от времени по заданным параметрам системы и подсчитывает коэффициенты согласно входным экспериментальным данным, чтобы проверить соответствие с теорией.

Решения системы уравнений «Хищник-жертва» были получены с помощью численных методов: метод Рунге-Кутты 4 порядка. Для аппроксимации входных данных была использована внутренняя функция пакета MATLAB `lsqnonlin` (`fun, x0, [], [], options`); Она решает задачи аппроксимирования кривыми нелинейного метода наименьших квадратов [7].

Листинг кода с функцией `lsqnonlin`(...)

```
fun=@(x)MySolver(t_exp2,x(1),x(2),x(3),x(4),[x(5);x(6);])-y_exp2; % задаем целевую функцию
x0=[2.0,0.11,0.008,0.08,20,24]; % начальная аппроксимация
options = optimoptions('lsqnonlin','Algorithm','trust-region reflective','Display','iter','FunctionTolerance',0.0000000000000001);
x = lsqnonlin(fun,x0,[],[],options); % решаем
```

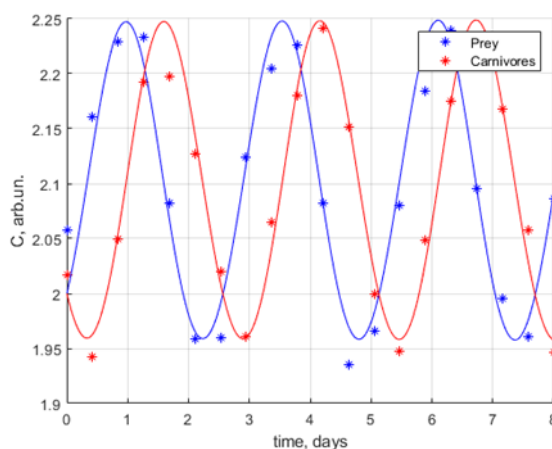


Рисунок 1. Зависимость относительных единиц от времени: по заданным коэффициентам (линии), по входным данным (точки)

На рисунке 1 представлен результат работы 2-х частей программы. Теоретическая зависимость по фиксированным параметрам и реализация подсчета параметров по входным данным с ошибкой 1 %. Различия составили менее 3-4 %, что говорит о

качественной работе алгоритма. Для подтверждения применимости метода были использованы экспериментальные данные из книги «The struggle for existence» by G. F. Gause [8]. После чего проводилось их сопоставление с теоретической зависимостью.

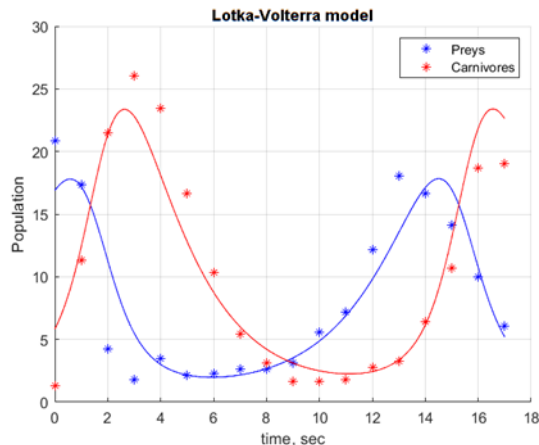


Рисунок 2. Зависимость численности от времени двух видов: хищник – PARAMECIUM BURSARIA, жертва – Schizosaccharomyces pombe

На рисунке 2 представлен результат работы программы с экспериментальными входными данными. Были получены необходимые колебания и качественная зависимость популяций от времени. Различия в амплитудах популяции двух видов и сдвиг по фазе обусловлены физическими причинами: хищнику необходимо «догнать» жертву и при большом потреблении популяция растет по закону Мальтуса, а затем резко убывает. Ниже представлены значения аппроксимированных параметров в единицу времени.

$$a = 0.4023 \quad b = 0.0446$$

$$c = 0.0628 \quad d = 0.04523$$

Доказана валидация модели, соответственно стало возможно производить анализ различных систем из 2 объектов эксперимента на применимость уравнений Лотки-Вольтерры для их описания. Благодаря простоте математической постановки системы уравнений «Хищник-жертва» мы можем добавлять новые параметры, выражающие зависимость от внешних факторов (давление, облучение) тем самым дополняя модель и открывая дополнительные возможности для исследования в биологии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 22-63-00075.

Список литературы

1. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: ООО «Маска», 2022. 638 с.
2. Fornalski Krzysztof. Radiation and evolution: From Lotka-Volterra equation to balance equation // International Journal of Low Radiation. 2016. V. 10. PP. 222-233. DOI: 10.1504/IJLR.2016.081460.
3. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.
4. Математическое моделирование в медицине, иммунологии и эпидемиологии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.inm.ras.ru/kaf-vtmgb/bio/> (дата обращения 04.10.2024).
5. Volterra V. Variazione e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi // Mem. Accad. naz. Lincei. Ser. 6. 1926.
6. Ризниченко Г.Ю. Курс лекций: математические модели в биологии и медицине.
7. Mathworks. Help center: lsqnonlin. URL: <https://se.mathworks.com/help/optim/ug/lsqnonlin.html> (дата обращения 04.10.2024)
8. Gause G.F. The struggle for existence. The WILLIAMS & WILKINS COMPANY, 1934.

MODELING OF THE SYSTEM OF PREDATOR-PREY EQUATIONS BY LOTKA-VOLTERRA IN THE MATLAB SOFTWARE PACKAGE

Kusak A.A.¹, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Nikitchenko A.D.¹, Ipatova V.S.², Bliznyuk U.A.^{1,2}, Chernyev 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

Currently, the behavior of biological objects is described by various mathematical models. In particular, one of the most famous and fundamental models is the Lotka-Volterra equation system. In this work, the basic details and principles of building mathematical models were studied, especially the Lotka-Volterra «Predator-Prey» model. The solution of the system's equations was implemented in the MATLAB software package using the Runge-Kutta numerical method of the 4th order, with the possibility of finding the parameters of the system when entering experimental data to verify compliance with the theory.

Keywords: *mathematical model, biology, radionuclides, Lotka-Volterra Predator-Prey model, MATLAB*

The Predator-Prey model is important and necessary in many scientific tasks. For example, in biology, where it is necessary to evaluate the competing behavior of different populations of microorganisms or the spread of radionuclides in the environment [1]. In addition, the Lotka-Volterra equation system can be used in medicine to assess the competing ability of cancer cells [2].

In this paper various applications of mathematical modeling in biology and medicine were investigated, and a computer program was created to calculate the parameters of the system based on the Lotka-Volterra «Predator-Prey» equations. The program was implemented in the MATLAB package.

УДК 539.1.06

ВЛИЯНИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БЕЛКОВЫЕ МОЛЕКУЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПЕЧЕНИ ИНДЕЙКИ

Межетова И.Т.^{1,а}, Близняк У.А.¹, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Беклемишев М.К.³, Черняев А.П.^{1,2}, Родин И.А.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 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
e-mail: ^а mezhetova.it19@physics.msu.ru

В данной работе исследовалась перспективность использования активности ферментов в качестве маркеров радиационной обработки печени индейки. Для этого проводился поиск индикаторных реакций для следующих ферментов: каталаза, щелочная фосфатаза, катепсин D. В проведенном исследовании каталаза показала наибольший потенциал для использования в качестве маркера радиационной обработки, так как реакция данного фермента с перекисью проходила по разному в образцах, облученных пучком электронов в дозах 0 Гр, 100 Гр, 1 000 Гр. Данная

реакция также протекала по-разному при воздействии на образцы ультрафиолетовым излучением в течение 0 мин, 5 мин, 10 мин.

Ключевые слова: радиационная обработка, ускоренные электроны, ультрафиолетовое излучение, ферменты, каталаза, катепсин D, щелочная фосфатаза, спектрофотометрия

Радиационная обработка позволяет сократить потери пищевой продукции, вызванные ростом патогенных микроорганизмов, а также бактерий, вызывающих порчу продукции, что на фоне современных вызовов, связанных со сложностью логистических поставок пищевой продукции, а также наличия различных климатических зон позволяет решать задачу обеспечения безопасности и качества продуктов питания по всему миру.[1].

В связи с растущей популярностью радиационной обработки по всему миру возможны случаи, когда продукт, прошедший данный вид обработки, не был помечен соответствующей маркировкой, что может привести к повторному облучению. Вследствие чего значение поглощенной дозы может превышать установленную стандартами норму, а продукты приобретут неприятный запах и вкус. Поэтому важно исследовать потенциальные маркеры, с помощью которых можно на качественном уровне установить факт прошествия продуктом обработки ионизирующим излучением. Так как ионизирующее излучение оказывает разное влияние на продукты питания, необходимо исследовать каждый продукт с целью нахождения индивидуальных маркеров.

Целью данной работы был поиск химических реакций, позволяющих оценить активность ферментов, содержащихся в печени индейки, а также использование этих реакций для наблюдения изменения активности ферментов в образцах, облученных ускоренными электронами и ультрафиолетовым излучением.

Свежая печень индейки была поделена на куски массой (2.6 ± 0.2) г, каждый из которых был мелко измельчен ножом. Образцы смешивали с кремнеземом массой 0.4 г, затем в течение 15 минут измельчались в ступке. Полученную массу заливали раствором PBS (натрий-фосфатно-солевым буфером) с $pH = 7.35$ из расчета 5 миллилитров на 1 г массы печени.

При проведении облучения ускоренными электронами измельченные, не перетертые в ступке образцы помещались в чашки петри диаметром 35 мм и высотой 14 мм, слой измельченной печени составлял не более 6 мм. Образцы облучались в дозах 100 Гр и 1 000 Гр ускоренными электронами, генерированными ускорителем непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 (ООО «НПП Торий», Россия) с максимальной энергией электронов 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт, разработанном НИИЯФ МГУ.

Для сравнения влияния различных типов ионизирующего излучения на активность ферментов, содержащихся в гомогенате печени индейки, гомогенат, приготовленный из необлученных ускоренными электронами образцов печени, облучали ультрафиолетовым излучением. Для этого приготовленный

гомогенат был разлит в три чашечки по 1 мл в каждую. Облучение проводилось с помощью ультрафиолетовой лампы ООО «Ферропласт Медикал» (Россия, Ярославская область) в течение 5 и 30 минут.

При определении активности щелочной фосфатазы, присутствующей в больших количествах в печени животных, в лунку планшета смешивали 12 мкл хлорида натрия в концентрации 0.1 М, 30 мкл боратного буфера ($pH = 9.5$), добавляли чистый фермент или гомогенат индейки, 60 мкл воды Millipore и 100 мкл пара-нитрофенилфосфата в концентрации 28 М. Наблюдалось изменение интенсивности желтого цвета раствора. Однако данное изменение спектра наблюдалось только при проведении реакции с использованием чистого фермента, замена его гомогенатом не дала никаких результатов. При добавлении в смесь одновременно фермента и гомогената изменений интенсивности желтого также не наблюдалось, что делает невозможным использование щелочной фосфатазы в качестве маркера радиационной обработки.

При определении активности катепсина D в лунку планшета добавляли 250 мкл приготовленного раствора, содержащего гемоглобин, 250 мкл 0.1 М кислотно уксусного буфера ($pH = 3.5$), содержащего 1 мМ ЭДТА (Этилендиаминтетрауксусная кислота) и 10 мМ мектапоянтарной кислоты, и 500 мкл гомогената печени индейки. Смесь инкубировалась в течение 40 минут при температуре $37^\circ C$. После инкубации в раствор добавили 125 мкл 10 % Трихлоруксусной кислоты. Полученную смесь с помощью центрифуги Elmi CM-50 (SIA «ELMI», Латвия) центрифугировали на 7 000 об/мин в течение 4 минут. Надосадочная жидкость собиралась и полученный супернатант хранился в течение суток в холодильнике [3, 4]. После 150 мкл полученного супернатанта добавляли 150 мкл реагента Брэдфорда. Изменение интенсивности синего цвета красителя не наблюдалось или было незначительно, а значит реакция гемоглобина с катепсином D не подходит для оценки изменения активности последнего.

Для определения активности каталазы в лунку 96-ти луночного планшета добавляли 50 мкл 1 %-го раствора поли(третбутилацетат-ко-этилакрилат-ко-метакриловая кислота), Ко – сополимер (МАКАК), 15 мкл поверхностно активного вещества – цетилтриметиламмоний бромида (ЦТАБ) в концентрации 0.0001 М, 10 мкл метилового фиолетового в концентрации 0, 60 мкл воды Millipore, 10 мкл гомогената индейки, разбавленного до необходимой концентрации и 15 мкл 1 М перекиси водорода. При этом наблюдалось образование пены тем больше, чем более концентрированным был добавленный в реакционную смесь раствор гомогената индейки, поскольку

чем больше концентрация гомогената, тем больше концентрация каталазы в нем.

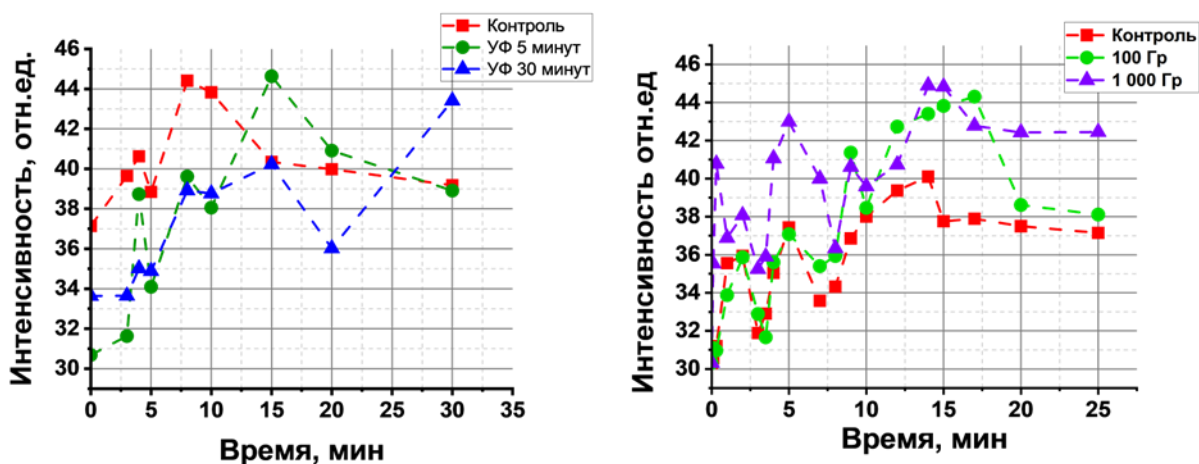


Рисунок 1. Зависимость интенсивности белого цвета раствора от времени, прошедшего с момента добавления перекиси водорода в раствор:

- (а) – для образцов, облученных УФ-излучением в течение 5 и 30 минут;
- (б) – для образцов, облученных пучком ускоренных электронов в дозах 100 Гр и 1 000 Гр

По результатам воздействия на гомогенат УФ-излучения был построен график зависимости интенсивности белого цвета, отражавшего интенсивность образования пены в реакционной смеси, от времени, прошедшего с момента добавления в раствор перекиси водорода (рис. 1а). Интенсивность белого цвета измеряли с помощью программного обеспечения «Fiji» [2]. Экспериментальные данные были получены в течение часа с момента проведения облучения. Из рисунка видно, что сразу после добавления в раствор перекиси (этому моменту времени соответствует точка с абсциссой «0») наиболее активное пенообразование наблюдалось в растворе, приготовленном из контрольных образцов, в этом же растворе пик интенсивности наблюдался раньше, чем в двух других. При увеличении времени воздействия УФ-излучением, время ожидания начала пенообразования также увеличилось, однако максимальная интенсивность реакции одинакова во всех случаях.

На рисунке 1б представлен график зависимости интенсивности белого цвета раствора от времени, прошедшего с момента добавления перекиси водорода в лунки планшета содержащие ЦТАБ, МАКАК, воду и гомогенат, подготовленный из образцов, облученных в дозах 100 Гр и 1 000 Гр. Представленные результаты были получены спустя сутки после воздействия на образцы пучком ускоренных электронов. При таком воздействии на печень индейки наиболее активно и быстро реакция протекала при использовании образцов, облученных в дозе 1000 Гр. К 15 минуте наблюдения интенсивность пенообразования облученных образцов сравнивалась, однако после достижения пика интенсивность реакции с гомогенатом, приготовленным из мяса с поглощенной дозой 100 Гр, начала падать и к 25 минуте наблюдения сравнивалась с интенсивностью реакции с контрольным образцом. Реакция с гомогенатом индейки, приготовленным из необлученного образца протекала с наименьшей интенсивностью.

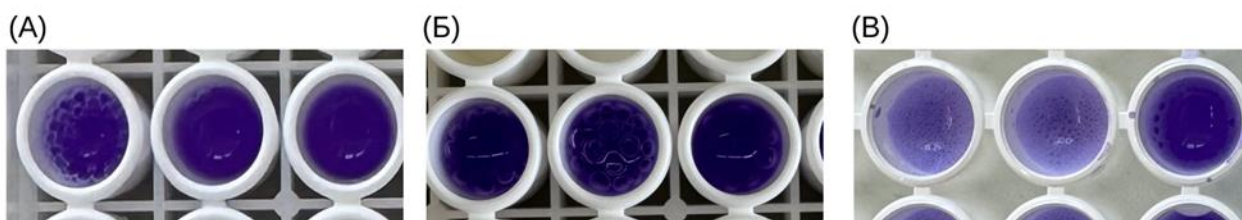


Рисунок 2. Фотографии реакционной смеси с добавлением гомогената печени индейки, приготовленного из образцов, облученных в дозе 1 000 Гр:

- (а) – спустя сутки после облучения ускоренными электронами;
- (б) – спустя 14 дней после облучения ускоренными электронами;
- (в) – спустя 16 дней после облучения ускоренными электронами

Для оценки влияния облучения ускоренными электронами на активность каталазы спустя 14 и 16 дней после проведения обработки проводились индикаторные реакции проводились повторно. На рисунке 2 представлены фотографии реакционных смесей, иллюстрирующие изменение вида пены, образующейся в ходе реакций. При проведении серий экспериментов на 14 и 16 день не удалось установить закономерностей интенсивности протекания реакции от поглощенной дозы, так как результаты каждой серии экспериментов значительно отличались друг от друга.

По результатам исследования, направленного на поиск возможных маркеров воздействия на продукт ионизирующего излучения среди ферментов, каталаза оказалась наиболее перспективной для исследования и возможного применения на практике, так как интенсивность протекания реакции возможно оценить и без помощи дополнительных программ и оборудования, а также исходя из интенсивности реакции можно качественно оценить, прошло ли мясо

индейки обработку ионизирующим излучением и предположить характер излучения, воздействовавшего на него.

Список литературы

1. Blackburn C. Food Irradiation and Aerial as an IAEA Collaborating Centre // Food & Environmental Protection Newsletter. 2021. V. 24. № 1.

2. Электронный ресурс [https://imagej.net/software/fiji/#publication].

3. Calpain and cathepsin activities in post mortem fish and meat muscles / R. Chéret, C. Delbarre-Ladrat, M. de Lamballerie-Anton, V. Verrez-Bagnis // Food Chemistry. 2007. V. 101(4). PP. 1474-1479.

4. Effect of high hydrostatic pressure on the oxidation of washed muscle with added chicken hemoglobin / R. Bou, L. Mar, J. Rachel, A.G.-R. José // Food Chemistry. 2019. V. 292. PP. 227-236.

EFFECT OF ACCELERATED ELECTRON BEAMS AND ULTRAVIOLET RADIATION ON PROTEIN MOLECULES CONTAINED IN TURKEY LIVER

Mezhetova I.T.¹, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshovskaya P.U.^{1,2}, Beklemishev M.K.³, Chernyaev A.P.^{1,2}, Rodin I.A.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 Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Chemistry), Leninskie Gory 1, bld. 3, Moscow, Russian Federation, 119991

In this work the prospect of using enzyme activity as markers of radiation treatment of turkey liver was investigated. For this purpose we searched for indicator reactions for the following enzymes: catalase, alkaline phosphatase, cathepsin D. In this study, catalase showed the greatest potential for use as a marker of radiation treatment because the reaction of this enzyme with peroxide proceeded differently in samples irradiated with an electron beam at doses of 0 Gy, 100 Gy, and 1,000 Gy. This reaction also proceeded differently when the samples were exposed to ultraviolet radiation for 0 min, 5 min, and 10 min.

Keywords: radiation treatment, accelerated electrons, ultraviolet radiation, enzymes, catalase, cathepsin D, alkaline phosphatase, spectrophotometry

УДК 633.854.54: 621.373.826

ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ СОРТОВ ЛЬНА МАСЛИЧНОГО

Симагин А.Д.^а, Симагина А.С., Вертикова Е.А., Барнашова Е.К., Брит О.Д.

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 alexander.d.simagin@yandex.ru

Для оценки действия лазерного излучения на растения была проведена обработка семян льна масличного сортов Ручеек и Светлячок. Семена были высеяны на полевой опытной станции в 2024 году. Обработка лазером сорта Светлячок не повлекла каких-либо серьезных изменений качественных и количественных признаков. В то время как у сорта Ручеек повысилось количество семян с одного растения, сохранность растений, понизилось содержание клетчатки в семенах, а также снизилась длительность вегетационного периода. Кроме всего прочего было выявлено растение с измененным цветом венчика.

Ключевые слова: лен масличный, лазерное излучение, длина волны, качественные признаки, количественные признаки

Лен масличный является ценной сельскохозяйственной культурой. В России его возделывают на территории свыше 1 млн. га. При всем этом масличный лен – это одна из немногих культур, потребность в которой на 100 % обеспечивается отечественными семеноводами. Лен обладает достаточно широкой экологической пластичностью, что позволяет возделывать его на довольно широкой территории.

В списке 10 сортов лидеров по объему высева семян по данным Россельхозцентра все сорта этой культуры представлены отечественной селекцией [5]. Процесс выведения новых сортов льна масличного в РФ хорошо отработан, поэтому каждый год в Госреестр включают минимум 2 новых сорта. При ведении селекционного процесса льна масличного селекционеры в основном применяют метод гибридизации лучших образцов. Однако применяются и другие методы для получения исходного материала. Использование индуцированного мутагенеза также является одним из методов при введении селекции этой культуры.

При индуцировании мутагенеза лазерным излучением необходимо учитывать длину волны и мощность лазера. Лазер в красном излучении имеет длину волны в диапазоне 630-670 нм, в зеленом – 510-530 нм, в синем – 445-450 нм. Известно, что при длине волны 488-514 нм увеличивается количество хромосомных аббераций, что ведет к увеличению выхода мутантов [1]. При этом до сих пор нет единого мнения почему происходят эти изменения. Одной из самых распространенных теорий природы этих нарушений является резонансное взаимодействие квантов лазерного света с молекулами ДНК [3].

Немалую роль играет и экспозиция облучения лазерными лучами. При обработке лазером сухих семян принята экспозиция в 60 минут для многих сельскохозяйственных культур. Но в то же время, если облучению подвергаются пыльники растений на начальном этапе микроспорогенеза, эту экспозицию рекомендуется уменьшить в два раза [4].

Зачастую вместе с применением лазера применяют и химические мутагены такие как этиленмин, диметилсульфат, нитрозометилмочевина и многие другие, так как считается что при воздействии лазерным излучением происходит постепенная

денатурация молекулы ДНК, что делает ее незащищенной перед химическими мутагенами и мы имеем усиление эффекта от их применения [4].

Таким образом, с целью проверки действия лазерного излучения на растения льна масличного облучению были подвергнуты два сорта этой культуры (Ручеек и Светлячок).

В эксперименте изучалось действие лазера на парах меди, который излучает волны в зеленом спектре с длиной волны 510,6 нм и в желтом спектре с длиной волны 578,2 нм [2]. Мощность такого лазера может достигать 5000 кВт. Лазер в нашем исследовании имел суммарную мощность в импульсе 10 кВт. Обработку сухих семян проводили в течение 20 секунд.

Подготовленные семена высевали на территории полевой опытной станции РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева. Посев проводили ручным способом. Норма высева – 100 семян на 1 метровый рядок.

В 2024 году на полевой опытной станции сложились благоприятные метеорологические условия для возделывания масличного льна. На рисунке 1 представлены данные по метеорологическим показателям сезона 2024 года.

По ходу вегетации определяли наступление фенологических фаз. В таблице 1 представлены результаты оценки наступления фенологических фаз.

Из таблицы 1 видно, что образцы, обработанные лазером, созревали на 2-4 дня раньше, чем контрольные растения без обработки, что подтверждает предположение о том, что лазерное излучение способствует уменьшению длины вегетационного периода у сельскохозяйственных культур.

Еще при вегетации были видны различия между контрольными растениями и обработанными лазером. Самое явное различие произошло на сорте Ручеек, где одно растение при цветении имело белые лепестки, тогда как у сорта Ручеек они синие (рис. 2).

Уборку растений проводили при наступлении хозяйственной спелости у образцов. После уборки снопы подвешивали на полторы недели для просушивания. По истечении 1,5 недели проводили оценку структуры урожая. В таблице 2 представлены данные по структуре урожая собранных образцов.

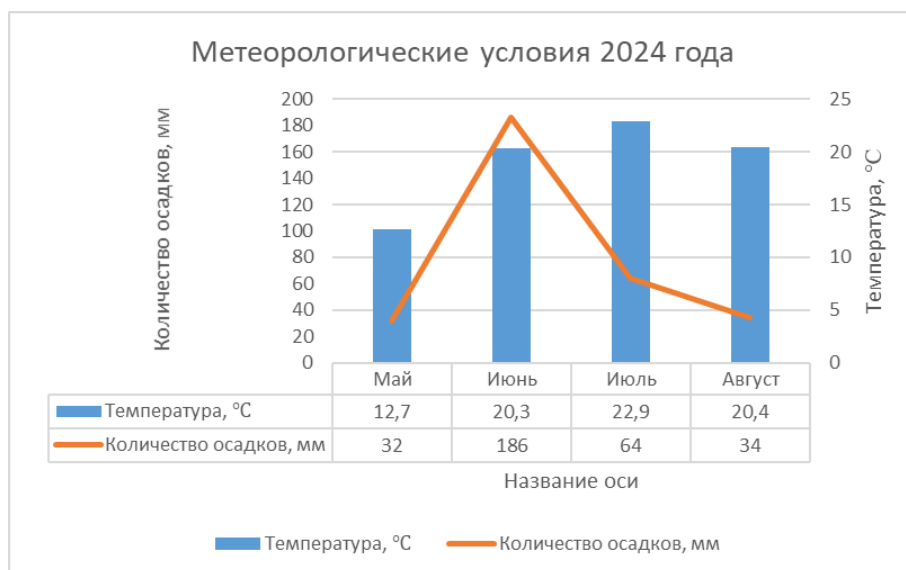


Рисунок 1. Метеорологические условия 2024 года

Таблица 1

Наступление фенологических фаз у растений, обработанных лазером в сравнении с контролем

Образец	Посев	Первые всходы	Елочка	Быстрый рост	Цветение	Зеленая спелость	Желтая спелость
Ручеек Л	17.05	20.05	27.05	07.06	25.06	04.07	16.07
Ручеек конт	17.05	23.05	30.05	07.06	27.06	05.07	20.07
Светлячок Л	17.05	21.05	29.05	07.06	26.06	03.07	28.07
Светлячок конт.	17.05	23.05	30.05	07.06	27.06	05.07	20.07

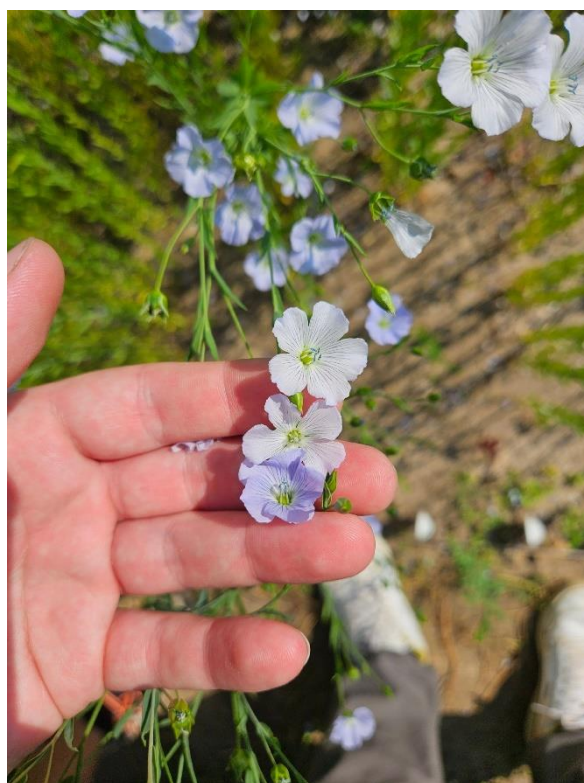


Рисунок 2. Растение сорта Ручеек с измененной окраской венчика

Результаты оценки структуры урожая льна масличного

Анализ структуры урожая льна-долгунца 2024 г (средние)								
Сорт	Анализ растения			Анализ соцветия				Количество стеблей, шт
	Высота растений, см	Техническая длина, см	Мык-лость	Количество коробочек на одном растении, шт	Количество семян с одного растения, шт	Среднее количество семян в одной коробочке	Масса семян с растения, г	
Светлячок л	67.6	54.5	341.8	12.9	72.2	5.8	0.5	30.0
Светлячок к	72.7	56.2	307.2	19.3	107.2	5.5	0.7	39.0
Ручеек л	74.1	63.2	468.9	8.6	52.0	6.3	0.3	92.0
Ручеек к	72.9	62.3	446.3	6.4	42.7	6.4	0.3	52.0

Из таблицы 2 видно, что сорт Светлячок при обработке лазером показал небольшое снижение в показателях высоты растений, технической длины, количества коробочек, количества семян. Так же при обработке лазером Светлячок показал плохую сохранность к уборке (30 растений при сохранности контроля в 39 растений). При этом если смотреть на сорт Ручеек, то можно наблюдать обратную ситуацию. Ручеек показал очень высокий показатель мык-лости на уровне сортов льна-долгунца (468.9), что может говорить о высоком содержании качественного волокна в стебле. При этом у сорта Ручеек при

обработке лазером повысилось число семян с одного растения. Кроме всего прочего, у сорта Ручеек так же повысилась сохранность растений к уборке, если у контроля количество растений к уборке равнялось 52, то у обработанных растений сохранность составила 92 растения к уборке.

Кроме оценки структуры урожая были проверены и биохимические показатели семян льна масличного на приборе Инфраскан 3150. В таблице 3 представлены некоторые биохимические показатели испытываемых сортов.

Таблица 3

Биохимические показатели образцов в исследовании

Сорт	Масличность, %	Сырой протеин, %	Клетчатка, %
Светлячок л	44.6	23.2	13.9
Светлячок к	45.0	23.5	14.1
Ручеек л	43.8	24.9	13.4
Ручеек к	44.0	24.3	14.4

Как видно из таблицы 3, сильного снижения или увеличения масличности у образцов льна, обработанных лазерным излучением, выявлено не было. Однако у сорта Ручеек было выявлено снижение на 1 % содержания клетчатки в семенах по сравнению с контролем. Не стоит отрицать, что обработка лазером могла повлечь за собой изменение жирнокислотного состава масла. К сожалению, в рамках нашего опыта исследование жирнокислотного состава не проводилась.

Таким образом, наше исследование подтвердило тот факт, что у растений при обработке лазерным излучением повышается жизнеспособность, а также уменьшается вегетационный период. Обработка лазерным излучением также способна немного повысить урожайность и сохранность льна масличного. Однако стоит отметить, что многое зависит от самого

генотипа, так как даже в нашем опыте сорт Светлячок, обработанный лазером, не показал сильного изменения ни в вегетационном периоде, ни в показателях структуры урожая, ни в количественном соотношении масла, белка и клетчатки в семенах. В то же время, обработка сорта Ручеек повлекла за собой как изменение количественных признаков (длительность вегетационного периода, сохранность растений к уборке, количество семян с одного растения, снижение содержания клетчатки в семенах) так и изменение качественных признаков (изменение окраски венчика у одного растения).

Список литературы

1. Unnikrishna P.P.R., Nambisan P., Nampoori V.P.N. Lasers as mutagens // I.Sci.Ind.Res. 1998. V. 57. № 10-11. PP. 658 - 663.

2. Биологическое действие двухчастотного лазерного импульсного излучения при предпосевной обработке семян риса на ранних стадиях развития в стрессовых условиях среды / Л.М. Апашева, В.В. Савранский, М.И. Будник [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 4. С. 72-76. DOI 10.31857/S2500208224040132.

3. Лысиков В.Н., Плешанов П.Г., Бляндур О.В. Лазерный мутагенез растений и резонансный механизм

его действия // Проблемы фотоэнергетики растений. Кишинев: Штиинца, 1975. Вып. 3. С. 160-171.

4. Использование лазерного мутагенеза в селекции растений в России и за рубежом / Г.А. Ренгартен, С.А. Емелев, Е.Ю. Савиных, М.В. Черемисинов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 5. С. 55-61.

5. Информационный листок Россельхозцентра. 2024. № 4. URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/016/vq0nu1ktxhfm5ctm1zmjvrckmfm68kl4/Информационный%20листок%20%20N%20%204.pdf> (дата обращения 04.10.2024).

THE EFFECT OF LASER RADIATION ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF OILSEED FLAX VARIETIES

Simagin A.D., Simagina A.S., Vertikova E.A., Barashkova E.K., Brit O.D.

Russian State Agrarian University – MTAА, Timiryazevskay st. 49, Moscow, Russian Federation, 127434

To evaluate the effect of laser radiation on plants, the treatment of oilseed flax seeds of the Rucheek and Firefly varieties was carried out. The seeds were sown at a field experiment station in 2024. Laser treatment of the Firefly variety did not entail any serious changes in qualitative and quantitative characteristics. While the Trickle variety has increased the number of seeds from one plant, the safety of plants, the fiber content in seeds has decreased, and the duration of the growing season has decreased. Among other things, a plant with a modified corolla color was identified.

Keywords: *oilseed flax, laser radiation, wavelength, qualitative signs, quantitative signs*

Oilseed flax is a valuable oilseed crop. In Russia, it is cultivated on an area of over 1 million hectares. With all this, oilseed flax is one of the few crops that is 100 % supplied by domestic seed growers. Flax has a fairly wide ecological plasticity, which allows it to be cultivated over a fairly wide area.

When inducing mutagenesis by laser radiation, it is necessary to take into account the wavelength and power of the laser. The laser in red radiation has a wavelength in the range of 630-670 nm, in green – 510-530 nm, in blue – 445-450 nm. It is known that at a wavelength of 488-514 nm, the number of chromosomal aberrations increases, which leads to an increase in the yield of mutants.

In the experiment, the effect of a copper vapor laser was studied, which emits waves in the green spectrum with a wavelength of 510.6 nm and in the yellow spectrum with a wavelength of 578.2 nm [2]. The power of such a laser can reach 5000 kW. The laser in our

study had a total pulse power of 10 kW. The treatment of dry seeds was carried out for 20 seconds.

In general, our study confirmed the fact that plants with laser radiation treatment increase their viability, as well as reduce the growing season. Laser radiation treatment is also able to slightly increase the yield and safety of oilseed flax. However, it is worth noting that much depends on the genotype itself, since even in our experience, the Firefly variety treated with a laser did not show a strong change either in the growing season, or in the indicators of the crop structure, or in the quantitative ratio of oil, protein and fiber in seeds. At the same time, the processing of the Rucheek variety entailed both a change in quantitative characteristics (the duration of the growing season, the safety of plants for harvesting, the number of seeds per plant, a decrease in the fiber content in seeds) so is the change in qualitative characteristics (a change in the color of the corolla in one plant).

ВЛИЯНИЕ ДОЗ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФИТОПАТОГЕННУЮ МИКРОФЛОРУ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

Суслова О.В.^а, Лой Н.Н., 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 belovol-1983@mail.ru

В полевом опыте 2024 года на дерново-подзолистой супесчаной почве изучали влияние электронного облучения (в двух разных режимах: I – энергия электронов 100 кэВ; II – энергия электронов 130 кэВ) семян ярового ячменя на пораженность и распространенность гельминтоспориоза на корнях растений. В результате отмечено, что в фазу колошения в варианте с облучением в дозе 5.0 кГр (I) отсутствовало поражение растений. Минимальные значения данного показателя отмечены в период кущения ярового ячменя: контроль – 51.7 %, доза 2.0 кГр (I) – 50.0 % и 3.0 кГр (I) – 50.0 %. В фазу колошения в варианте 5.0 кГр (II) зафиксировано 16.7 % пораженных растений.

Ключевые слова: электронное облучение, ячмень яровой, корневые гнили, степень поражения, распространенность болезни

Вопросы повышения эффективности управления производством зерна является наиболее важной целью агропромышленного комплекса, так как зерновое производство это стратегическая отрасль сельского хозяйства, направленная на импортозамещение и экспорт ориентированное производство в будущем [1].

Характерной особенностью экосистемы зернового биоценоза в последние годы является нарастание вредоносности корневых гнилей разной этиологии, пятнистостей листьев и колоса, увеличение ряда вредителей. На зараженных семенах обнаруживают в основном грибы родов *Fusarium*, *Helminthosporium*, а в последнее время все больше – *Alternaria*. Микромицеты вызывают не только порчу семян, снижают их посевные качества, но и по данным отдельных исследователей альтернария из-за своей токсигенности представляет опасность для здоровья человека [2].

Основными направлениями дальнейшего увеличения объемов производства зерна и повышения эффективности возделывания зерновых культур в хозяйстве является последовательная интенсификация на базе развития химизации и мелиорации, внедрения прогрессивных технологий выращивания и уборки зерна, применение новых более продуктивных сортов и гибридов зерновых культур [3].

В предпосевной подготовке семян на данный момент радиационные технологии являются перспективным методом. Для этих целей используют низкоэнергетическое (до 300 кэВ) электронное излучение [4].

Большие дозы радиации угнетают рост и развитие растений, в то время как малые дозы могут оказывать стимулирующее действие [5]. Одним из основных эффектов, наблюдаемых в диапазоне малых доз облучения, является радиационный гормезис.

При этом у растений наблюдается увеличение всхожести и энергии прорастания семян, пролиферативной активности клеток, стрессоустойчивости, урожайности, ферментативной активности, интенсивности протекания окислительных процессов, усиливается синтез РНК и ДНК, белков, липидов [6].

За последние десятилетия высокотехнологичная обработка, к которой можно отнести обработку пучками заряженных частиц, находит все большее распространение в разных областях промышленности, науки и техники [7, 8]. 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. Именно предпосевная обработка поверхностного слоя посевного материала является одной из наиболее актуальных задач, поскольку, позволяет проводить дезинфекцию поверхности зерна, не только не повреждая зародыш, но и обеспечивая его стимуляцию [9, 10].

В связи с этим актуальным вопросом является изучение биологической эффективности предпосевной обработки семян ячменя электронным излучением на жизнеспособность фитопатогенной микрофлоры.

Целью настоящих исследований явилось изучение влияния предпосевого облучения ярового ячменя низкоэнергетическим электронным излучением в широком диапазоне доз на поражаемость растений возбудителями корневой гнили.

Материалы и методы

Объектом исследований был яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир.

Облучение семян проводили за 3 суток до посева в ИСЭ СО РАН (г. Томск) на широко апертурном

электронном ускорителе «Дуэт» с сетчатым плазменным катодом и выводом генерируемого пучка большого сечения в атмосферу [11]. Семена ярового ячменя были уложены в целлофановый пакет, что позволяло разровнять зерно в один слой на расстоянии 20 мм от выводного окна ускорителя. Облучение проводили с одной стороны в диапазоне доз 1-5 кГр, в двух разных режимах – I (энергия электронов 100 кэВ) и II (энергия электронов 130 кэВ). Мощность излучения 100 Гр/импульс. Суммарная введенная доза набиралась путем изменения количества импульсов. При этом глубина поглощения дозы не превышала 300 мкм.

В период с мая по август 2024 года был проведен полевой опыт на экспериментальном участке НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ на дерново-подзолистой супесчаной почве, на делянках, расположенных рандомизированным способом. Каждый из вариантов схемы размещали повторно на трех делянках (трехкратная повторность) [12].

Распространенность и пораженность растений гельминтоспориозом (корневая гниль) (возб. *Bipolaris sorokiniana*, (синоним *Helminthosporium sativum* Paml. King, et Bakke)) учитывали на корнях растений согласно общепринятым методикам [13, 14]. Данные показатели оценивали на 21-е сутки после посева (фаза кущения) и 60-е сутки после посева (фаза колошения).

Экспериментальные данные анализировали методами непараметрической статистики с помощью программ MS Excel и STATISTICA. Статистическую значимость различий оценивали с помощью критерия Стьюдента, а также по НСР (наименьшей существенной разнице) при 95 %-ном уровне значимости.

Результаты и их обсуждение

В течение вегетационного периода 2024 г. учитывали пораженность растений ярового ячменя гельминтоспориозом, а также его распространенность на корнях.

Развитие корневой гнили в фазу кущения зависело от дозы облучения. При облучении семян в дозе 1.0-3.0 кГр (II) пораженность корней гельминтоспориозом была максимальной – 50.0 %, при значении в контроле 51.7 % (табл. 1). Увеличение мощности дозы (варианты 1.0, 2.0 кГр) показало достоверное снижение на 15.0 % данного показателя, относительно контроля. Пораженность растений данным заболеванием в вариантах 5.0 кГр (I) и 5.0 кГр (II) существенно снижалось до 16.7 % и 15.0 %, к контролю. Аналогичная тенденция сохранилась и по распространенности гельминтоспориоза. При дозе 5.0 кГр (I) и 5.0 кГр (II) были отмечены минимальные значения: 60 % и 53 %, что достоверно ниже контрольного уровня 100 %.

Таблица 1

Развитие гельминтоспориоза на корнях 21 суточных растений (фаза кущения) ярового ячменя

Доза облучения, кГр	Пораженность корней гельминтоспориозом	
	степень поражения, %	распространенность, %
0 (контроль)	51.7	100.0
1.0 кГр (I)	50.0	100.0
2.0 кГр (I)	50.0	100.0
3.0 кГр (I)	50.0	100.0
4.0 кГр (I)	28.3*	93.3
5.0 кГр (I)	16.7*	60.0*
1.0 кГр (II)	36.7*	93.3
2.0 кГр (II)	36.7*	100.0
3.0 кГр (II)	31.7*	86.7
4.0 кГр (II)	18.3*	60.0*
5.0 кГр (II)	15.0*	53.3*
НСР ₀₅	12.9	18.6

* – здесь и далее различия с контролем статистически значимы при $P \leq 0.5$

При дальнейшем росте растений зафиксировано увеличение фитопатогенной активности на корнях ярового ячменя. В вариантах 1.0 кГр (I), 2.0 кГр (I), 3.0 кГр (I) и контроле пораженность гельминтоспориозом была максимальной: 70.8 %, 62.5 %, 75.0 % и 70.8 % (табл. 2). При дозе облучения 5.0 кГр (I) значение данного показателя составили 0 %. Увеличение

мощности дозы снизило степень пораженности корней на вариантах 1.0-4.0 кГр (II). При дозе 5.0 кГр (II) данный показатель был минимальным – 4.2 %. Аналогичная закономерность сохранилась и по распространенности данного заболевания. В дозе 5.0 кГр (I) – 0 %, 5.0 кГр (II) – 16.7 %, сравнительно с контролем – 100 %.

Развитие гелиминтоспориоза на корнях 60 суточных растений (фаза колошения) ярового ячменя

Доза облучения, кГр	Пораженность корней гелиминтоспориозом	
	степень поражения, %	распространенность, %
0 (контроль)	70.8	100.0
1.0 кГр (I)	70.8	100.0
2.0 кГр (I)	62.5	100.0
3.0 кГр (I)	75.0	100.0
4.0 кГр (I)	33.3*	100.0
5.0 кГр (I)	0	0
1.0 кГр (II)	50.0*	100.0
2.0 кГр (II)	37.5*	100.0
3.0 кГр (II)	20.8*	66.7*
4.0 кГр (II)	29.2*	83.3
5.0 кГр (II)	4.2*	16.7*
НСР ₀₅	20.2	25.5

Заключение

В результате проведенных полевых исследований 2024 г. отмечены изменения пораженности корневой системы растений гелиминтоспориозом, а также распространенности болезни под влиянием низкоэнергетического электронного излучения. Пораженность корней имела максимальные значения на 60-ти суточных растениях: контроль – 70.8 %, доза 1.0 кГр (I) – 70.8 % и 3.0 кГр – 75.0 %. Зафиксировано в фазу колошения в варианте 5.0 кГр (I) отсутствие пораженных растений. Минимальные значения данного показателя отмечены в период кущения ярового ячменя: контроль – 51.7 %, доза 2.0 кГр (I) – 50.0 % и 3.0 кГр (I) – 50.0 %. Зафиксировано в фазу колошения в варианте 5.0 кГр (II) 16.7 % пораженных растений. При дозе 5.0 кГр в режимах (I) и (II) распространенность гелиминтоспориоза на корнях 21 и 60-ти суточных растений достигла минимального значения.

Список литературы

1. Барковская Л.М. Экономическая эффективность функционирования зернового производства в условиях рынка: дис. канд. эконом. наук: 08.00.05. Новосибирск, 2006. 245 с.
2. Ганнибал Ф.Б., Орина А.С., Левитин М.М. *Альтернариозы сельскохозяйственных культур на территории России* // Защита и карантин растений. 2010. № 5. С. 30-32.
3. Строчкова Е.А., Красников А.Г. Перспективы развития производства зерна в Рязанской области // Актуальные вопросы экономики и управления АПК: материалы международной научно-практической конференции. Рязань: РГАТУ, 2013. С. 293-297.
4. Чернобровкин Т.В., Вазиров Р.А., Соковнин С.Ю. Влияние облучения низкоэнергетическим электронным пучком на прорастание и рост вида *Triticum L* // Современные проблемы радиобиологии, радиозологии и агроэкологии: Сборник докладов IV

Международной научно-практической конференции (Обнинск, 22–24 сентября 2021 года). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 103-107.

5. Jan S., Parween T., Siddidi T.O. Mahmooduzzafar Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products // Environ. Rev. 2012. V. 20. PP. 17-39.

6. Calabrese E.J., Blain R.B. Hormesis and plant biology // Environmental Pollution. 2009. V. 157. PP. 42-48.

7. 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.

8. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 224 с.

9. 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. V. 1393. P. 012107.

10. Козьмин Г.В., Гераськин С.А., Санжарова Н.И. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2015. 400 с.

11. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere // Instruments and Experimental Techniques. 2015. V. 58. PP. 687-695.

12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 5-е изд. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

13. Попов Ю.В. Шкала учета корневых гнилей // Зерновое хозяйство. 1985. № 9. С. 21.

14. Болезни зерновых колосовых культур (рекомендации по проведению фитосанитарного

THE EFFECT OF THE ELECTRON IRRADIATION DOSE ON THE PHYTOPATHOGENIC MICROFLORA OF SPRING BARLEY

Suslova O.V., Loy N.N., 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

In field experiments in 2024 on sod-podzolic sandy loam soil, the effect of electron irradiation (in two different modes: I – electron energy of 100 keV; II – electron energy of 130 keV) of spring barley seeds on the incidence and prevalence of helminthosporiosis on plant roots was studied. As a result, it was noted that during the earing phase in the variant with irradiation at a dose of 5.0 kGy (I), there was no damage to plants. The minimum values of this indicator were noted during the tillering of spring barley: control – 51.7 %, dose 2.0 kGy (I) – 50.0 % and 3.0 kGy (I) – 50.0 %. During the earing phase, 16.7 % of affected plants were recorded in the 5.0 kGy (II) variant.

Keywords: *electron irradiation, spring barley, root rot, degree of lesion, prevalence of the disease*

In the pre-sowing preparation of seeds, radiation technologies such as low-energy electronic radiation are a promising method. Radiation treatment can stimulate plant growth and development, increasing germination, stress resistance and yield. Treatment with low-energy electron beams makes it possible to disinfect the grain surface without damaging the embryo.

An urgent issue is the study of the biological effectiveness of pre-sowing treatment of barley seeds with electronic radiation on the viability of phytopathogenic microflora.

The purpose of these studies was to study the effect of pre-sowing irradiation of spring barley with low-energy electronic radiation in a wide range of doses on the plant's susceptibility to root rot pathogens.

The object of research was spring barley of the Vladimir variety. The irradiation of seeds was carried out 3 days before sowing on the electronic accelerator "Duet" at the ISE SB RAS (Tomsk). The seeds were placed in a cellophane bag and irradiated on one side in the dose range 1-5 kGy, in two modes: I (electron energy 100 keV) and II (electron energy 130 keV). The radiation

power was 100 Gy/pulse, the dose absorption depth did not exceed 300 microns.

From May to August 2024, a field experiment was conducted at the experimental site of the NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE on sod-podzolic sandy loam soil. The plots were arranged in a randomized way with three-fold repetition.

The prevalence and infestation of plants with helminthosporiosis (root rot) was assessed on the 21st and 60th days after sowing. The data were analyzed using nonparametric statistical methods.

As a result of the conducted field studies in 2024, changes in the infestation of the root system of plants with helminthosporiosis, as well as the prevalence of the disease under the influence of low-energy electronic radiation, were noted. In the earing phase, in the variant with irradiation at a dose of 5.0 kGy (I), there was no damage to plants. The minimum values of this indicator were noted during the tillering of spring barley. In the earing phase, 16.7% of affected plants were recorded in the 5.0 kGr (II) variant.

УДК 664.727:615.918:582.28

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СЕМЕНА, ЗАГРЯЗНЕННЫЕ МИКОТОКСИНАМИ

Титова Д.И.^а, Харламов В.А., Меджидов И.М., Басырова 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

В результате воздействия гамма-излучения на природно-загрязненное микотоксинами зерно кукурузы и пшеницы не происходило достоверного изменения содержания токсина Т-2 и зеараленона в облученных образцах по сравнению с необлученным контролем. Однако после облучения в дозе 1 кГр фиксировали стимулирующее действие на содержание охратоксина А в зерне ячменя. Содержание охратоксина А в образце достоверно увеличивалось в 2.5 раза по сравнению с необлученным контролем.

Ключевые слова: микотоксины, удаление микотоксинов, физический метод, облучение, обеззараживание зерна

В настоящей работе представлены новые экспериментальные данные по влиянию гамма-излучения на семена важнейших сельскохозяйственных культур, природно-загрязненные микотоксинами (охратоксин А, зеараленон, Т-2 токсин). Согласно современным обзорным публикациям, результаты исследовательских работ значительно разнятся и, зачастую, противоположны в оценке степени влияния гамма-излучения на микотоксины в семенах различных культур [1-3]. Поэтому представляется актуальной дальнейшая оценка влияния гамма-излучения на образцы круп и зерновых, природно-загрязненные микотоксинами, с целью дальнейшего повышения микотоксикологической безопасности пищевых продуктов и кормов.

В данной работе использовали семена ячменя, пшеницы и кукурузы, естественным образом загрязненные исследуемыми микотоксинами: охратоксином А, зеараленоном, Т-2 токсином. Готовили навеску 10 г исследуемого образца, далее подвергали воздействию гамма-излучения в дозах 1, 5, 10, 15 и 30 кГр; контроль не облучали. Облучение проводили на установке ГУР-120 (⁶⁰Со). Далее образцы экстрагировали метанолом, соблюдая соотношение масса образца: объем экстрагента = 1:5. Перемешивали для полной экстракции не менее 40 мин, фильтровали экстракт через фильтровальную бумагу «синяя лента». Затем проводили анализ на микотоксины по протоколу поставщика ИФА наборов микотоксинов «ТЕСТСИП». Подсчитывали исследуемый показатель – содержание микотоксинов (мкг/кг).

Полученные результаты не показали возможность использования гамма-облучения в дозах 1...30 кГр для снижения содержания зеараленона в природно-загрязненном зерне пшеницы. Аналогично, результаты исследования не продемонстрировали снижение содержания токсина Т-2 в природно-загрязненном зерне кукурузы после гамма-облучения в дозах 1...30 кГр.

Однако в результате воздействия гамма-излучения в дозе 1 кГр на природно-загрязненное охратоксином А зерно ячменя фиксировали достоверное увеличение в 2.5 раза содержания этого микотоксина в образце по сравнению с необлученным контролем, так и с образцами, облученными в дозах 5, 10, 15 и 30 кГр (рис. 1).

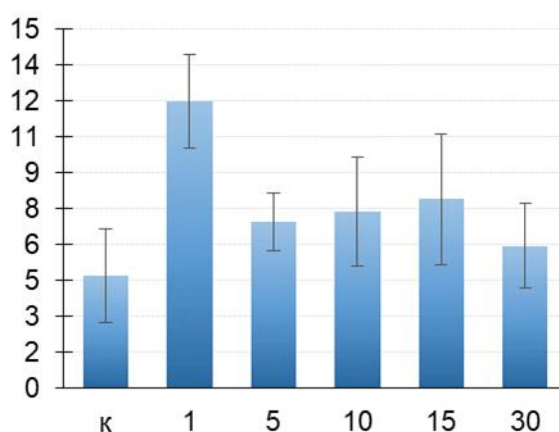


Рисунок 1. Концентрация охратоксина А (мкг/кг) в ячмене. На гистограмме ср.знач. ± станд. отклон. в контроле и в образцах после облучения в дозах 1, 5, 10, 15 и 30 кГр

В то же время полученные результаты не продемонстрировали способность гамма-излучения в более высоких дозах (5, 10, 15 и 30 кГр) к снижению содержания охратоксина А в природно-загрязненном зерне ячменя. Согласно литературным данным, у токсигенных грибов может быть стимулирована выработка микотоксинов после воздействия определенных доз гамма-излучения [4]. После облучения при не высоких дозах, порядка 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 и 2.0 кГр спор или мицелия, некоторые токсигенные грибы продуцируют больше охратоксина А, чем исходные не облученные [5].

Список литературы

1. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н. Физические методы снижения содержания микотоксинов в кормах и их применение в комбикормовой промышленности (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021. Т. 22. №1. С. 32-46.
2. Левитин М.М., Джавахия В.Г. Токсигенные грибы и проблемы продовольственной безопасности (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 12. С. 5-11.
3. Кучинский М.П., Крашевская Т.П., Кучинская Г.М. Биологические методы снижения содержания микотоксинов в рационах животных (обзор) // Эпизоотология Иммунобиология Фармакология Санитария. 2024. № 2. С. 52-58.

4. Paster N., Bullerman L.B. Mould spoilage and mycotoxin formation in grains as controlled by physical means // International Journal of Food Microbiology. 1988. № 7(3). PP. 257-265.

5. Calado T., Venâncio A., Abrunhosa L. Irradiation for mold and mycotoxin control: A review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2014. V. 13. № 5. PP. 1049-1061.

INFLUENCE OF GAMMA RADIATION ON MYCOTOXIN-CONTAMINATED SEEDS

Titova D. I., Kharlamov V. A., Medzhidov I. M., Basyrova 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

As a result of exposing naturally mycotoxin-contaminated corn and wheat grains to gamma radiation, no significant change in the amount of T-2 toxin or zearalenone in the irradiated samples compared to the non-irradiated control was showed. However, after exposure to gamma radiation at a dose of 1 kGy, a stimulating effect on the amount of ochratoxin A in barley grains was observed. The amount of ochratoxin A increased significantly in the irradiated sample compared to the non-irradiated control by 2.5 times.

Keywords: *mycotoxins, mycotoxin removal, physical method, irradiation, disinfection of grain*

Laboratory experiments were conducted to study the effect of gamma radiation on seed samples naturally contaminated with mycotoxins (ochratoxin A, zearalenone, T-2 toxin).

Assessing review reports of scientific articles were shown, contradictory results were published on the effect of gamma radiation on various seeds contaminated with mycotoxins.

Barley, wheat and corn seeds were used in the present research. The test samples weighing 10 g were prepared. Further, the samples were exposed to different gamma radiation doses of 1, 5, 10, 15 and 30 kGy; in addition, there was an untreated control. The samples were exposed to gamma radiation from a Cobalt-60 gamma source at the NRC «Kurchatov Institute» – RIRAE, Obninsk. Then the sample is extracted with methanol; sample weight to extractant volume ratio, 1:5. After stirring for 40 min, filtered through filter paper. Then, the content of mycotoxins in the samples (mcg/kg) was determined by the calibration

characteristics of the solutions of mycotoxins from the «TESTSIP» kits.

As a result of gamma radiation exposure to wheat grains naturally contaminated with zearalenone, no significant difference in the amount of zearalenone of irradiated samples compared to non-irradiated control was showed. Similarly, after gamma radiation exposure to corn grains naturally contaminated with T-2 toxin, no significant difference in the amount of T-2 toxin in irradiated samples compared to non-irradiated control was detected. The gamma radiation exposure to barley grains naturally contaminated with ochratoxin A at a dose of 1 kGy significantly increased the amount of ochratoxin A in the sample compared to the non-irradiated control and to samples irradiated at doses of 5, 10, 15 and 30 kGy. However, no significant differences compared to the non-irradiated control and samples irradiated at doses of 5, 10, 15 and 30 kGy were observed. Exposure at a dose of 1 kGy increased by 2.5 times the amount of ochratoxin A in irradiated barley grain.

УДК 631:621.384.65

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ (ДО 300 КЭВ) ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ АГРОКУЛЬТУР (ОБЗОР)

Харламов В.А.^а, Тхорик О.В., Меджидов И.М., Титова Д.И., Горбатов 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

Целью работы было изучить использование низкоэнергетических (до 300 кэВ) электронных ускорителей при возделывании агрокультур. Преимуществом данного вида излучения является возможность предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур. Электроны низких энергий (до 300 кэВ) обладают малой проникающей способностью (менее 0.2 мм), поэтому не повреждают зародыш семени. У радиационно обработанных семян снижается пораженность всходов болезнями. Посевные качества семян после облучения не нарушаются.

Ключевые слова: ускоритель электронов, растениеводство, фитосанитария, болезни растений, микробиологическая безопасность

По данным многолетних наблюдений ФАО и ВПП ООН мировые потери сельхозпродукции растительного происхождения оценивают от 10 до 30 %. Основными причинами этих потерь являются фитопатогены, микроорганизмы порчи и насекомые-вредители. В связи с засушливым климатом наиболее острый продовольственный кризис по данным ООН на 2023 год охватил 22 страны Африки, Азии и Тихого океана, Латинской Америки и Карибских островов. Более чем для 25 млн человек нехватка продовольствия стала критической [1, 2].

В семенном фонде хозяйств имеется существенная нехватка здорового материала [3]. Эта ситуация усугубляется, если хозяйства не соблюдают технологию возделывания культур. Таким образом, необходима обработка семян средствами защиты растений.

В настоящее время для защиты растений от болезней и вредителей наиболее широко применяют агрохимикаты. Данный метод удобен в применении, однако имеет ряд недостатков: опасный для человека и биоты химический состав; загрязнение грунтовых вод и почвы продуктами распада химических веществ.

Альтернативой агрохимикатам являются радиационные технологии. Радиационная обработка сельскохозяйственных культур является более экономичным и экологичным методом борьбы с порчей продукции.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ, для радиационной обработки пищевых продуктов безопасным считается использование гамма-установок с такими радионуклидами, как ^{60}Co либо ^{137}Cs ; электронного излучения с энергией не более 10 МэВ; тормозного излучения с энергией не более 5 МэВ. Каждый из этих видов излучения имеет как преимущества, так и недостатки. Гамма-установки и электронные ускорители (до 10 МэВ) обладают высокой проникающей способностью, достаточной для равномерной обработки продукта по всему объему [4]. Такие виды излучения наиболее эффективны для борьбы с насекомыми-вредителями, обеспечения микробиологической безопасности и продления сроков хранения продуктов. Однако гамма-излучение в дозе свыше 50 Гр не подходит для предпосевной обработки семян, поскольку повреждает зародыш.

Благодаря экономическим и практическим преимуществам расширяется применение облучательных установок с использованием низкоэнергетических пучков (электроны или мягкое рентгеновское

излучение). Такие альтернативные технологии дополняют имеющиеся мощности гамма-установок и позволяют более широко применять облучение пищевых продуктов [5]. В отличие от гамма-излучения электроны низких энергий обладают малой проникающей способностью (менее 0.2 мм) [6], что обеспечивает поверхностную обработку семян, не разрушая их внутренней оболочки.

Помимо свойств взаимодействия низкоэнергетических пучков с веществом, такие ускорители электронов отличаются от гамма-установок конструктивно. Особенностью низкоэнергетических электронных ускорителей, используемых в сельском хозяйстве, является наличие конвейера, обеспечивающего равномерную поверхностную обработку семян. Конвейер увеличивает производительность установки и облегчает труд обслуживающего персонала. Электронные ускорители не имеют радиоактивного источника, это делает установку более безопасной и не требующей дополнительной защиты персонала. В электронных низкоэнергетических ускорителях генерация электронного пучка происходит за счет вакуумной камеры, в которой между анодом и катодом рождается плазменный дуговой разряд. Из эмиссионного эмиттера, закрепленного на нижней части камеры, вылетают ускоренные под действием высокого напряжения электроны. Пролетая между сеткой и алюминиевой фольгой, при помощи пояса Роговского, они формируются в пучок, который осуществляет радиационную обработку сельскохозяйственных культур [6].

Целью работы – изучить использование низкоэнергетических (до 300 кэВ) электронных ускорителей при возделывании агрокультур.

Основной областью применения низкоэнергетических электронных ускорителей в сельском хозяйстве является предпосевная обработка семян. Показано, что семена зерновых (озимая пшеница, ячмень, рожь и тритикале), зараженные *Fusarium*, *Septoria*, *Bipolaris*, *Helminthosporium* spp., после обработки низкоэнергетическим электронным излучением прорастали быстрее необлученных [7-10]. Для пшеницы и ячменя при обработке электронами с энергией 145 кэВ глубина проникновения составляет 0.066 мм и 0.12 мм, соответственно, а для кукурузы при энергии электронов 125 кэВ – 0.06 мм.

В работе [11] показано влияние низкоэнергетического (до 160 кэВ) электронного пучка на пораженность болезнями и посевные качества семян ярового

ячменя. Облучение (1-8 кГр) семян ячменя за 5 дней до посева значительно снижает пораженность всходов болезнями ($p < 0.05$): для *Drechslera teres* (*Helminthosporium teres*) пораженность снижается в 2.1-3.2 раза в зависимости от дозы и мощности дозы, а для *Penicillium spp.* – в 3.5-13.7 раза при всех используемых дозах и мощностях. На заболеваемость *Fusarium spp.* облучение не влияло. Посевные качества семян после облучения даже повышаются [11].

Применение низкоэнергетического электронного излучения с целью предпосевной обработки пока остается экспериментальным методом.

Облучение низкоэнергетическими электронами в дезинфицирующей дозе (10 кГр) снижает общее количество микроорганизмов на поверхности сельхозпродуктов – микрофлору и патогенных для человека бактерий, обсеменяющих эти продукты [12-14]. Низкоэнергетические пучки с энергией, измеряемой в килоэлектронвольтах (кэВ), могут использоваться в относительно компактных лампах-излучателях, которые безопасно размещать в шкафах. Низкоэнергетические ускорители могут быть встроены в технологическую линию производства пищевых продуктов. Поскольку электроны не проникают сквозь всю массу продукта, они могут эффективно обрабатывать продукты, в которых микроорганизмы находятся в основном на поверхности, например, сухие семена, травы и специи, а также яйца в скорлупе, отрезки сырого мяса и птицы [5].

Таким образом, низкоэнергетическое (до 300 кэВ) электронное облучение сельскохозяйственных культур является перспективным направлением, набирающим популярность, требующим дополнительных исследований. Необходим подбор оптимальных режимов радиационной обработки различных сельскохозяйственных культур для снижения микробиологической обсемененности семян при одновременном сохранении или даже стимуляции всхожести и ростовых показателей зерна. Решение данной проблемы позволит увеличить урожайность сельскохозяйственных культур, снизить влияние болезней на растения.

Список литературы

1. WFP and FAO. 2023. Hunger Hotspots. FAO-WFP early warnings on acute food insecurity, June 2023 to November 2023 outlook. Rome. doi.org/10.4060/cc6206en

2. FAO. 2019. The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome.

3. Интенсификация производства зерна пшеницы, фитосанитария и защита растений в Центральном районе России / С.С. Санин, Б.И. Сандухадзе,

Р.З. Мамедов [и др.] // Агрехимия. 2020. № 10. С. 36-44.

4. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: научные основы и перспективы практического применения: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 5 / Под ред. чл.-кор. РАН Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2023. 181 с.

5. Обзор ядерных технологий. Доклад Генерального директора. IAEA.NTR, 2023. 86 с.

6. Generation, transport, and efficient extraction of a large cross-section electron beam into an air in an accelerator with a mesh plasma cathode / M.S. Vorobyov, T.V. Koval, N.N. Koval, N.B. Hung // Laser and Particle Beams. 2018. V. 36. № 1. PP. 22-28.

7. Detection methods for cereal grains treated with low and high energy electrons / M. Cutrubinis, H. Delincee, M. Stahl [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 2005. V. 72. PP. 639-644.

8. Erste ergebnisse zum nachweis einer elektronenbehandlung von mais zur beizung bzw. entkeimung und entwesung / M. Cutrubinis, H. Delincee, M. Stahl [et al.] // Gesunde Pflanzen. 2005. V. 57. № 5. PP. 129-136.

9. Evaluation of the effect of pre-sowing electron irradiation of barley seeds on plant development and disease incidence / N.N. Loy, N.I. Sanzharova, S.N. Gulina [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2064. № 1. P. 012101.

10. 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. V. 1393. № 1. P. 012107.

11. Low-energy electron beams for protection of grain crops from insect pests and diseases / T.V. Chizh, N.N. Loy, A.N. Pavlov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. 2018. V. 1115. № 2. P. 022025.

12. Comparison of gamma and electron beam irradiation in reducing populations of E. coli artificially inoculated on mung bean, clover and fenugreek seeds, and affecting germination and growth of seeds / X. Fan, K. Sokorai, A. Weidauer [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 2017. V. 130. PP. 306-315.

13. Hayashi T., Takahashi Y., Todoriki S. Sterilization of foods with low-energy electrons («soft-electrons») // Radiation Physics and Chemistry. 1998. V. 52. № 1-6. PP. 73-76.

14. Efficacy of soft-electron (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gamma-rays / O.K. Kikuchi, S. Todoriki, M. Saito, T. Hayashi // Food Microbiology and Safety. 2003. V. 68. № 2. PP. 649-652.

THE USE OF LOW-ENERGY (UP TO 300 KEV) ELECTRON ACCELERATORS IN THE CULTIVATION OF AGRICULTURAL CROPS (REVIEW)

Kharlamov V.A., Thorik O.V., Medzhidov I.M., Titova D.I., Gorbatov 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*

The aim of the research was to investigate the use of low-energy electron accelerators (up to 300 keV) in the cultivation of agricultural crops. This type of radiation has the advantage of being able to pre-treat agricultural seeds before sowing. Low-energy electrons have a low penetration power (less than 0.2 millimeters), so they do not damage the seed embryo. As a result, the incidence of seed germination diseases is significantly reduced after radiation treatment. The irradiation process does not impair the sowing qualities of seeds.

Keywords: *electron accelerator, crop production, phytosanitary, plant diseases, microbiological safety*

УДК 539.1.04

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ВСХОЖЕСТЬ, УРОЖАЙНОСТЬ И ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чибисова М.С.^{1,a}, Близнюк У.А.^{1,2,4}, Зубрицкая Я.В.^{1,2,4}, Чуликова Н.С.³, Никитченко А.Д.¹, Борщеговская П.Ю.^{1,4}, Малюга А.А.³, Черняев А.П.^{1,2}, Родин И.А.^{4,5}

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

⁴ 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

⁵ 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 chibisova.ms20@physics.msu.ru

В данной работе изучено влияние низкоэнергетического электронного и рентгеновского излучений на всхожесть и фитосанитарное состояние семян пшеницы сорта «Новосибирская 29» с естественным заражением фитопатогенными и плесневыми грибами. Показано, что радиационная обработка влияет на рост и биологические показатели сельскохозяйственной продукции и требует дальнейшего исследования для применения в промышленных масштабах. Была найдена эффективная доза для электронного излучения – 20 Гр. При ней в лабораторных исследованиях всхожесть повышена на 63 %, заражение грибами уменьшено на 20 %, а в полевых – всхожесть и урожайность повышены на 11 % и 5 % соответственно. Заболеваемость культуры септориозом колоса при этом понижена на 56 %. Полученные в исследовании результаты согласуются с литературой, согласно которой малые дозы до 25 Гр способствуют увеличению скорости прорастания растений, сокращая вегетационный период и снижая риск распространения грибковых и бактериальных заболеваний из почвы. Различия в дозовом распределении для рентгеновского излучения и пучка ускоренных электронов могли послужить причиной отличия эффективных доз радиационной обработки.

Ключевые слова: *радиационная обработка, электронное излучение, рентгеновское излучение, доза облучения, лен, рапс, пшеница, биометрические показатели, фитосанитарное состояние*

В условиях развития продовольственной безопасности и экспортного потенциала России в рамках долгосрочной стратегии развития зернового комплекса РФ до 2035 года повышение объемов урожая и качества зерна пшеницы остается одной из приоритетных целей [1-3].

Цель исследования – нахождение эффективных доз радиационной обработки пшеницы, обеспечивающих стимуляцию роста культуры и ее защиту от заболеваний.

Объектом исследования была выбрана пшеница сорта «Новосибирская 29» с естественным заражением фитопатогенными грибами. Облучение проводилось на линейном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т001 с энергией 1 МэВ и рентгеновском аппарате 1BPV23-100 с рентгеновской трубкой RAD-100 и анодом из молибдена с энергией фотонов 80 кэВ.

Исследование проводилось как в лабораторных, так и в полевых условиях. В ходе лабораторного эксперимента семена пшеницы облучали рентгеновским и электронным излучением в дозах от 4 до 150 Гр и высаживали на питательную среду (КДА) в чашки Петри. Оценивались всхожесть семян на 7-е сутки и диаметры фитопатогенных грибов, ранее населявших семена и выросших вместе с ними на питательной среде.

В фазу полевого эксперимента семена облучали в дозах от 5 до 30 Гр. Образцы были выращены на опытном поле СФНЦА РАН в почвенно-климатических условиях лесостепной зоны Западной Сибири. Производилась оценка всхожести и урожайности

культуры, а также степени ее поражения заболеваниями.

В рамках исследования для понимания распределения дозы в семенах при их облучении было проведено моделирование прохождения ионизирующего излучения через водный фантом семени пшеницы с использованием программного обеспечения GEANT4, базирующегося на методе Монте-Карло. В процессе моделирования объем фантома был разделен на ячейки, для каждой из которых подсчитывалась полученная доза. Видимые отличия в дозовом распределении для рентгеновского излучения и пучка ускоренных электронов позволили сделать предположение, что эффективные дозы для двух видов излучения будут различны.

По результатам лабораторных исследований наиболее эффективной дозой для обработки ускоренными электронами была выявлена доза в 20 Гр, облучение в которой увеличило всхожесть семян на 63 %, снизив при этом количество фитопатогенных грибов на семенах на 20 %. Эффективность была подтверждена в ходе полевых исследований, облучение в указанной дозе повысило всхожесть и урожайность на 11 % и 5 %, соответственно, и на 56 % снизило заболеваемость септориозом колоса по сравнению с контрольными значениями (рис. 1).

В ходе лабораторных исследований эффективных доз для обработки рентгеновским излучением выявлено не было. В ходе полевых исследований облучение в дозе 15 Гр не изменило всхожесть культуры, однако повысило ее урожайность на 37 % и на 24 % снизило заболеваемость септориозом колоса по сравнению с контрольными значениями (рис. 2).

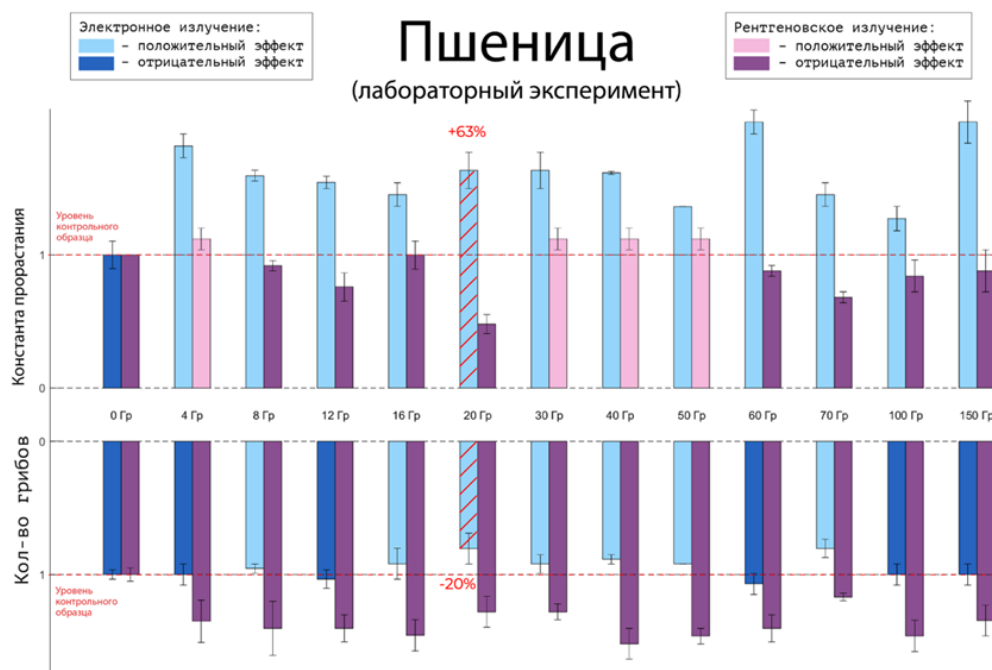


Рисунок 1. Зависимость относительных значений константы прорастания и количества грибов от дозы облучения ускоренными электронами (синие столбцы) и рентгеновскими фотонами (розовые столбцы) для семян пшеницы

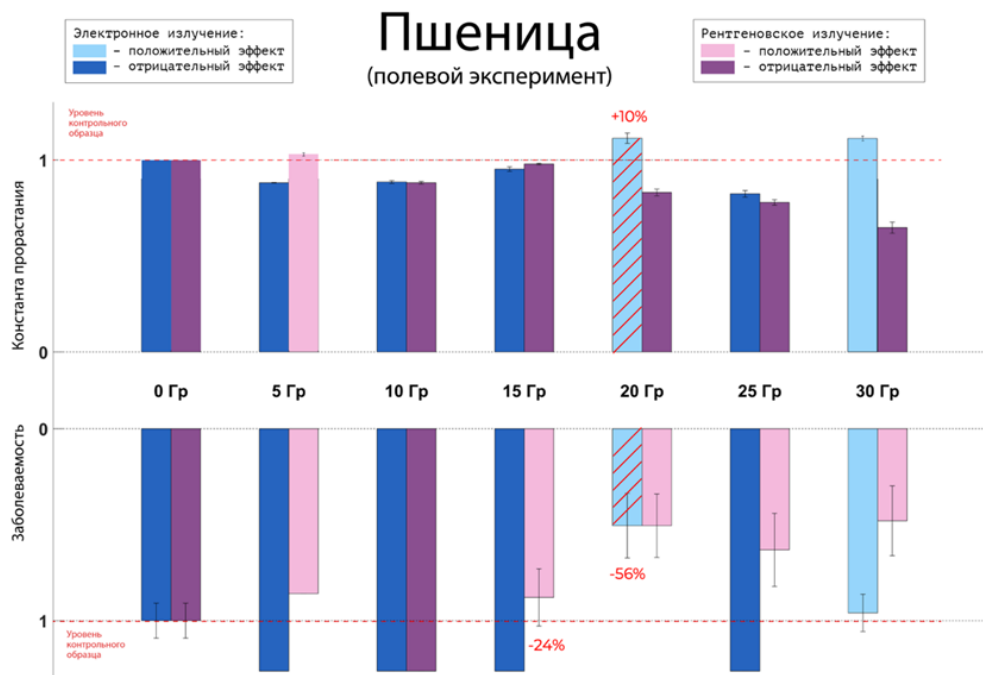
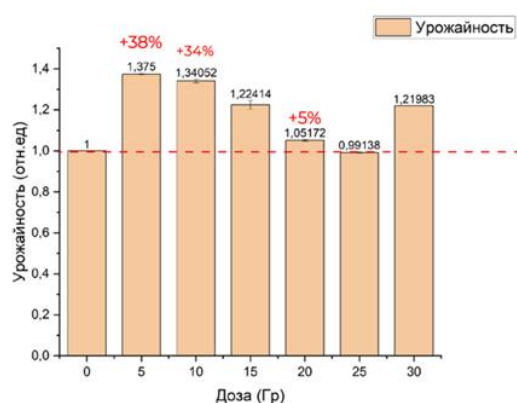


Рисунок 2. Зависимость относительных значений константы всхожести и заболеваемости от дозы облучения ускоренными электронами (синие столбцы) и рентгеновскими фотонами (розовые столбцы) для семян пшеницы

Помимо этого, следует отметить дозы 5 и 10 Гр, обработка в которых обоими типами излучения не привела к снижению заболеваемости культуры, но

повысила ее урожайность. При облучении электронным пучком урожайность была повышена на 34–38 %, при облучении рентгеном – на 48 % (рис. 3).

Ускоренные электроны



Рентгеновское излучение

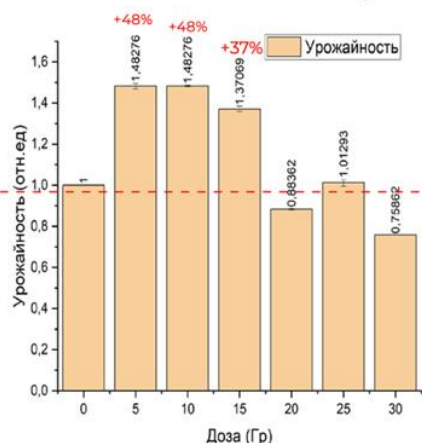


Рисунок 3. Зависимость урожайности от дозы для семян пшеницы

Полученные в исследовании результаты согласуются с литературой, согласно которой дозы от 5 до 20 Гр способствуют увеличению скорости прорастания растений, сокращая вегетационный период и снижая риск распространения грибковых и бактериальных заболеваний из почвы [1]. Различия в дозовом распределении для рентгеновского излучения и пучка ускоренных электронов могли послужить причиной отличия эффективных доз радиационной обработки.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Долгосрочная стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации до 2025 года и на перспективу до 2035 года.

2. Мониторинг безопасности пшеницы продовольственной по физико-химическим показателям в республике Татарстан за первое полугодие 2020 года / З.Д. Муртазина, А.А. Саматова, Э.Ф. Фасхутдинова [и др.] // Ветеринарный врач. 2020. С. 37-42.

3. 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 (Обнинск, 26-28 сентября 2018 года). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018, С. 112-113.

4. Усенко Н.И., Отмахова Ю.С., Брызгин А.А. Возможности и условия применения технологии ионизирующего облучения зерна пшеницы и муки // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы: сборник докладов (Обнинск, 26-28 сентября 2018 года). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. С. 234-237.

IMPACT OF IONIZING RADIATION ON GERMINATION, YIELD, AND DISEASE SUSCEPTIBILITY OF WHEAT IN LABORATORY AND FIELD STUDIES

Chibisova M.S.¹, Bliznyuk U.A.^{1,2,4}, Zubritskaya Y.V.^{1,2,4}, Chulikova N.S.³, Nikitchenko A.D.¹, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,4}, Malyuga A.A.³, Chernyaev A.P.^{1,2}, Rodin I.A.^{4,5}

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

⁴ Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Chemistry), Leninskie Gory 1, bld. 3, Moscow, Russian Federation, 119991

⁵ 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

This study investigates the effects of low-energy electron and X-ray radiation on the germination and phytosanitary condition of seeds of the "Novosibirskaya 29" wheat variety, naturally infected with phytopathogenic and mold fungi. It has been shown that radiation treatment affects the growth and biological characteristics of agricultural products and requires further research for industrial-scale application. The effective dose for electron radiation was found to be 20 Gy. Under this dose, germination increased by 63 % and fungal infection was reduced by 20 % in laboratory studies. In field studies, germination and yield increased by 11 % and 5 %, respectively. The incidence of septoria disease in wheat crops was reduced by 56%. The results obtained in this study are consistent with literature data, indicating that small doses (up to 25 Gy) promote faster plant germination, shorten the growing season, and reduce the risk of fungal and bacterial diseases from the soil. Differences in dose distribution between X-ray radiation and accelerated electron beams may explain the variations in effective radiation treatment doses.

Keywords: radiation treatment, electron radiation, X-ray radiation, radiation dose, flax, rapeseed, wheat, biometric indicators, phytosanitary condition

УДК 632.6; 632.935.45

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЦЕЛЯХ БОРЬБЫ С КАРАНТИННЫМИ ВРЕДИТЕЛЯМИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО КАРТОФЕЛЯ

Чиж Т.В.^{1,a}, Павлов А.Н.¹, Дорн Ю.А.¹, Снегирев А.С.¹, Зейрук В.Н.^{2,6}

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 научное учреждение «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», 140051, Московская область, г. Люберцы, д.п. Красково, ул. Лорха, д. 23В, Российская Федерация
e-mail: ^a taras.chizh@rambler.ru, ^b vzeyruk@mail.ru

В статье рассматриваются результаты исследований применения радиационных методов борьбы с картофельными нематодами и, в частности с золотистой нематодой, являющейся карантинным вредителем, наносящим серьезный вред картофелеводству России. Обсуждаются традиционные подходы, их ограничения и недостатки. Предлагается проведение исследований влияния ионизирующего излучения на жизнеспособность и распространение картофельных нематод и внедрения облучения как потенциально эффективной фитосанитарной и карантинной меры. Подчеркивается необходимость дальнейшего уточнения оптимальных диапазонов доз, а также оценки экономической целесообразности применения радиационных технологий, что может привести к их интеграции в современные системы защиты растений.

Ключевые слова: картофель, нематода, карантинный объект, фитосанитарная обработка, ионизирующее излучение

Картофель – одна из самых популярных сельскохозяйственных культур, используемая как в свежем виде, так и для переработки на картофелепродукты. Помимо известных и широко распространенных вредителей и болезней, для картофеля опасны также некоторые вредные организмы, которые отсутствуют или встречаются на территории Российской Федерации ограниченно, однако их появление способно приводить к серьезному ущербу, в связи с чем они получили карантинный статус и подлежат контролю со стороны надзорных органов.

По состоянию на 31 декабря 2023 года на территории Российской Федерации установлены карантинные фитосанитарные зоны по 56 объектам (22.5 % общего числа карантинных объектов Единого перечня ЕАЭС), из них: 27 видов насекомых; 9 видов сорных растений; 7 видов грибов; 6 видов бактерий и фитоплазм; 4 вируса и 1 вирион, 2 вида нематод – золотистая картофельная нематода (*Globodera rostochiensis*) и соевая нематода (*Heterodera glycines*).

Основным путем интродукции карантинных вредных организмов является импорт сельскохозяйственной продукции. Наиболее высокий фитосанитарный риск связан с импортированием посадочного материала. В 2023 году в результате выполнения Россельхознадзором контрольных (надзорных) функций при ввозе в страну различных видов подкарантинной продукции выявлены партии посадочного материала, зараженные различными видами вредителей, в т.ч. золотистой картофельной нематодой [1].

Картофельные нематоды, в частности золотистая нематода, представляют серьезную угрозу для сельского хозяйства, так как они поражают растения картофеля, замедляя их рост и снижая урожайность. Карантинные фитосанитарные зоны по данному карантинному объекту установлены в 50 субъектах Российской Федерации на территории 340 муниципальных районов на общей площади 509.3 тыс. га. В 2023 году по золотистой картофельной нематоды установлено 125 новых карантинных фитосанитарных зон. По данным карантинного фитосанитарного состояния

Калужской области за 2023 год золотистая картофельная нематода обнаружена в г. Калуга, в Мещовском районе, Перемышльском районе, Хвостовичском районе [2].

Традиционные практики борьбы с картофельными нематодами включают в себя использование здорового посадочного материала, транспортировку картофеля в сопровождении фитосанитарных и карантинных сертификатов, удостоверяющих соответствие подкарантинной продукции требованиям норм и правил обеспечения карантина растений, проведение систематических карантинных фитосанитарных обследований полей, используемых для посадки картофеля в целях своевременного выявления, локализации и ликвидации очагов распространения нематоды, чередование картофеля с такими сельскохозяйственными культурами как горох, бахчевые, клевер и многолетние травы, уничтожение сорняков, особенно из семейства пасленовых, очистку и дезинфекцию техники и инвентаря.

Еще одной стратегией устранения вредителя с зараженных территорий является выведение устойчивых сортов картофеля [3]. Несмотря на свои преимущества, она имеет свои ограничения, среди которых длительный срок получения сортов с нужными признаками, а также высокая стоимость проведения селекционной работы. Первое ограничение может стать критическим, поскольку установлено, что нематоды способны к быстрой адаптации и изменчивости [4].

Химические соединения, используемые для уничтожения нематод – нематотициды, имеющиеся на современном рынке средств защиты растений, способны оказывать негативное воздействие не только на паразитических нематод, но и на других представителей почвенной биоты, что делает их применение небезопасным с экологической точки зрения. К примеру, препараты на основе оксамилы проявляют инсектицидную, акарицидную и нематотицидную активность и оказывают пагубное действие не только на целевой объект обработки, но также влияют на индифферентные и даже полезные виды живых

организмов. Кроме того, нематоды весьма дорогостоящи. К примеру, препарат «Веранго» компании Bayer в 2024 г. обойдется в 47 тыс. руб. за 1 л при норме расхода рабочей жидкости при внесении в борозду в 150 л/га, при обработке борозды – в 300 л/га.

Рынок нематодов предлагает такие препараты как «Фитоверм» на основе аверсектина С, «Видат 5Г» и «Палица» на основе оксамилы, «Веранго» на основе флуопирама. Отдельного внимания заслуживает препарат Нематофагин-Микопро, представляющий собой штамм гриба *Arthrobotrys oligospora* F-1303. В отличие от вышеперечисленных препаратов, относящихся к пестицидам, он является биологическим нематодом узкого спектра действия, направленного именно на стеблевую и северную галловую нематоды [5].

Результаты исследований действия ионизирующего излучения на сельскохозяйственную продукцию и посевной материал с целью подавления патогенной микрофлоры и различных вредителей показали его высокую эффективность [6, 7]. Применение радиационных технологий также может представлять собой перспективное направление в области карантинного контроля фитопаразитов таких как нематода.

Анализ результатов исследований влияния ионизирующего излучения позволил выделить ряд общих закономерностей для различных видов картофельных нематод, которые, однако, требуют уточнения и проведения дальнейшей теоретической и практической работы.

Установлено, что интенсивность подавления жизнеспособности зависит от величины дозы ионизирующего излучения. Разные виды нематод реагируют на излучение по-разному, но в целом с увеличением дозы наблюдается более выраженное подавление. Облучение нарушает жизненный цикл нематод, снижая репродуктивную способность, тем самым предотвращая их распространение. Дозы в диапазоне от 500 Гр до 1 кГр снижают репродуктивную способность, приводя к уменьшению плотности цист и самок, но не приводят к полной гибели нематод. Более высокие дозы (4,0-8,0 кГр) полностью подавляют вылупление личинок и образование цист [8]. Личинки и яйца нематод, особенно на активных стадиях, таких как J2, наиболее чувствительны к облучению [9]. Облучение родительских особей нематод оказывает негативное влияние на развитие потомства. У золотистой картофельной нематоды после облучения заметно ухудшается репродуктивная способность, что приводит к снижению численности потомства F1. Радиочувствительность нематод увеличивается с ростом влажности почвы [10]. Облучение в диапазоне доз от 100 до 250 Гр может оказывать стимулирующее действие на растения и повышать их устойчивость к нематодам, что представляет интерес в контексте защиты растений и повышения их устойчивости к паразитам [11].

Приведенные закономерности указывают на перспективность применения радиационных методов в целях борьбы с картофельными нематодами, в т.ч. с золотистой нематодой, имеющей статус карантинного вредителя.

Конкретные меры и протоколы использования облучения во многом будут определяться особенностями уже существующих агрономических практик. Необходима тщательная оценка диапазонов эффективных доз для достижения разумного баланса между эффектом подавления нематод и возможным негативным воздействием ионизирующего излучения на обрабатываемую сельскохозяйственную продукцию, упаковку, транспортировочную тару, зараженную нематодами почву.

Важно также учесть экономическую эффективность применения радиационных методов. Оценка затрат на облучение, сопоставление облучения с химическими способами борьбы, оценка затрат комплексного использования методов позволит принять обоснованные решения. Необходимо провести анализ рентабельности, чтобы понять, оправдывают ли инвестиции потенциальные выгоды, связанные со стабилизацией урожайности и снижением потерь, вызванных не только прямым действием карантинных вредителей – в данном случае нематод, но и экономических и прочих потерь, ассоциированных с процедурами выявления вредителей, установления и снятия карантинных зон и других организационных мер. Кроме того, стоит рассмотреть влияние на рынок и потребительские предпочтения, так как использование радиационных методов может вызвать интерес со стороны экологически ориентированных потребителей. В дальнейшем, как ожидается, результаты исследований позволят разработать рекомендации для агропромышленного комплекса по интеграции радиационных технологий в системы защиты растений.

Список литературы

1. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Федеральная служба по ветеринарному и фитосанитарному надзору. Национальный доклад о карантинном фитосанитарном состоянии территории Российской Федерации в 2023 году. URL: <https://eec.eaeunion.org/> (дата обращения: 09.09.2024).
2. Карантинное фитосанитарное состояние Калужской области. URL: https://rshn32.ru/files/2023/03/kar_fit0_Klg_03.2023.pdf (дата обращения: 12.09.2024).
3. Whitehead A.G., Turner S.J. Management and regulatory control strategies for potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*) // Potato Cyst Nematodes, Biology, Distribution and Control. CABI Publishing: Wallingford, UK, 1998. PP. 135-152.
4. Niere B., Krüssel S., Osmer K. Auftreten einer außergewöhnlich virulenten Population der

Kartoffelzystennematoden // J. Kulturpflanz. 2014. V. 66. PP. 426-427.

5. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов», разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Часть I. Пестициды (по состоянию на 10 октября 2024 г.). URL: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/departament-rasteniievodstva-mekhanizatsii-khimizatsii-izashchity-rastenyi/industry-information/info-gosudarstvennaya-usluga-po-gosudarstvennoy-registratsii-pestitsidov-i-agrokhimikatov/> (дата обращения: 12.10.2024).

6. The effect of gamma irradiation on insect pests of grain stocks / Yu.A. Dorn, N.N. Loy, A.N. Pavlov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" DOI: 10.1007/978-3-031-21219-2_46.

7. Resistance of different species of insect pests of grain to the influence of gamma-radiation / N.N. Loy, N.I. Sanzharova, S.N. Gulina [et al.] // 7th International

Scientific Conference on Food Science: Chemistry, Rheology, Technology (CFSCRT2021) / AIP Conference Proceedings 2478. 2022. P. 050018. DOI: 10.1063/5.0099264.

8. An evaluation of irradiation treatment to disinfect soil tare from *Globodera spp.* / B. Berger, L. Schumann, M. Daub, S. König // Agronomy. 2022. V. 12. P. 464.

9. Chinnasri B. Effect of gamma-irradiation and heat on root-knot nematode, *Meloidogyne javanica* // Journal of Nematology. 1997. V. 29. PP. 30-34.

9. The effect of varying gamma irradiation doses and soil moisture content on nematodes, the microbial communities and mineral nitrogen / M.T. Gebremikael, J.D. Waele, D. Buchan [et al.] // Applied Soil Ecology. 2015. V. 92. PP. 1-13.

10. Taha E.H., Shoaib R.M. Impact of gamma irradiation on tomato, and pepper growth parameters, phytochemical, nematode infectivity and detection of DNA damage by comet assay // Journal of Plant Protection and Pathology. 2021. V. 12. PP. 599-608.

PROSPECTS FOR THE USE OF IONIZING RADIATION FOR THE CONTROL OF QUARANTINE PESTS OF FOOD POTATOES

Chizh T.V.¹, Pavlov A.N.¹, Dorn Yu.A.¹, Snegirev A.S.¹, Zeyruk V.N.²

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

²Russian Potato Research Centre, Lorkh st. 23V, Lyubertsy, d.p. Kraskovo, Moscow Region, Russian Federation, 140051

The article discusses the results of research on the use of ionizing radiation to control potato nematodes, particularly the golden nematode, which is a quarantine pest causing significant damage to potato cultivation in Russia. Traditional approaches, their limitations, and shortcomings are reviewed. The article proposes conducting studies on the effects of ionizing radiation on the viability and spread of potato nematodes and suggests irradiation as a potentially effective phytosanitary and quarantine measure. It emphasizes the need for further refinement of optimal dose ranges and assessment of the economic feasibility of using radiation technologies, which could lead to their integration into modern plant protection systems.

Keywords: *potato, nematode, quarantine pests, phytosanitary treatment, ionizing radiation*

ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА АКТИВНОСТЬ ФИТОПАТОГЕННЫХ ГРИБОВ

Шимко П.А.^{1,а}, Близнюк У.А.^{1,2,б}, Борщеговская П.Ю.^{1,2}, Зубрицкая Я.В.^{1,2,в}, Малюга А.А.³, Родин И.А.^{1,4}, Черняев А.П.^{1,2}, Чуликова Н.С.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

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: ^а pashashimko0306@gmail.com, ^б uabliznyuk@gmail.com, ^в zubritckaia.iv18@physics.msu.ru

Исследование влияния обработки низкоэнергетическими электронами на активность фитопатогенных грибов *Rhizoctonia solani*, *Septoria nodorum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Fusarium spp.* и *Alternaria spp.* показало различия в эффекте радиационной обработки в зависимости от штамма, рода и вида грибов. Самым устойчивым к воздействию ускоренными электронами оказался штамм ТАН-1 рода *Alternaria* и штаммы К-7.2 и К-37 рода *Fusarium*, ингибирования роста которых не наблюдалось даже при облучении в дозах 10000 Гр. Наиболее радиочувствительным показал себя штамм ШК-25 гриба *Rhizoctonia Solani*, ингибирование роста колоний которого наблюдалось при облучении в дозе 1000 Гр. Исходя из дозовых зависимостей диаметральные скорости роста грибов, можно сказать, что обработка ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ снизила скорость роста для 7 из 11 исследуемых штаммов.

Ключевые слова: радиационная обработка, сельское хозяйство, защита растений, фитопатогенные грибы, ускоренные электроны

В сфере сельского хозяйства важной частью процесса растениеводства является обеспечение защиты культуры от заболеваний. Серьезной угрозой как для растений, так и для находящегося на хранении урожая являются фитопатогенные грибы, множество видов которых составляет до 80 % от всего числа возбудителей болезней растений [1]. Более экологичной альтернативой химических методов защиты является радиационная обработка, применение которой способно подавлять рост фитопатогенных грибов и других патогенных организмов [2].

Целью работы являлось исследование влияния обработки низкоэнергетическими ускоренными электронами на чистые культуры фитопатогенных грибов.

Объектами исследования послужили различные штаммы фитопатогенных грибов *Rhizoctonia solani* (ШП-28, ШК-25), *Fusarium spp.* (К-91, К-7.2, К-37, Г-4), *Bipolaris sorokiniana* (Т-2, Т-1), *Alternaria spp.* (ТАН-1, Е-

1) и *Septoria nodorum* (S-1), предоставленные СФНЦА РАН.

Обработка чашек Петри с выращенными на питательной среде (КДА) культурами грибов проводилось на линейном ускорителе электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 с энергией 1 МэВ и средней мощностью пучка 25 кВт. Дозы облучения составили: 100, 1000, 5000 и 10000 Гр. После облучения производилась высечка образцов мицелиарного мата и их посев на питательную среду в чашках Петри для контроля динамики роста. Замер диаметров колоний фитопатогенов производился на 3, 5 и 7 сутки с момента посева.

Анализ динамики роста колоний грибов показал, что зависимость их диаметра от времени роста после посева имеет линейный вид. Посредством аппроксимации были получены диаметральные скорости роста колоний (табл. 1).

Значения коэффициентов диаметральных скоростей роста колоний фитопатогенных грибов при их облучении ускоренными электронами с энергией 1 МэВ

Штамм гриба	Доза				
	Контроль	100 Гр	1000 Гр	5000 Гр	10000 Гр
<i>Fusarium spp</i> (Г-4)	11.67 ± 0.04	10.64 ± 0.53	16.06 ± 1.24	0	0
<i>Fusarium spp.</i> (К-91)	13.2 ± 0.18	13.11 ± 0.16	10.88 ± 0.60	0	0
<i>Fusarium spp</i> (К-7.2)	10.58 ± 0.18	7.58 ± 0.31	8.78 ± 0.10	8.03 ± 0.50	11.61 ± 0.32
<i>Fusarium spp</i> (К-37)	14.73 ± 0.18	14.63 ± 1.10	14.52 ± 1.02	13.90 ± 0.63	14.62 ± 1.10
<i>Alternaria spp.</i> (Е-1)	9.56 ± 0.36	9.56 ± 0.57	8.86 ± 0.30	8.13 ± 0.01	10.00 ± 0.60
<i>Alternaria spp.</i> (ТАН-1)	9.17 ± 0.14	8.52 ± 0.07	8.66 ± 0.00	0	0
<i>B. sorokiniana</i> (Т-1)	14.11 ± 0.73	13.63 ± 0.58	10.18 ± 0.20	0	0
<i>B. sorokiniana</i> (Т-2)	13.59 ± 0.46	13.33 ± 0.72	11.50 ± 0.60	0	0
<i>R. solani</i> (ШК-25)	5.22 ± 0.07	5.20 ± 0.05	0	0	0
<i>R. solani</i> (ШП-28)	5.72 ± 0.08	5.86 ± 0.11	3.54 ± 0.50	0	0

Полученные данные свидетельствуют о различной степени радиочувствительности штаммов фитопатогенных грибов. Обработка ионизирующим излучением уменьшала скорость роста у 7 из 11 исследуемых штаммов, вплоть до полного подавления роста колоний при их облучении в дозах свыше 1000 Гр. Наиболее чувствительным к облучению оказался штамм ШК-25 гриба *Rhizoctonia solani*, ингибирование роста которого наблюдалось при обработке в дозе 1000 Гр. Самыми радиоустойчивыми были штамм ТАН-1 рода *Alternaria* и штаммы К-7.2 и К-37 рода *Fusarium*, рост которых не удалось подавить даже при облучении в дозе 10000 Гр.

Таким образом, в результате проведенного исследования было получено, что радиационная обработка ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ позволяет не только снизить скорость роста колоний, но и полностью ингибировать развитие ряда фитопатогенных грибов. При этом

значения необходимых для ингибирования доз излучения были различны, что говорит об отличии в радиочувствительности грибов в зависимости от морфологических особенностей их видов и штаммов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

Список литературы

1. Сокирко В.П., Горьковенко В.С., Зазимко М.И. Фитопатогенные грибы (морфология и систематика). Краснодар: КубГАУ, 2014. 177 с.

2. Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая / Н.С. Чуликова, А.А. Малюга, У.А. Близнюк [и др.] // Агрохимия. 2023. № 2. С. 69-78.

EFFECT OF ACCELERATED ELECTRONS ON THE ACTIVITY OF PHYTOPATHOGENIC FUNGI

Shimko P.A.¹, Bliznyuk U.A.^{1,2}, Borshchegovskaya P.Yu.^{1,2}, Zubritskaya Ya.V.^{1,2}, Malyuga A.A.³, Rodin I.A.^{1,4}, Chernyaev A.P.^{1,2}, Chulikova N.S.³, 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'tsyn 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

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

The study of the effect of low-energy electrons treatment on the activity of phytopathogenic fungi *Rhizoctonia solani*, *Septoria nodorum*, *Bipolaris sorokiniana*, *Fusarium spp.* and *Alternaria spp.* demonstrated differences in the effect of radiation treatment depending on the fungi strain, genus and species. The strain ТАН-1 of *Alternaria spp.* and strains К-

7.2 and K-37 of *Fusarium spp.* were the most resistant to radiation treatment with accelerated electrons; no growth inhibition was observed even at irradiation at doses of 10000 Gy. The most radiosensitive was strain ШK-25 of the fungus *Rhizoctonia solani*, inhibition of colony growth of which was observed at an irradiation at a dose of 1000 Gy. Based on the dose dependences of diametral growth rates of fungi, it can be stated that treatment with accelerated electrons with a maximum energy of 1 MeV decreased the growth rate for 7 out of 11 strains studied.

Keywords: radiation treatment, agriculture, plant protection, phytopathogenic fungi, accelerated electrons

Plant disease protection is an important part of the crop farming process. A more environmentally friendly alternative to chemical methods of protection is radiation treatment, the application of which can inhibit the growth of phytopathogenic fungi and other pathogens.

The aim of the study was to investigate the effect of treatment with low-energy accelerated electrons on pure cultures of phytopathogenic fungi.

Various strains of phytopathogenic fungi *Rhizoctonia solani* (ШП-28, ШK-25), *Fusarium spp.* (K-91, K-7.2, K-37, Г-4), *Bipolaris sorokiniana* (T-2, T-1), *Alternaria spp.* (TAH-1, E-1) and *Septoria nodorum* (S-1) provided by SFSCA RAS were used as research objects. Petri dishes with fungal cultures grown on nutrient medium were irradiated with 1 MeV accelerated electrons generated by a continuous electron accelerator UELR-1-25-T-001 with a maximum energy of 1 MeV and an average beam power of 25 kW. Then, the micellar mat samples were cut and sown on nutrient medium in Petri dishes to control the growth dynamics. The diameters

of phytopathogen colonies were measured at 3, 5 and 7 days after sowing.

Ionizing radiation treatment reduced the growth rate of 7 out of 11 strains under study, up to complete suppression of colony growth at doses above 1000 Gy. The most sensitive to irradiation was strain ШK-25 of fungus *Rhizoctonia solani*, growth inhibition of which was observed at irradiation dose of 1000 Gy. The most resistant were strain TAH-1 of *Alternaria* genus and strains K-7.2 and K-37 of *Fusarium* genus, the growth of which could not be inhibited even under irradiation at a dose of 10000 Gy. The obtained data indicate different degree of radiosensitivity of phytopathogenic fungi strains.

This work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. №22-63-00075) for Lomonosov Moscow State University.

Секция

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ
РАДИОЭКОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ**

**FUNDAMENTAL AND APPLIED ASPECTS OF RADIOECOLOGY
AND AGROECOLOGY**



ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ АГРОМЕЛИОРАНТОВ НА ДИНАМИКУ ПАРАМЕТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА У ОВСА ПОСЕВНОГО, ВЫРАЩЕННОГО НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ СВИНЦОМ ПОЧВЕ

Блинова Я.А.^а, Подлущий М.С., Арышева С.П., Свириденко Д.Г., Иванкин Н.Г., Петров К.В., 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: ^аyana.manuhina@yandex.ru

В данной работе приведены результаты исследования динамики основных параметров флуоресценции хлорофилла, отражающих состояние фотосистемы II – Phi2, NPQ_t, SPAD, в листьях овса посевного, выращенного на черноземе с внесенным удобрением ФосАгро NPK и при загрязнении свинцом, с обработкой растений органоминеральным комплексом Гумитон. Показано, что комплексное применение агромелиорантов приводит к повышению фотохимической активности растений и понижению потерь энергии, рассеиваемой в виде тепла.

Ключевые слова: овес, эффективный квантовый выход, тушение флуоресценции, концентрация хлорофилла, Гумитон, ФосАгро NPK, свинец

Повышенное содержание свинца в почве ведет к накоплению его в тканях растений. Актуальной темой остается разработка агротехнических приемов по уменьшению поступления тяжелых металлов из почвы в растения. При их создании важно оценивать изменения в физиологических процессах растений, выращенных на загрязненной почве с применением агромелиорантов. Исследования параметров флуоресценции хлорофилла в листьях позволяет получить информацию о функциональном состоянии фотосинтетического аппарата и эффективности первичных процессов фотосинтеза. Изменяющиеся факторы окружающей среды способны оказывать выраженное влияние на параметры кинетики и спектральные особенности флуоресценции хлорофилла [1]. Таким образом, исследование динамики изменения параметров флуоресценции хлорофилла могут дать важную информацию, касающуюся характера воздействия стрессового фактора на параметры фотосинтеза.

Целью работы являлась оценка влияния комплексного удобрения ФосАгро NPK и органоминерального комплекса Гумитон на основные параметры флуоресценции хлорофилла у растений овса посевного, выращенных на загрязненной свинцом почве.

В качестве объекта исследования был выбран овес посевной (*Avena sativa* L.) сорт Яков. Овес является однолетним злаком и широко используется в сельском хозяйстве как зернофуражная культура, благодаря его неприхотливости и высоким биохимическим показателям. Овсяная солома служит кормом для скота. Овес сорт Яков среднеспелый, вегетационный период 82-95 дней, устойчив к засухе и полеганию, отличается высокой продуктивностью.

Органоминеральный комплекс Гумитон – препарат на основе биологически активных компонентов торфа с добавлением макро- (N, P, K, Ca, Mg) и микроэлементов (B, Mo, Mn). Наличие в его составе биологически активных веществ (гуматов калия) способствует активизации физиолого-биохимических процессов в растениях: усиливается эффективность корневого питания, укрепляется иммунитет растений, повышается урожайность и его качество [2]. Комплексное удобрение ФосАгро NPK (8:20:30) является высокоэффективным для культур, требующих высокого содержания в почве доступного P и K, а также на почвах с низким содержанием подвижного K, легких по гранулометрическому составу и с промывным водным режимом [3].

Растения овса выращивали на черноземе обыкновенном среднесуглинистом в сосуде на 5.5 кг почвы по 15 растений в трехкратной повторности в условиях бокса теплицы. Агрохимические показатели почвы: рН_{KCl} 6.34; Нг – 3.96 смоль(экв)/1 кг почвы; содержание гумуса – 6.40 %; Ca и Mg – 26.40 и 5.29 ммоль(экв)/100 г почвы; P₂O₅ и K₂O – 290 и 171 мг/кг почвы, соответственно. Загрязнение Pb имитировали внесением в почву перед посевом в виде раствора соли Pb(CH₃COO)₂·3H₂O в концентрации 400 мг/кг почвы. Комплексное удобрение ФосАгро NPK вносили в почву также перед посевом в дозе 750 мг/кг (соответствует по действующему веществу N₆₀P₁₅₀K₂₃₀). Обработку Гумитоном (1 л/га) вегетирующих растений проводили в фазу выхода в трубку овса рабочим раствором из расчета 1 л препарата на 300 л воды на 1 га. Схема эксперимента показана на рисунке 1.

В ходе работы оценивали динамику параметров флуоресценции хлорофилла в листьях. Первое измерение проводили через неделю после обработки растений Гумитоном и далее раз в неделю в течение 7 недель на подфлаговом листе с 3-х случайных растений каждого сосуда. Параметры флуоресценции хлорофилла измеряли при помощи MultispeQ V 2.0 (PhotosynQ, East Lansing, MI, USA). В работе учитывались следующие параметры: Φ_2 – эффективный квантовый выход фотосистемы II (ФСII), NPQ_t – нефотохимическое тушение флуоресценции, SPAD – относительное содержание хлорофилла. Обработка

полученных данных флуоресценции хлорофилла проводилась с использованием критерия Манна-Уитни для оценки статистической значимости различий между двумя независимыми группами (группа воздействия по отношению к контролю). Для статистического анализа использовалась среда программирования Python версии 3.10.12 и библиотека SciPy версии 1.14.1. Визуализация полученных результатов также была выполнена с помощью Python и библиотек pandas версии 2.2.2, matplotlib версии 3.9.2 и numpy версии 2.1.1.

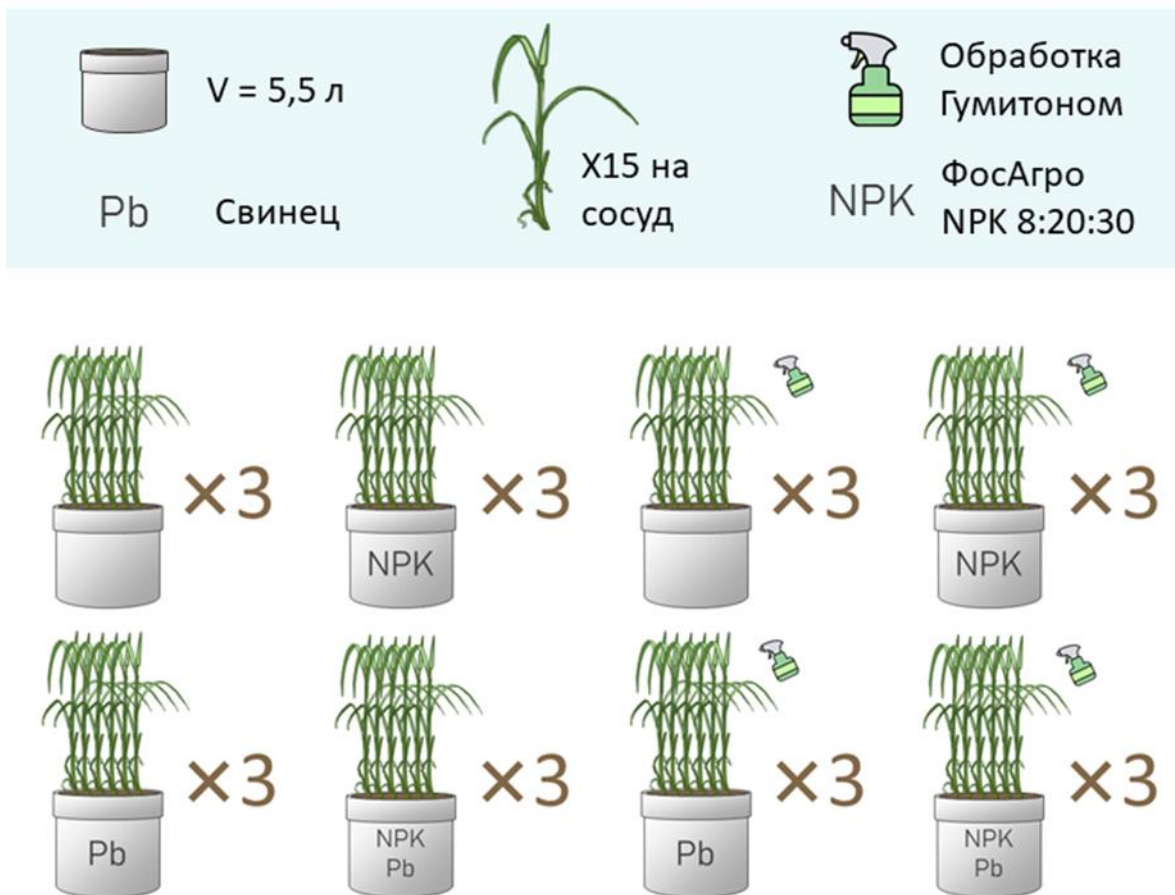


Рисунок 1. Схема эксперимента

Эффективный квантовый выход ФСII (рис. 2а) характеризует долю поглощенной энергии возбуждения, используемой для фотохимических реакций. Через 2 недели после обработки Гумитоном максимальное значение Φ_2 0.64 (64 %) отмечено у растений в варианте ФосАгро NPK+Гумитон (статистически значимое отличие от контроля, $p = 0.004$), минимальная фотохимическая активность – в варианте Pb+ФосАгро NPK+Гумитон. Через 3 недели статистически значимое снижение Φ_2 наблюдается практически во всех вариантах опыта, кроме растений, обработанных Гумитоном. К концу вегетационного периода самая высокая фотохимическая активность ФСII наблюдалась у растений, растущих на почве с внесением свинца, $\Phi_2 = 0.55$ ($p = 0.03$).

В процессе фотосинтеза световая энергия поглощается светособирающими комплексами и используется в фотохимических реакциях. Однако часть поглощенного света теряется в результате нефотохимического тушения (NPQ), которое рассеивает «избыточную» световую энергию, поглощенную светособирающими комплексами, безвредно в виде тепла, предотвращая накопление реактивных промежуточных продуктов [4]. Параметр NPQ_t (рис. 2в) можно использовать без адаптации растений к темноте, а также применять в полевых условиях [4]. В 1-ю неделю измерений NPQ был статистически значимо ниже при применении удобрения ФосАгро NPK ($p = 0.01$) и составлял 0.58, а к концу эксперимента был максимальным (2.05). В варианте ФосАгро

NPQ+Гумитон наблюдалось статистически значимое снижение NPQt спустя 2 ($p = 0.01$), 4 ($p = 0.02$), 5 недель ($p = 0.005$) после обработки Гумитоном. На 4-й неделе измерений отмечено статистически значимое понижение NPQt у растений, растущих на почве с внесением Pb ($p = 0.001$).

Концентрация хлорофилла в листьях является важным параметром, который часто измеряется как индикатор развития хлоропластов, фотосинтетической способности, содержания азота в листьях или

общего состояния растений. Значение показателя SPAD (рис. 2б) используют для относительного определения количества хлорофилла в образце [5]. Пониженный уровень SPAD отмечен на 2-й неделе после обработки растений, растущих на почве с добавлением ФосАгро и Pb ($p = 0.01$) относительно контрольных условий. На 4-й неделе измерений во всех вариантах отмечено статистически значимое повышение показателя относительного содержания хлорофилла в листьях.

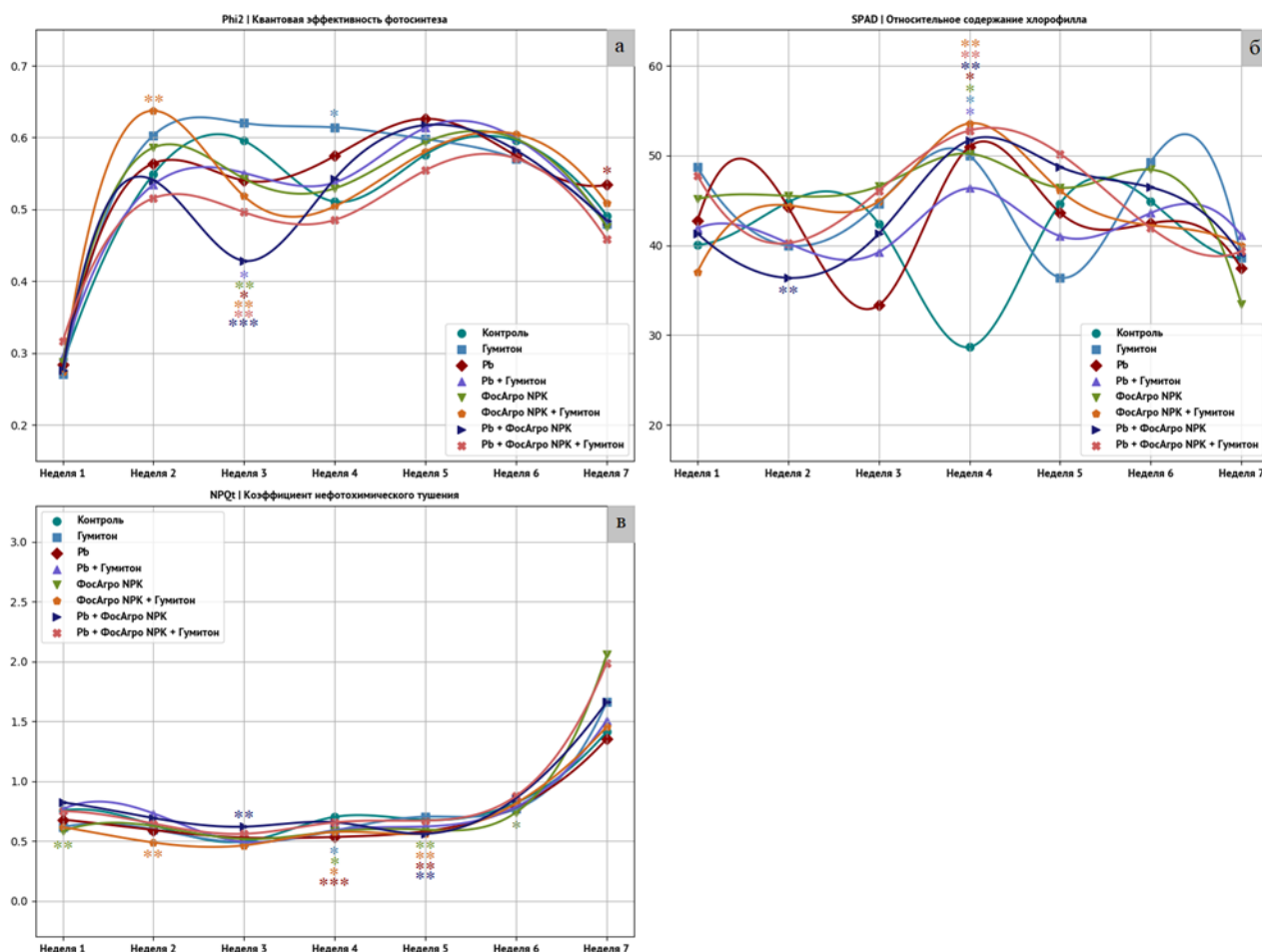


Рисунок 2. Динамика изменения параметров флуоресценции хлорофилла, **а** – эффективный квантовый выход ФСII, **б** – относительное содержание хлорофилла, **в** – коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла.

* – $p \leq 0.05$, ** – $p \leq 0.01$, *** – $p \leq 0.001$ (U-критерий Манна-Уитни).

Цвет звездочки соответствует цвету условия

Таким образом, к концу 1-й недели наблюдений выделился вариант ФосАгро NPK, у которого зафиксирован статистически значимо более низкий коэффициент NPQt, который косвенно отражает эффективность поглощения энергии светособирающими комплексами ФСII. Обработка растений органоминеральным комплексом Гумитон усилила благоприятное воздействие ФосАгро NPK на фотосинтез растений, что проявилось в статистически значимом увеличении квантовой эффективности фотосинтеза и значимом снижении коэффициента NPQt в варианте

ФосАгро+Гумитон через 2 недели после обработки Гумитоном. Значительно более низкие значения коэффициента NPQt сохранились у растений в варианте ФосАгро+Гумитон вплоть до 5-й недели наблюдений, что свидетельствует о лучшей эффективности поглощения энергии по сравнению с контролем. На 3-й неделе измерений, эффективность фотосинтеза была статистически значимо ниже во всех вариантах, кроме варианта с Гумитоном, где этот параметр был слегка выше контроля, достигнув статистически значимо более высоких значений недель позже.

Загрязнение почвы Pb отрицательно сказалось на относительном содержании хлорофилла в варианте Pb+ФосАгро NPK на 2-й неделе измерений, что на неделю позже проявилось в статистически значимом увеличении коэффициента NPQ_t у этих растений и, в совокупности, может свидетельствовать о повреждении светособирающих комплексов. К концу измерений (7-я неделя) у всех растений отмечено увеличение показателя NPQ_t, уменьшение Phi2 и снижение SPAD, что, вероятно, связано с процессами старения и увядания.

Применение агромелиорантов приводит к повышению фотохимической активности растений. Более детальный анализ в совокупности с морфометрическими показателями развития растений поможет разработать рекомендации о применении органоминерального комплекса Гумитон и других агромелиорантов при загрязнении почв тяжелыми металлами.

Список литературы

1. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода / В.С. Лысенко, Т.В. Вардуни,

В.Г. Соьер, В.П. Краснов // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4 (часть 1). С. 112-120.

2. 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. V. 8. I. 4. PP. 3374-3381.

3. Advantages and applications of NPK(S) 8:20:30(2) + 0,3 B. // Internet resource: <https://www.phosagro.ru/production/fertilizer/azotno-fosforno-kalijnye-udobreniya/169553/> (date of access: 02/03/2023).

4. NPQ(T): a chlorophyll fluorescence parameter for rapid estimation and imaging of non-photochemical quenching of excitons in photosystem-II-associated antenna complexes / S. Tietz, C.C. Hall, J.A. Cruz, D.M. Kramer // *Plant, Cell and Environment*. 2017. № 40. PP. 1243-1255.

5. Ling Q., Huang W., Jarvis P. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana* // *Photosynthesis Research*. 2011. № 107. PP. 209-214.

THE EFFECT OF TREATMENT WITH AGROMELIORANTS ON THE DYNAMICS OF CHLOROPHYLL FLUORESCENCE PARAMETERS IN OATS CULTIVATED ON LEAD-CONTAMINATED SOIL

Blinova Ya.A., Podlutskii M.S., Arysheva S.P., Sviridenko D.G., Ivankin N.G., Petrov K.V., 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

In this study, the dynamics of key chlorophyll fluorescence parameters – Phi2, NPQ_t, and SPAD – were analyzed in oat leaves cultivated on lead-contaminated soil, with treatments of organomineral complexes, PhosAgro and Gumiton. The results demonstrate that the combined application of these fertilizers enhances the photochemical activity of the plants while reducing energy dissipation as heat.

Keywords: *oats, effective quantum yield of PSII, non-photochemical quenching, chlorophyll concentration, Gumiton, PhosAgro NPK, lead*

УДК 614.876; 633.16

ДИНАМИКА КОМПОНЕНТОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ ЗАЩИТЫ И ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ ПИГМЕНТОВ В ЛИСТЯХ ЯЧМЕНЯ В ОТВЕТ НА ОДНОКРАТНОЕ γ -ОБЛУЧЕНИЕ

Гусева О.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

В ходе вегетационного эксперимента изучалось влияние острого γ -облучения на динамику соединений антиоксидантной системы и фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя ярового. Было выявлено, что облучение дозой 10 Гр способствует снижению малонового диальдегида, аскорбиновой кислоты и глутатиона, хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, показателя максимального фотохимического квантового выхода ФСII (F_v/F_m) на 24-е сутки после облучения. При этом содержание таких компонентов антиоксидантной защиты, как флавоноиды и пролин, наоборот, повышалось на 24-е сутки. На 7-е и 14-е сутки после облучения в основном наблюдалось повышение исследуемых показателей, за исключением содержания аскорбиновой кислоты, показателей F_v/F_m , нефотохимического тушения (NPQ) и скорости переноса электронов (ETR), значения которых сразу имели тенденцию к снижению. Можно сделать вывод, что растения ячменя ярового испытывали последствия окислительного стресса, сопровождающегося накоплением активных форм кислорода, источником появления которого может служить острое γ -облучение.

Ключевые слова: γ -облучение, флавоноиды, МДА, пролин, аскорбиновая кислота, глутатитон, общая редуцирующая активность, хлорофиллы, каротиноиды, флуоресценция хлорофилла

Из-за неподвижного образа жизни растения всегда находятся под влиянием большинства неблагоприятных воздействий окружающей среды. Поэтому они выработали набор морфоанатомических, физиологических и биохимических приспособлений для адаптации к широкому спектру условий окружающей среды [1]. Первичные физико-химические реакции включают образование различных форм активных форм кислорода (АФК), которые являются причиной наблюдаемых изменений их функциональной активности. Помимо компонентов первичного метаболизма, в облученных растениях значительно увеличивается содержание различных вторичных метаболитов, которые представлены фенольными соединениями, терпеноидами и азотсодержащими соединениями [2-4]. Для преодоления повреждений, вызванных АФК, растения используют и неферментативную систему защиты, в которую входят компоненты аскорбат-глутатионового цикла, обеспечивающий эффективное восстановление низкомолекулярных антиоксидантов – аскорбата и глутатиона, а также процесс перекисного окисления липидов с образованием малонового диальдегида (МДА) и накопление аминокислоты пролина. Одним из потенциальных мишеней под воздействием γ -излучения является и фотосинтетический аппарат растений. В настоящее время также широко используется измерение флуоресценции хлорофилла для быстрой и неинвазивной оценки фотосинтетической активности в листовых пластинах растений. Максимальный квантовый выход фотохимии фотосистемы II (ФСII) (F_v/F_m) используется для обнаружения вызванных стрессом колебаний в фотосинтетическом аппарате, поскольку снижение F_v/F_m может быть связано с развитием медленно релаксирующих процессов тушения и фотоповреждением реакционных центров ФСII [5]. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка компонентов антиоксидантной защиты и пигментов фотосинтетического аппарата в листьях ячменя ярового при воздействии γ -излучения на разные сутки после облучения.

Материалы и методы

В ходе вегетационного эксперимента изучали влияние острого γ -облучения на ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) сорта «Владимир». Растения выращивали под навесом в сосудах с дерново-подзолистой супесчаной почвой, от 20 до 25 растений на сосуд, в трехкратной повторности. По достижении стадии полноразвернутого 3-4 листа, растения подвергали острому γ -облучению в дозе 10 Гр при мощности 15 Гр/час, которое проводили с помощью установки ГУР-120 с источником γ -квантов ^{60}Co , расположенной на территории НИЦ «Курчатowski институт» – ВНИИРАЭ (Калужская обл., г. Обнинск). Отбор листовых пластин с главного стебля ячменя для определения биохимических параметров проводили перед облучением на 7-е сутки, 14-е сутки и 24-е сутки после γ -облучения. С помощью спектрофотометра UNICO-1201 (производитель ООО «ЮНИКО-СИС», РФ, Санкт-Петербург) спектрофотометрическим методом определялось количественное содержание в листьях ячменя: хлорофиллов *a*, хлорофиллов *b* и каротиноидов с выделением в этаноле 96 % по методике [6], флавоноидов с добавлением AlCl_3 по методике Tevini M. et al [7], малонового диальдегида с выделением в тиобарбитуровой кислоте в 20 % трихлоруксусной кислоте по методике [8], пролина с выделением в хромофоре, содержащий толуол, по методике [9]. Количественное содержание аскорбиновой кислоты и глутатиона определяли методом титрования по Петту в модификации Прокошева [10]. Измерение флуоресценции хлорофилла (ФлХл) проводили при температуре окружающей среды с 4-5 листа перед облучением на 7-е сутки, 14-е сутки и 24-е сутки после γ -облучения. ФлХл измерялась с помощью амплитудно-импульсного флуориметра Junior-RAM (Walz Inc., Effeltrich, Germany). Статистическую обработку данных проводили с помощью стандартных методов биометрии: статистически значимое отличие от контроля ($p < 0.05$) рассчитывали на основе *t*-критерия Стьюдента.

Результаты

1. Динамика содержания флавоноидов, малонового диальдегида и пролина в ответ на острое γ -облучение. Как видно из рисунка 1-1, наблюдалось накопление флавоноидов в листьях ячменя на протяжении всего периода проведения измерений. Также на 14-е сутки после облучения было выявлено статистически значимое ($p < 0.05$) повышение содержания на 25 % относительно нулевых суток.

Как видно на рисунке 1-2, на 7-е и 14-е сутки после облучения наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) повышение содержания малонового

диальдегида (МДА) в листьях ячменя на 151 % и на 364 % относительно нулевых суток, соответственно. На 24-е сутки выявлено статистически значимое ($p < 0.05$) снижение показателя на 58 % относительно 14-х суток, в то время как по сравнению с нулевыми сутками после облучения наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) увеличение на отличие 95 %. При этом содержание пролина увеличивалось на протяжении всего времени наблюдения после облучения: на 7-е – на 67 %, на 14-е сутки – на 121 %, на 24-е сутки – на 174 % (статистически значимое отличие от нулевых суток – $p < 0.05$).

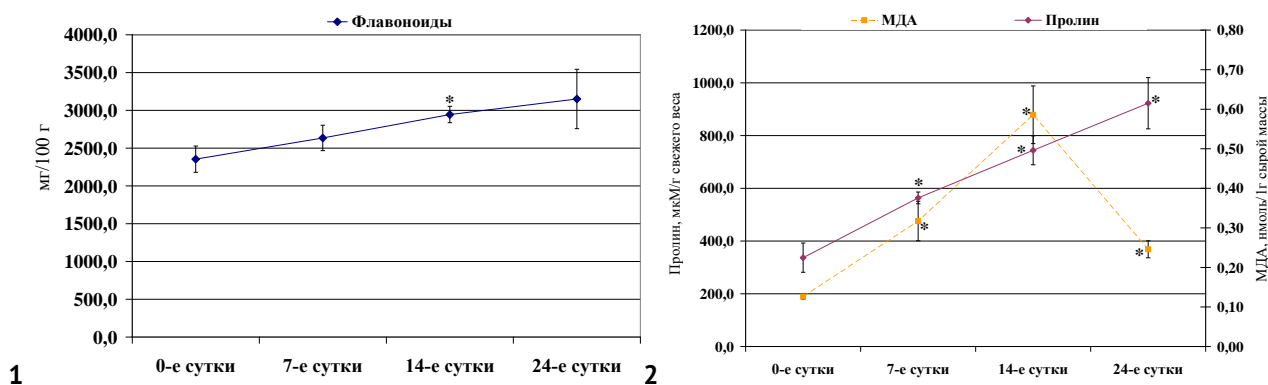


Рисунок 1. Изменение содержания: **1** – флавоноидов (мг/100 г),

2 – малонового диальдегида (нмоль/1г сырой массы) и пролина (мкМ/г свежего веса) в листьях ячменя сорта «Владимир» на разные сутки после γ -облучения.

* – статистически значимое отличие от нулевых суток ($p < 0.05$)

2. Динамика содержания аскорбиновой кислоты, глутатиона и фотосинтезирующих пигментов и изменение общей редуцирующей активности в ответ на острое γ -облучение. Как видно из рисунка 2-1, содержание аскорбиновой кислоты и глутатиона было прямо противоположным по отношению друг к другу. Было выявлено статистически значимое ($p < 0.05$) снижение содержания аскорбиновой кислоты на 56 % и на 67 % на 14-е и 24-е сутки относительно нулевых суток, соответственно. При этом наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) повышение содержания глутатиона на 147% на 14-е сутки относительно нулевых суток. Величина общей редуцирующей активности общая редуцирующая активность повышалась на 7-е сутки после облучения, а на 24-е сутки наблюдалось снижение показателя.

Как видно из рисунка 2-2, на 14-е сутки после облучения наблюдалось повышение содержания всех исследуемых фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя: хлорофиллов *a* и *b* в среднем на 11 %, каротиноидов на 4 % относительно нулевых суток. В то же время, на 24-е сутки наблюдалось статистически значимое ($p < 0.05$) снижение исследуемых пигментов: хлорофиллов *a* и *b* в среднем на 63 %, каротиноидов на 4 % относительно нулевых суток.

3. Динамика параметров флуоресценции хлорофилла в ответ на острое γ -облучение. Как видно из рисунка 3-1, показатель максимального фотохимического квантового выхода ФСII – F_v/F_m снижался на 24-е сутки после облучения, поскольку, как показано на рисунке 3, количественное содержание хлорофиллов также уменьшалось. Величина коэффициента нефотохимического тушения Штерн-Фольмеровского типа – NPQ (рис. 3-2) на 7-е и 14-е сутки снижалась, а на 24-е сутки относительно 7-х и 14-х суток наблюдалось повышение показателя NPQ. Схожая динамика изменения, как и у параметра NPQ, выявлена у показателя скорости переноса электронов – ETR (рис. 3-3).

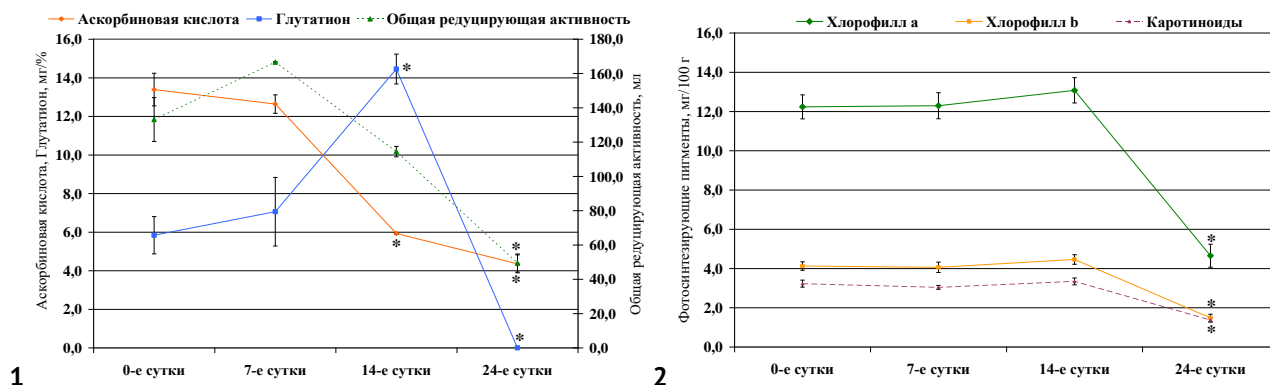


Рисунок 2. Изменение содержания:

- 1 – аскорбиновой кислоты (мг/%), глутатиона (мг/%) и общей редуцирующей активности (мл);
 2 – фотосинтезирующих пигментов в листьях ячменя сорта «Владимир» на разные сутки после γ -облучения.
 * – статистически значимое отличие от нулевых суток ($p < 0.05$)

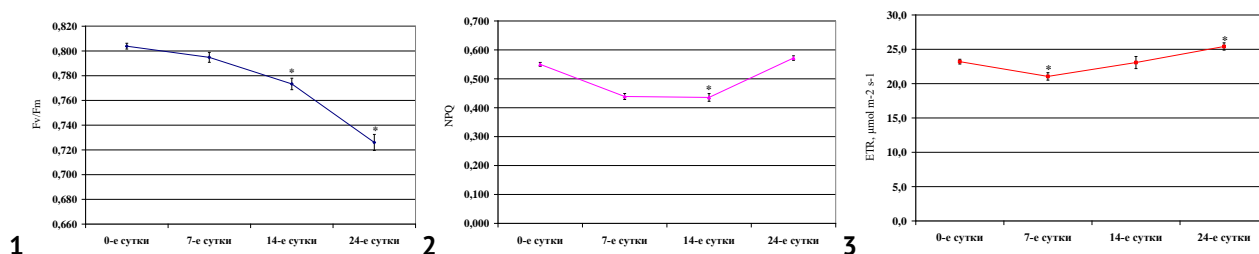


Рисунок 3. Динамика основных параметров флуоресценции хлорофилла в листьях ячменя сорта «Владимир» на разные сутки после γ -облучения:

- 1) максимальный фотохимический квантовый выход ФСИ – F_v/F_m ;
 2) коэффициент нефотохимического тушения Штерн-Фольмеровского типа – NPQ;
 3) скорость переноса электронов – ETR.
 * – статистически значимое отличие от нулевых суток ($p < 0.05$)

Выводы

1. Растения ячменя ярового сорта «Владимир» при остром γ -облучении в дозе 10 Гр испытывали последствия окислительного стресса, который приводил к постепенной гибели главного стебля растений к 30-м суткам.

2. После облучения растений наблюдали накопление таких соединений как флавоноиды, пролин, глутатион, малонового диальдегида до 14-х суток. Одновременно происходило снижение содержания фотосинтезирующих пигментов и активности фотосинтетического аппарата.

3. Облучение растений приводило к срыву адаптационных механизмов после 14-х суток, что сопровождалось падением уровня МДА, хлорофиллов, максимального фотохимического квантового выхода и критическим снижением редуцирующей активности.

Список литературы

1. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants / S.V. Gudkov, M.A. Grinberg, V. Sukhov [et al.] // Journal of Environmental

Radioactivity. 2019. V. 202. PP. 8-24. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.001.

2. Gamma irradiation induced enhancement in isoflavones, total phenol, anthocyanin and antioxidant properties of varying seed coat colored soybean / A.K. Dixit, D. Bhatnagar, V. Kumar [et al.] // J. Agric. Food Chem. 2010. V. 58. PP. 4298-4302. doi.org/10.1021/jf904228e.

3. Enhancement of antioxidant and isoflavones concentration in gamma irradiated soybean / B.M. Popovic, D. Stajner, A. Mandic [et al.] // Sci. World J. 2013. V. 2013. PP. 1-5. doi.org/10.1155/2013/383574.

4. Vardhan P.V., Shukla L.I. Gamma irradiation of medicinally important plants and the enhancement of secondary metabolite production // Int. J. Radiat. Biol. 2017. V. 93(9). PP. 967-979. doi.org/10.1080/09553002.2017.1344788.

5. Regulation of photosynthetic performance and antioxidant capacity by ^{60}Co γ -irradiation in *Zizania latifolia* plants / J. Fan, M. Shi, J.-Zh. Huang [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. PP. 33-42. dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.11.013.

6. 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. V. 11. PP. 591-592.

7. Tevini M., Iwanzik W., Thoma U. Some effects of enhanced UV-B irradiation on the growth and composition of plants // Planta. 1981. V. 153(4). PP. 388-394.

8. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty

acid peroxidation // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. V. 125. № 1. PP. 189-198.

9. Bates L.S., Waldern R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant and Soil. 1973. V. 39. № 1. PP. 205-207.

10. Определение содержания аскорбиновой кислоты, глутатиона и общей редуцирующей активности в растительной ткани методом Петта в модификации Прокошева: Практикум по физиологии растений / Под ред. И.И. Гунара. М.: Колос, 1972. С. 130-132.

DYNAMICS OF ANTIOXIDANT PROTECTION COMPONENTS AND PHOTOSYNTHESISING PIGMENTS IN BARLEY LEAVES IN RESPONSE TO SINGLE γ -IRRADIATION

Guseva O.A.

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

During the growing season, the effect of acute γ -irradiation on the dynamics of compounds of the antioxidant system and photosynthetic pigments in the leaves of spring barley was studied. It was found that irradiation with a dose of 10 Gy contributed to a decrease in malonyldialdehyde, ascorbic acid and glutathione, chlorophylls *a* and *b*, carotenoids, and the maximum photochemical quantum yield of PSII (F_v/F_m) on the 24th day after irradiation. At the same time, the content of antioxidant protection components such as flavonoids and proline, on the contrary, increased on the 24th day. On the 7th and 14th days after irradiation, an increase in the studied parameters was mainly observed, with the exception of the content of ascorbic acid, F_v/F_m , non-photochemical quenching (NPQ) and electron transfer rate (ETR), the values of which immediately tended to decrease. It can be concluded that spring barley plants experienced the consequences of oxidative stress, accompanied by the accumulation of reactive oxygen species, the source of which can be acute γ -irradiation.

Keywords: *γ -irradiation, flavonoids, MDA, proline, ascorbic acid, glutathione, total reducing activity, chlorophylls, carotenoids, chlorophyll fluorescence*

To overcome damage caused by reactive oxygen species (ROS), plants use a variety of defense systems, which include components of the ascorbate-glutathione cycle, lipid peroxidation processes with the formation of malondialdehyde (MDA), accumulation of the amino acid proline and various secondary metabolites: phenolic compounds, flavonoids, terpenoids and other compounds. One of the potential targets under the influence of γ -irradiation is also the photosynthetic apparatus of plants. Measurement of chlorophyll fluorescence is also now widely used for rapid and non-invasive assessment of photosynthetic activity in plant leaves. Our work revealed that spring barley plants of the variety "Vladimir", under acute γ -irradiation at a

dose of 10 Gy, experienced the effects of oxidative stress, which led to the gradual death of the main stem of the plants by the 30th day. After irradiation of plants, accumulation of compounds such as flavonoids, proline, glutathione, and malondialdehyde was observed up to 14 days. At the same time, there was a decrease in the content of photosynthetic pigments and the activity of the photosynthetic apparatus. Irradiation of plants led to a breakdown of adaptation mechanisms after 14 days, which was accompanied by a drop in the level of MDA, chlorophylls, maximum photochemical quantum yield and a critical decrease in reducing activity.

ОЦЕНКА СВЯЗИ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЕННОГО СУБСТРАТА И ИНТЕНСИВНОСТИ ТОКСИЧЕСКОГО СТРЕССА У РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

Дикарев А.В.^а, Дикарев Д.В., Крыленкин 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: ^а ar.djuna@yandex.ru

В вегетационном эксперименте на дерново-подзолистой почве, загрязненной Cd^{2+} в дозах 25 и 45 мг/кг, выращивали яровой двурядный ячмень сорта Зазерский 85. Исследовали, как влажность почвы модифицирует влияние кадмия на ячмень, взяв следующие градации влажности: 45, 50, 55, 60, 65 % ПВ. Анализировали морфометрические и биохимические показатели растений, их продуктивность и накопление кадмия в надземной биомассе. Выявлено, что при недостаточном и избыточном увлажнении токсическое действие кадмия усиливается, а при оптимальном – ослабляется.

Ключевые слова: яровой ячмень, кадмий, устойчивость к токсическому стрессу, морфометрические и биохимические показатели, продуктивность, влажность почвы

Введение

Кадмий – опасный загрязнитель наземных и водных экосистем. Данный тяжелый металл (ТМ) поступает в окружающую среду в составе выхлопных газов, с отходами промышленности и сельского хозяйства [1]. В почвах сельскохозяйственных угодий содержание Cd^{2+} достигает 400-800 мг/кг, а в почвах промышленных зон – превышает 1000 мг/кг [2]. Накапливаясь в растениях в токсических концентрациях, кадмий вызывает повреждения во всех системах, органах, клетках, нарушает протекание биохимических реакций, связанных с питанием, дыханием, фотосинтезом, изменяет активность ферментов и их состав, нарушает процессы минерального питания и водного обмена, меняет гормональный статус, воздействует на структуру плазмалеммы [3]. На загрязненных этим ТМ почвах наблюдается снижение продуктивности сельскохозяйственных культур. Продукты питания, произведенные на загрязненных территориях, могут содержать кадмий в опасных для здоровья человека концентрациях [2].

Актуальной становится задача исследования механизмов, по которым формируется ответ сельскохозяйственных растений на действие кадмия. Вызывает интерес воздействие кадмия на водный режим растений. При наличии в почве повышенных концентраций ТМ ослабляется интенсивность транспирации, падает содержание воды в тканях. Это ведет к замедлению роста, сокращению площади листьев, ослабляется и тургор клеток. Нарушению водного режима растений способствуют и такие процессы, как ослабление интенсивности дыхания и окислительного фосфорилирования. Наличие ТМ в почвенном растворе приводит к повреждению клеток ризодермы корня и к нарушению процессов минерального питания растений. Возникает вопрос о том, а связана ли степень

увлажнения почвенного субстрата с уровнями токсического стресса, вызываемого действием кадмия. Воздействие ТМ ведет к нарушению водного обмена, и при недостаточном увлажнении токсический стресс будет выражен сильнее и наоборот. При избыточном увлажнении почвы также могут проявиться негативные эффекты, когда доступ воздуха к корням растений затруднен. Кроме того, при действии ТМ повреждаются клетки зоны всасывания корня, усиливаются процессы суберинизации и нарушается селективный транспорта ионов, что ведет к загниванию корней, чему способствует также избыточное увлажнение. Поэтому цель настоящей работы – оценка того, как изменяется действие кадмия на растения ярового двурядного ячменя при различной влажности почвенного субстрата.

Материалы и методы

Поведение растений ячменя в условиях внесения в почву кадмия и изменяющейся степени увлажненности почвы оценивали в вегетационном эксперименте, проводившемся в теплице ВНИИРАЭ. Объект исследования – ячмень яровой двурядный (*Hordeum vulgare* L.) сорта Зазерский 85, выращивавшийся на дерново-подзолистой супесчаной почве. В почву вносился Cd^{2+} в виде нитрата в концентрациях 0, 25 и 45 мг/кг. Влажность почвы в сосудах поддерживалась на различных уровнях в следующих вариантах: 45, 50, 55, 60, 65 % ПВ. На каждый вариант закладывалось по три повторности, всего 45 сосудов [4, 5]. Физические и химические показатели почвы, концентрацию Cd^{2+} в растениях, содержание подвижных форм и валовое количество элементов в почве определяли общепринятыми методами [4, 5]. Квазиравновесные почвенные растворы были получены в середине эксперимента с помощью центрифугирования.

В извлеченных почвенных растворах определяли pH, содержание Cd, микро- и макроэлементов. Концентрацию Cd в анализируемых растворах определяли методом ICP-OES. На 30-й день эксперимента получены данные по содержанию малонового диальдегида (МДА), содержанию низкомолекулярных антиоксидантов, липидов. Оценены морфометрические параметры растений на 30-й день эксперимента, в конце вегетации проанализирована структура урожая. Определены уровни накопления кадмия в наземной биомассе растений.

Результаты и обсуждение

Три рассмотренных морфометрических показателя 30-дневных растений ячменя – высота растений, площадь листьев и биомасса – как в контроле, так и при обеих рассмотренных дозах демонстрировали наибольшие значения при влажности почвы 55-60 %, и значимо более низкие – при крайних (45 и 65 %). Это проявлялось при дозе кадмия 45 мг/кг, но и при 25 мг/кг рассмотренные эффекты все равно отмечались. При значениях влажности 55-60 % величины морфометрических показателей растений ячменя снижались в меньшей степени по сравнению с контрольными уровнями, чем при крайних. Не было выявлено изменений в содержании металлических катионов в почвенном растворе в зависимости от влажности почвы, значения во всех случаях колебались в пределах статистической погрешности.

Оценка биохимических показателей в наземной биомассе 30-дневных растений ячменя показала следующее. Накопление МДА при дозе 25 мг/кг менялось незначительно, возрастая только при наибольшей влажности почвы. При внесении в почву 45 мг/кг кадмия отмечался значимый рост этого показателя при 50 % ПВ, а вот при крайних значениях влажности он даже падал ниже контрольного уровня. Содержание антиоксидантов при дозе кадмия 25 мг/кг в целом показывало несущественный рост за исключением случая с максимальной влажностью, где этот параметр возрастал очень сильно. В вариантах с внесением 45 мг/кг кадмия содержание антиоксидантов также возрастало и, особенно – при наибольшей влажности. Исключением стал вариант с 60 % ПВ, где этот параметр оказался даже ниже контроля. Кривая изменения уровней синтеза липидов главным образом соответствовала таковой для МДА. При 25 мг/кг содержание липидов в пробах оказалось значимо выше соответствующих контрольных значений. При 45 мг/кг кадмия содержание липидов также превосходило контрольные значения, но уже не столь существенно, как при 25 мг/кг. Внесение кадмия стимулировало процесс перекисного окисления липидов плазматических мембран клеток, на что растительный организм реагировал повышенным синтезом защитных соединений, нацеленных на детоксикацию накопленных активных форм кислорода (АФК). Синтезировались дополнительные липиды, призванные заместить накопленные в плазмалемме

повреждения. Этот процесс шел достаточно активно во всех случаях, но в большей степени при внесении в почву 25 мг/кг Cd²⁺. Доза кадмия 45 мг/кг приводила к истощению защитных ресурсов организма, но не столь существенному, чтобы вызвать полное подавление процессов роста и развития растений. Не получалось увязать эти процессы с изменениями во влажности почвы, но избыточное увлажнение способствовало значительной активизации выработки АФК и в биохимическом плане имело более пагубные последствия для растений, чем недостаток влаги.

Оценка структуры урожая показала, что при внесении в почву кадмия сокращается продуктивность растений и их биомасса. При дозе ТМ 45 мг/кг урожайность сокращалась в большей степени, в то же время процесс формирования зеленой массы страдал в меньшей степени. При дозе 25 мг/кг наибольшей продуктивности удалось достичь при 60 и 65 % ПВ, а при 45 мг/кг – при 55 и 60 %. При дозе кадмия 25 мг/кг при 60% ПВ удавалось достичь продуктивности почти на уровне контроля. Таким образом, поддержание оптимального режима полива способствует мобилизации защитных ресурсов организма и позволяет ему эффективнее преодолевать токсический стресс и успешно завершать жизненный цикл, давая урожай.

Оценка накопления кадмия в наземной биомассе растений ячменя показала, что влажность почвы оказывает заметное влияние на переход ионов ТМ в солому и зерно. В вариантах с внесением 25 мг/кг Cd²⁺ накопление кадмия как в соломе, так и в зерне постепенно нарастало при значениях ПВ 45, 50 и 55 %, а потом сокращалось и при максимальной влажности становилось примерно таким же, как и при минимальной. При внесении в почву 45 мг/кг кадмия, отмечались иные закономерности. Накопление Cd²⁺ в соломе почти не менялось до 55 % ПВ, но потом значимо возрастало, становясь максимальным при 60 %, но потом несколько падало при 65 %, но оставалось все же выше, чем при трех меньших значениях влажности. Изменения влажности почвы практически не оказывали влияния на уровни накопления кадмия в зерне с вариантами, когда он вносился в почву в дозе 45 мг/кг, отмечались разнонаправленные колебания этого показателя. Большая обводненность почвы способствует более активному переносу ионов – как питательных, так и токсических – в ткани растительного организма. Избыточное увлажнение ведет к угнетению функций организма по поглощению почвенного раствора, и способствует меньшему переходу кадмия в наземную биомассу. Наиболее отчетливо это проявлялось при умеренной (25 мг/кг) дозе ТМ, но при близкой к летальной (45 мг/кг) на первый план выступали другие механизмы. В условиях воздействия как токсического стресса, так и вызванного повышенной влажностью окислительного стресса происходит нарушение механизмов селективного поглощения ионов из почвы и их переноса. Ксенобиотики преодолевают стоящие на пути их поглощения барьеры и в повышенных концентрациях накапливаются в

надземной биомассе. В условиях угнетения функции генеративных органов это слабо отражается на переносе в зерно.

На основании всех накопленных в рамках данного исследования результатов можно утверждать, что влажность почвы оказывает значимое воздействие на особенности ответа растительного организма на токсический стресс. Недостаточная и избыточная влажность способствует более глубокому угнетению процессов роста и развития растений ячменя, в то время как при оптимальной влажности растения относительно успешно противостоят стрессу и могут нормально завершить свой вегетационный цикл, дав семенное потомство. Реакция растений на изменение влажности имеет комплексный и сложный характер, значимо различаясь в зависимости от рассматриваемого показателя и уровня организации растений (организменный, физиолого-биохимический и др.). При крайних значениях влажности почвы растения подвергаются двойному стрессу – токсическому и связанному с недостатком или избытком влаги, потому для исследований, в которых производится оценка ответа растений на действие негативных факторов среды предпочтительно поддерживать влажность почвы на уровне 55-60 % ПВ.

Заключение

Эффекты стрессового воздействия кадмия, оказываемые им на растения ярового ячменя сорта Зазерский 85, претерпевают существенные изменения в зависимости от влажности почвы. При значениях влажности 55-60 % токсический стресс проявлялся в наименьшей степени, а при дозе кадмия 25 мг/кг рассмотренные показатели более или менее приближались к контрольным уровням. Доза кадмия 45 мг/кг оказывала на растения угнетающее воздействие в любом случае, однако и при ней поддержание

оптимальной влажности способствовало заметному сокращению токсических эффектов. При влажности 45 % растения при обоих рассмотренных дозах кадмия демонстрировали признаки серьезного угнетения по всем жизненным показателям. Сходная картина отмечалась и для 65 % влажности почвы. В подобных условиях растения испытывали двойной стресс, вызванный не только наличием в почвенной среде ксенобиотика, но и недостаточным или избыточным увлажнением. Оптимальной для выращивания растений ячменя влажностью, при которой растительный организм способен наиболее эффективно противостоят средовым стрессам различной природы, следует считать 55 % ПВ.

Список литературы

1. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой, к.б.н. П.Н. Цыгвинцева. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.
2. Позняк С.С. Содержание тяжелых металлов Pb, Ni, Zn, Cu, Mn, Zr, Cr, Co и Sn в почвах центральной зоны республики Беларусь // Экономика и экологический менеджмент. 2014. № 1. С. 23-35.
3. 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. V. 34. № 3. PP. 1045-1055.
4. Анализ внутривидового полиморфизма ячменя по устойчивости к действию кадмия / С.А. Гераськин [и др.] // Агрехимия. 2021. № 8. С. 49-56.
5. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // Агрехимия. 2019. № 6. С. 72-80.

AN ASSESSMENT OF SOIL SUBSTRATUM HUMIDITY CONNECTION WITH THE INTENSIVITY OF TOXIC STRESS ON THE BARLEY PLANTS

Dikarev A.V., Dikarev D.V., Krylenkin 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

In a vegetation experiment, spring two-row barley of the Zazersky 85 cultivar was grown on soddy-podzolic soil contaminated with Cd²⁺ in doses of 25 and 45 mg/kg. We studied how soil moisture modifies the effect of cadmium on barley, taking the following moisture gradations: 45, 50, 55, 60, 65 % of total moisture capacity. The morphometric and biochemical parameters of plants, their productivity and the accumulation of cadmium in above-ground biomass were analyzed. It was revealed that with insufficient and excessive moisture, the toxic effect of cadmium increases, and with optimal moisture, it weakens.

Keywords: spring barley, cadmium, toxic stress tolerance, morphometric and biochemical parameters, productivity, soil humidity

НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs РАЙОНА ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ В ПРОДУКЦИИ КАРТОФЕЛЯ: ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА ИЗ ПОЧВ, ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ВАРКИ НА ОСТАТОЧНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДА, РИСКИ РАЗВИТИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Жерненко А.О.^{1,2,а}, Парамонова Т.А.^{1,2,б}, Кузьменкова Н.В.^{2,3,в}

¹ 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, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Географический факультет), 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1А, 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

e-mail: ^а zhiernienkov99@mail.ru, ^б paramonovata@my.msu.ru, ^в kuzmenkovanv@my.msu.ru

Исследовались интенсивность перехода ^{137}Cs из почвы в растения картофеля, а также влияние наиболее широко распространенного бытового метода кулинарной обработки клубней цельного и измельченного картофеля – варки с поваренной солью – на остаточное содержание в них ^{137}Cs с последующей оценкой радиационно-гигиенической безопасности пищевой продукции, непосредственно употребляемой населением. Установлены неоднородность распределения ^{137}Cs по органам и тканям и незначительное воздействие кулинарной обработки на остаточное содержание ^{137}Cs в картофеле по сравнению с исходным уровнем накопления радионуклида в клубнях. При этом индивидуальные годовые эффективные дозы от внутреннего облучения человека составляют менее 0.001 % от безопасной дозы 0.3 (ЕАЕС) – 1 (ICRP) мЗв/год.

Ключевые слова: картофель, цезий-137 (^{137}Cs), кулинарная обработка, радиационная гигиена, внутреннее облучение, онкологические заболевания

Введение

Картофель занимает почетное место на обеденном столе россиян и традиционно употребляется в пищу в нашей стране уже более 300 лет. Принимая во внимание данные о потреблении картофеля в пищу жителями Восточной Европы в количествах, составляющих около 90 кг на человека в год [1], а также масштабы загрязнения пахотных угодий стран Восточной Европы чернобыльскими выпадениями, встает вопрос о радиационно-гигиенической безопасности употребления данного клубнеплода в пищу.

В этой связи интенсивность перехода ^{137}Cs из почвы в картофель и влияние кулинарной обработки на клубни (варка с солью) вызывают особый интерес с точки зрения радиационной гигиены.

Обзор литературы показал, что вопросу о влиянии кулинарной обработки на поведение биофильных элементов в продукции растениеводства посвящено не так много работ [2, 3]. В свою очередь, поведению радиоактивных элементов исследований посвящено тоже немного [4, 5]. Авторы взялись за восполнение данного пробела.

Материалы и методы

Объектом исследования послужил картофель сорта Гала (Gala), отобранный из агроценоза, расположенного в пределах Плавского радиоактивного пятна (ПРП) Тульской области. Данный сорт имеет столовое назначение и введен в использование на территории России в 2008 году [6].

Для определения величин удельной активности ^{137}Cs в пробах растений применялся гамма-спектрометрический метод в геометрии «дента», либо «чашка Петри» диаметром 4 см (для проб перидермы клубня). Измерения проводились на полупроводниковом гамма-спектрометре Canberra GR 3818 с детектором из особо чистого германия HPGe (США) с использованием программы обработки спектров «SpectrLineGP» (Россия).

Для кулинарной обработки картофеля использовалась мультиварка «REDMOND» на режиме «варка». При этом клубни картофеля массой ≈ 1 кг отваривались в мундире, в виде очищенных цельных и очищенных и нарезанных на брусочки клубней. Соотношение «сырая масса клубней: вода» бралось,

согласно рекомендациям по приготовлению картофеля, как 1:2. Соль (NaCl) в количестве 20 г добавлялась на каждый 1 л воды. Контролировались масса продукта до и после кулинарной обработки, величины удельной активности и общих запасов ^{137}Cs в приготовленном продукте, отдельно определялась доля радионуклида, перешедшего в отвар.

Результаты и обсуждение

Картофель относится к дискриминаторам корневого потребления радионуклида. Так, средняя величина удельной активности ^{137}Cs в общей биомассе растений картофеля в 35 раз меньше, чем в пахотном горизонте почвы, приравниваемом к корнеобитаемому слою, а запасы радионуклида в растительном блоке на 4 порядка меньше, чем в почвенном (табл. 1).

Варка клубней картофеля в соленом растворе приводила к переходу части накопленного в них ^{137}Cs

в отвар, что отражалось в снижении остаточного содержания радионуклида в готовом к потреблению продукте на 23-59 % (табл. 2). Более существенную роль в процессе выварки радионуклида из клубней по сравнению с их термической обработкой играла предварительная очистка картофеля от кожуры, при которой остаточное содержание ^{137}Cs в готовом к потреблению продукте снижалось в 5 раз, поскольку минеральные элементы концентрируются в коре и перидерме клубня, а сердцевина бедна ими [7, 8]. Еще заметнее переход ^{137}Cs в отвар активизировался при механической нарезке клубней на брусочки перед варкой.

Однако различия распределения долей запаса ^{137}Cs в клубнях картофеля до варки и после нее в целом не так существенны. Это говорит о прочной связи значительной части перешедшего в растения радионуклида с компонентами клеточной стенки и оргanelл (рис. 1).

Таблица 1

Вариационно-статистическая характеристика накопления ^{137}Cs в биомассе растений картофеля на территории ПРП (n от 3 до 6)

Показатель	Фракция биомассы	Среднее	Доверительный интервал, ±	Размах (min – max)	Cv, %
Удельная активность, Бк/кг	надземная	38.9	20.9	31.2-47.9	22
	подземная	9.4	0.4	7.5-11.3	12
	общая	14.4	6.6	11.5-17.5	15
Запасы, Бк/м ²	надземная	9.7	5.5	8.7-25.1	51
	подземная	11.5	2.6	8.6-13.3	22
	общая	21.2	3.6	15.5-25.0	23

Таблица 2

Величины удельной активности ^{137}Cs во фракциях картофеля после варки с солью (NaCl), Бк/кг (или Бк/л)

Без кулинарной обработки		Варка цельного картофеля в мундире			Варка очищенного цельного картофеля		Варка очищенного и нарезанного на кусочки	
Сырой клубень	Кожура	Отваренный картофель (без кожуры)	Кожура (с отваренного картофеля)	Отвар	Отваренный картофель	Отвар	Отваренный картофель (нарезанный кусочками)	Отвар
6.6	33.1	5.1	16.8	0.5	3.4	0.4	2.7	0.7

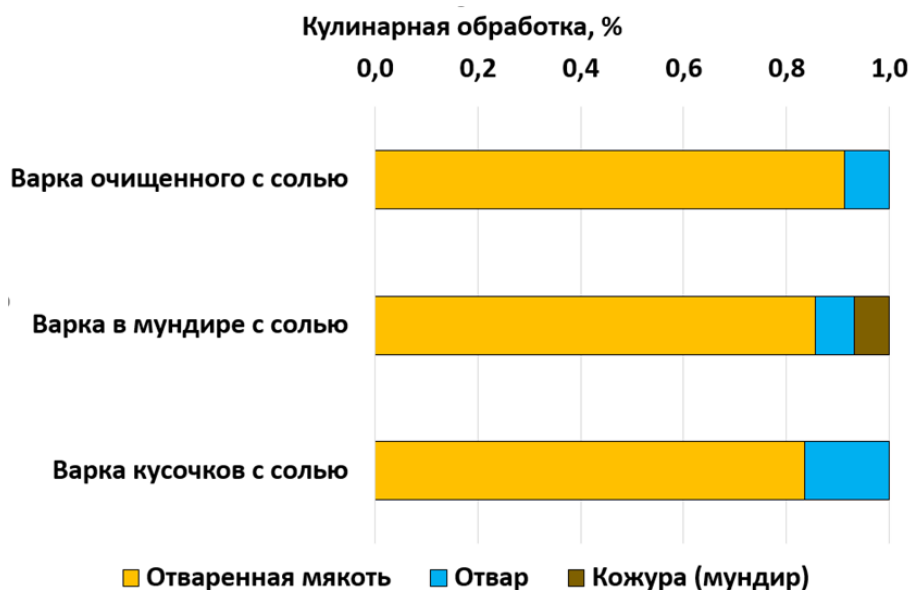


Рисунок 1. Распределение долей запасов ^{137}Cs после варки с солью (NaCl), %

Дополнительный расчет годовой эффективной дозы облучения взрослого человека при поедании ^{137}Cs -содержащего картофеля, произведенного на территории ПРП, по нормам потребления в России и в странах Восточной Европы (Минздрав РФ Закон от 19.08.2016 № 614, Food regional diets, 2003) подтвердил, что величина показателя D_{eff} составляла менее 0.01 % от установленной Международной комиссией по радиационной защите (ICRP) допустимой дозы облучения человека от техногенных источников, составляющей 1 мЗв в год (Use of Dose Quantities in

Radiological Protection, 2021), и менее 0.03 % от установленной Европейским сообществом по атомной энергии (ЕАЕС) эффективной дозы для взрослых при приеме внутрь продуктов питания, составляющей 0.3 мЗв в год (табл. 3).

Полученные данные были использованы для оценки риска развития рака по методу US EPA [9]. Риск развития рака, связанный с употреблением картофеля сорта Гала, который прошел разные виды кулинарной обработки, не превышает порогового значения риска, который равен 10^{-6} (табл. 4).

Таблица 3

Расчет индивидуальной годовой эффективной дозы облучения (D_{eff}) от ^{137}Cs для взрослого человека при поедании картофеля, выращенного на территории ПРП

Варка с солью	Очищенный клубень	Клубень в мундире	Очищенный и нарезанный на кусочки
D_{eff} от ^{137}Cs , мкЗв/год/чел в Европе (72 кг)	4.0×10^{-6}	5.9×10^{-6}	3.1×10^{-6}
D_{eff} от ^{137}Cs , мкЗв/год/чел в России (90 кг)	4.0×10^{-6}	4.7×10^{-6}	2.5×10^{-6}

Таблица 4

Рассчитанный риск развития рака от внутреннего облучения ^{137}Cs , получаемого с поеданием картофеля с ПРП (US-EPA (1993), US-EPA (1999) Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides)

Варка с солью	Очищенный клубень	Клубень в мундире	Очищенный и нарезанный на кусочки
Риск развития рака для жителей Европы	3.2×10^{-11}	4.8×10^{-11}	2.5×10^{-11}
Риск развития рака для жителей России	2.6×10^{-11}	3.8×10^{-11}	2.0×10^{-11}

Заключение

Для растений картофеля характерна высокая контрастность величин удельной активности ^{137}Cs в разных органах и тканях. Наибольшими показателями отличаются столоны (180 Бк/кг) и тонкие корни картофеля (154 Бк/кг), наименьшими – мякоть клубня (7 Бк/кг). Вместе с тем, основным депо накопления радионуклида служат клубни картофеля, доминирующие в структуре его биомассы.

Кулинарный метод обработки картофеля (варка с солью) не оказывает существенного влияния на величину удельной активности ^{137}Cs в подготовленном к непосредственному потреблению человека продукте питания. Величины годовой эффективной дозы внутреннего облучения человека при поедании картофеля (сырого или подвергнутого различным видам кулинарной обработки) составляют менее 0.001 % от безопасной дозы облучения 0.3 (ЕАЕС) – 1 (ICRP) мЗв/год, что подтверждает радиационно-гигиеническую безопасность продукции и минимальные риски развития онкологических заболеваний.

Исследование проведено в рамках проекта Министрства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-614 от 13 июня 2024 года).

Список литературы

1. Potato Market and Consumption / M. Pllana, N. Merovci, M. Jashari [et al.] // International Journal of Sustainable Economies Management (IJSEM), IGI Global. 2018. V. 7(3). PP. 19-29.

2. Effect of boiling and peeling on manganese content of some vegetables determined by derivative

anodic stripping chronopotentiometry (dASCP) / G. Dugo, L. La Pera, V. Lo Turco [et al.] // Food Chemistry. 2005. V. 93(4). PP. 703-711.

3. Burrowes J.D., Ramer N.J. Changes in Potassium Content of Different Potato Varieties After Cooking // Journal of Renal Nutrition. 2008. V. 18(6). PP. 530-534.

4. Aarkrog A. «Seasonality», Modelling of Resuspension, Seasonality and Losses during Food Processing: First Report of the VAMP Terrestrial Working Group, IAEATECDOC-647. Vienna: IAEA, 1992. P. 61.

5. Garland J.A., Pattenden N.J., Playford K. Resuspension following Chernobyl, Modelling of Resuspension, Seasonality and Losses during Food Processing: First Report of the VAMP Terrestrial Working Group, IAEATECDOC-647. Vienna: IAEA, 1992.

6. Сорта картофеля, возделываемые в России: Справочное издание 2013 / Под общ. ред. С.Н. Еланского. М.: Агроспас, 2013. 144 с.

7. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений: экофизический подход к биомониторингу и биовосстановлению, перевод с англ. Н.И. Михайловой, под редакцией чл.-корр. РАН Н.С. Касимова. М.: Геос, 2005. 454 с.

8. Черевко А.И., Михайлова В.М. Энциклопедия питания. Т.6. Процессы, происходящие в продуктах при обработке. 2019.

9. US-EPA (1999) Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides. Office of Radiation and Indoor Air. United States Environmental Protection Agency. Washington, DC 20460 September 1999.

IMPLICATION OF THE COOKING PROCESS ON RESIDUAL ^{137}Cs IN POTATO AND RISKS OF ONCOLOGICAL DISEASE DEVELOPMENT IN EATING TUBERS

Zhernenkov A.O.^{1,2}, Paramonova T.A.^{1,2}, Kuzmenkova N.V.^{2,3}

¹ 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

² Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Geography), Leninskie Gory 1A, 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

The influence of the most common household method of cooking whole and method of cooking whole and shredded potato tubers - boiling with table salt - on residual The influence of the most common household method of cooking whole and shredded potato tubers - boiling with table salt - on the residual ^{137}Cs content in them was studied. ^{137}Cs content in them with the subsequent assessment of radiation-hygienic safety of the food products directly consumed by population. It was found that culinary processing insignificantly influences the residual ^{137}Cs content in potatoes in comparison with the initial level of accumulation of the radionuclide in tubers, with individual annual effective doses from the internal human exposure are less than 0.001 % of the safe dose of 0.3 (ЕАЕС) – 1 (ICRP) mSv/year.

Keywords: potatoes, caesium-137 (^{137}Cs), culinary processing, radiation hygiene, internal irradiation, oncological diseases

УДК 504.064.3

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЭКОСИСТЕМАХ ГОРНОГО МАССИВА ХИБИНЫ

Ковалев И.И., Булгарова О.И., Ларина Д.Д., Гурина Р.Р.^а

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Российская Федерация
e-mail: ^аgurina-rr@rudn.ru

Миграция радионуклидов по пищевым цепям не приводит к увеличению их содержания на высших трофических уровнях при однократном поступлении, но это не исключает избирательное накопление изотопов при хроническом воздействии. В данной работе оценивался переход радионуклидов в системе почва – растение – организм животного. Результаты показывают, что угнетающее влияние радионуклидов из проб почв на рост выбранных культур отсутствует. Также было выявлено, что для растений характерны межвидовые различия в накоплении радиоактивных веществ. При этом накопление радионуклидов у разных видов растений, выращенных на одной почве, может различаться более чем в 4 раза. Для обследованных растений коэффициент накопления цезия-137 менялся в диапазоне 0.35-1.18. Коэффициент накопления радия-226 изменялся в диапазоне 0.51-2.64. Коэффициенты накопления тория-232 колебались от 0.51 до 0.89. Коэффициент накопления калия-40 изменялся в пределах 0.15-0.63. Коэффициент перехода цезия в органы цыплят изменялся от 0.08 в костях до 0.91 в мышцах, радия – от 0.16 в почках до 0.90 в костях, тория – от 0.30 в мышцах до 1.51 в печени, калия – от 0.12 в почках до 0.52 в мышцах.

Ключевые слова: мониторинг, радионуклиды, накопление, концентрация

Введение

Жизнь подвержена воздействию ионизирующего излучения космического, земного и техногенного происхождения. Уровень естественного радиационного фона составляет в среднем 2-3 мЗв/год, треть которого обусловлена космическим излучением, а две трети – земным влиянием радионуклидов. Естественная радиация исходит от месторождений радиоактивных ископаемых, горных пород и природных вод с высоким содержанием тория, радия, урана и радона. Радионуклиды накапливаются в растениях и животных. В природе обнаружено около 60 радионуклидов, создающих радиоактивность биосферы.

Горные породы, руды и минералы содержат естественные радионуклиды, такие как уран и торий. Геологические процессы могут привести к концентрации радионуклидов и образованию радиационно опасных участков [1]. Радиационная опасность возникает и от крупных горных предприятий с повышенным содержанием радионуклидов [2].

Мониторинг содержания радионуклидов помогает определить источники загрязнений и предотвратить вредное воздействие радиации на окружающую среду [3, 4].

Актуальность проблемы

В последние десятилетия вопросам распространения радионуклидов в природной среде уделяется особое внимание (российские и международные научные программы). Один из таких регионов – Кольский полуостров, где расположены радиационно опасные объекты, включая подземные ядерные взрывы малой мощности и предприятия по добыче и переработке радиоактивного сырья [5, 6].

Следует учесть, что в горах геоморфологические процессы протекают быстрее, чем на равнинах, поэтому исследование почвы необходимо для оценки распространения радионуклидов и их влияния на здоровье населения [6].

Цели и задачи исследования

Цель исследования – изучить особенности миграции и аккумуляции радиоактивных изотопов в Хибинах для оценки воздействия радиации на природу. Задачи: исследовать источники радионуклидов, определить уровень загрязнения почвы и рассчитать коэффициенты накопления радионуклидов для растений и животных.

Материалы исследований

Эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе проводились дозиметрические исследования, спектрометрический анализ и определение плотности радиоактивного загрязнения почвы. Для

спектрометрического анализа было подготовлено 7 проб, после чего они подвергались прокаливанию и повторному анализу.

На втором этапе рассчитывалась дозовая нагрузка на живые организмы и определялись количественные показатели перехода радионуклидов в системе почва-растение-организм [7]. Для оценки перехода радионуклидов на образцах почв были высажены четыре культуры: пшеница, горчица, клевер и фасоль, а также растения в чистой почве для контроля результатов. Затем определялась удельная активность радионуклидов в пробах почвы и растительности.

Оценка перехода радионуклидов из растений в организм проводилась на месячных цыплятах, для исследования использовались различные органы и ткани. Исследования проводились с использованием современных радиоспектрометрических методов анализа на гамма-спектрометрическом комплексе «ПРОГРЕСС».

Результаты исследований

В данной работе оценивался переход радионуклидов в системе почва – растение – организм животного.

Результаты показывают, что угнетающее влияние радионуклидов из проб почв на рост выбранных культур отсутствует. Также было выявлено, что для растений характерны межвидовые различия в накоплении радиоактивных веществ. При этом накопление радионуклидов у разных видов растений, выращенных на одной почве, может различаться более чем в 4 раза.

Было отмечено, что способность накапливать радионуклиды уменьшается в следующих рядах (рис. 1): цезий: клевер-горчица-фасоль-пшеница; радий: фасоль-горчица-клевер-пшеница; торий: горчица-клевер-пшеница-фасоль; калий: фасоль-горчица-клевер-пшеница.

В результате исследований были получены и проанализированы данные по пяти органам (табл. 1): сердце, легкие, печень, мышечная ткань, костная ткань. Исследования показали, что содержание радиоактивных изотопов в органах животных зависит от времени, прошедшего после поступления в организм радионуклида. Отмечается и тканевая специфичность радионуклидов.

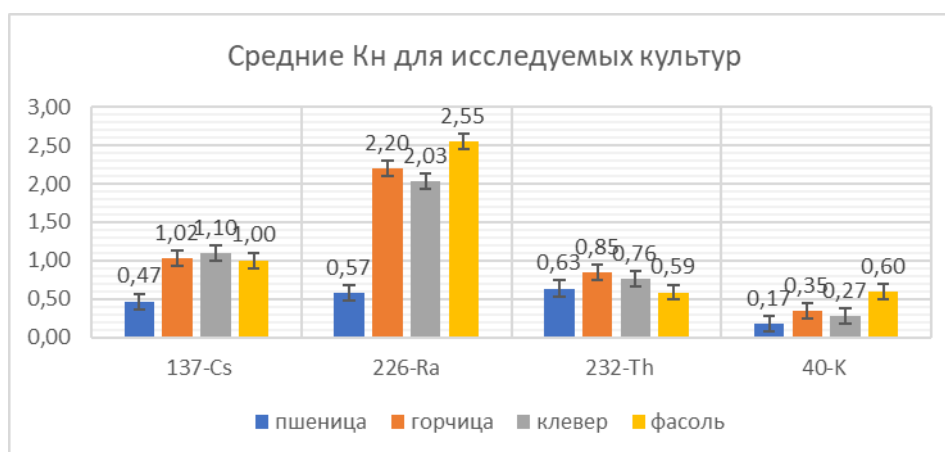


Рисунок 1. Средние значения коэффициентов накопления радионуклидов для разных культур

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в разных органах цыплят

орган		Удельная активность, Бк/кг			
		через 1 ч	через 6 ч	через 24 ч	через 48 ч
сердце	137-Cs	241.13±72.34	54.23±16.27	31.29±9.38	10.23±3.06
	226-Ra	32.55±9.76	106.16±31.84	61.49±18.44	85.68±25.7
	232-Th	78.02±23.41	61.49±18.44	48.48±14.54	18.87±5.66
	40-K	182.62±54.79	85.68±25.7	26.45±7.8	17.45±5.23
легкие	137-Cs	310.28±93	62.49±18.74	47.41±14.23	19.31±5.19
	226-Ra	306.34±91.9	482.66±144.79	62.05±18.61	19.47±5.84
	232-Th	114.74±34.42	60.06±18.1	47.69±14.3	43.50±13
	40-K	307.19±92.15	135.12±40.53	20.56±6.16	42.55±12.76
печень	137-Cs	252.94±75.88	110.99±33.29	42.55±12.76	19.39±5.81
	226-Ra	6.68±2	31.36±9.4	30.19±9.05	27.78±8.33

орган	Удельная активность, Бк/кг				
	через 1 ч	через 6 ч	через 24 ч	через 48 ч	
	232-Th	183.81±55.14	113.48±34.04	84.91±25.47	64.27±19.28
	40-K	170.05±51	74.02±22.2	28.84±8.6	18.95±5.68
Почки	137-Cs	308.82±92.64	67.14±20.14	30.36±9.1	11.35±3.4
	226-Ra	22.91±6.87	91.46±27.43	74.22±22.26	13.61±4
	232-Th	138.22±41.46	71.39±21.41	55.82±16.74	24.52±7.35
	40-K	325.41±97.62	148.72±44.61	20.91±6.27	4.75±1.42
Мышцы	137-Cs	268.33±80.49	169.32±50.79	122.33±36.69	55.70±16.71
	226-Ra	21.34±6.4	69.10±20.73	34.84±10.45	25.16±7.54
	232-Th	87.20±26.16	56.24±16.87	49.47±14.84	12.84±3.85
	40-K	226.03±67.8	68.41±20.52	44.21±13.26	22.09±6.62
Кости	137-Cs	29.16±8.74	17.81±5.31	15.62±4.68	4.86±1.45
	226-Ra	20.40±6.12	95.98±28.79	81.95±24.58	77.24±23.17
	232-Th	67.58±20.27	37.71±11.31	32.09±9.62	27.04±8.11
	40-K	140.0±42	56.87±17	10.68±3.2	5.66±1.69

Результаты показывают, что наибольшее количество цезия накопила в себе мышечная ткань, наименьшее – кости. Радий интенсивно откладывался в костях и не накапливается в легких и почках. Наибольшее количество тория накопилось в печени, но медленнее всего этот радионуклид выводился из легких. Меньше всего тория отложилось в мышечной ткани. Калий интенсивно выводился из исследуемых органов, при этом наибольшее его количество задержалось в мышцах.

Обсуждение результатов исследований

Исследования показали увеличение содержания радиоактивных изотопов с севера на юг. Активность максимальна в пробах, взятых возле мест ядерных взрывов. Различия в результатах объясняются миграцией радионуклидов с подземными водами после нарушения целостности штолен. Южная часть массива накапливает больше изотопов из-за географических особенностей: северная часть расположена выше, и реки текут на юг, вынося вещества из северной части. Межвидовые различия в накоплении радионуклидов растениями существенны: пшеница содержит меньше, а фасоль – больше изотопов. Коэффициенты накопления различаются для цезия-137 в 2 раза, радия-226 – в 4.5 раза, тория-232 – в 1.5 раза и калия-40 – в 3.5 раза.

Характер накопления радионуклидов влияет на их миграцию по пищевым цепочкам и поступление в организм животных и человека. Исследования на месячных цыплятах показали, что распределение изотопов зависит от времени после их поступления в организм. Резкое увеличение концентрации радионуклидов в начале сменяется уменьшением их содержания.

Возраст и интенсивный обмен веществ у молодых птиц способствуют быстрому уменьшению концентрации радионуклидов в организме

Цезий-137 равномерно распределяется по мягким тканям и слабо накапливается в костях. Торий-232 концентрируется в почках и печени, а радий-226 – в костях. Калий-40 также распространяется по всем органам и тканям. Активность радионуклидов в почках связана с их накоплением и выведением с мочой.

Миграция радионуклидов по пищевым цепям не приводит к увеличению их содержания на высших трофических уровнях при однократном поступлении, но это не исключает избирательное накопление изотопов при хроническом воздействии.

Выводы

По итогам проведенных исследований и подробного анализа их результатов можно сделать следующие выводы:

1. Основной вклад в формирование естественного радиационного фона массива вносят естественные радиоактивные элементы (радий, торий, калий), которые содержатся в материнских горных породах и результате геологических процессов переходят в почву.

3. Для обследованных растений коэффициент накопления цезия-137 менялся в диапазоне 0,35-1,18. Коэффициент накопления радия-226 изменялся в диапазоне 0,51-2,64. Коэффициенты накопления тория-232 колебались от 0,51 до 0,89. Коэффициент накопления калия-40 изменялся в пределах 0,15-0,63.

Коэффициент перехода цезия в органы цыплят изменялся от 0,08 в костях до 0,91 в мышцах, радия – от 0,16 в почках до 0,90 в костях, тория – от 0,30 в мышцах до 1,51 в печени, калия – от 0,12 в почках до 0,52 в мышцах.

Расчет коэффициентов накопления и перехода показал, что миграция радионуклидов возможна по пищевым цепочкам. При длительном непрерывном поступлении радионуклидов высока вероятность их аккумуляции в звеньях пищевой цепи.

Список литературы

1. Радиоактивность экосистем / О.Р. Бадрутдинов, Р.С. Тюменев, Э.А. Шурлев, М.Н. Мукминов. Казань: Казан. ун-т, 2017. 201с.

2. Бетенеков Н.Д. Радиоэкологический мониторинг: учеб. Пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 208 с.

3. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 (утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача N 47 от 07.07.2009 г., зарегистрированы в Минюсте 14.08.2009 г. N 14534);

4. МИ 2453-2015. Методики радиационного контроля. Общие требования. ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, 2015.

5. Боруцкий Б.Е. Современные представления о природе и геологической истории формирования

пород Хибинского щелочного массива (Критическое сопоставление предлагавшихся гипотез и комментарии к ним) // Уникальные геологические объекты Кольского полуострова: Хибины. Апатиты: К & М, 2010. С. 7-30.

6. Войтеховский Ю.Л. Минеральный потенциал Кольского полуострова: краткий обзор // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2012. № 3(31). С. 28-35.

7. Гулынин А.В. Миграция изотопов урана и америция-241 в цепи "почва-растение" и их накопление в организме животных: дисс. ... канд. биол. наук: 03.00.01. Москва, 2006. 117 с.

8. РД 52.18.766-2012 Руководство по радиационному обследованию компонентов природной среды на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции (с Изменением N 1).

RADIOECOLOGICAL MONITORING: PATHWAYS OF RADIONUCLIDE DISTRIBUTION AND ACCUMULATION IN THE ECOSYSTEMS OF THE Khibiny Mountain Range

Kovalev I.I., Bulgakova O.I., Larina D.D., Gurina R.R.

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

Migration of radionuclides through food chains does not lead to an increase in their content at higher trophic levels at a single intake, but this does not exclude selective accumulation of isotopes at chronic exposure. In this work the radionuclide transfer in the system soil - plant - animal organism was evaluated. The results show that there is no suppressive effect of radionuclides from soil samples on the growth of selected crops. It was also revealed that plants are characterized by interspecific differences in the accumulation of radioactive substances. At that, accumulation of radionuclides in different plant species grown on the same soil can differ more than 4 times. For the surveyed plants the coefficient of cesium-137 accumulation varied in the range of 0.35-1.18. The accumulation factor of radium-226 varied in the range of 0.51-2.64. Thorium-232 accumulation ratios ranged from 0.51 to 0.89. The accumulation factor of potassium-40 varied in the range of 0.15-0.63. The transfer coefficient of cesium into chicken organs varied from 0.08 in bones to 0.91 in muscles, radium - from 0.16 in kidneys to 0.90 in bones, thorium - from 0.30 in muscles to 1.51 in liver, potassium - from 0.12 in kidneys to 0.52 in muscles.

Keywords: *monitoring, radionuclides, accumulation, concentration*

УДК 528.952:631.95

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ НА ЗЕМЛЯХ ТУЛЬСКОГО НИИСХ

Кречетников В.В.^а, Титов И.Е., Кречетникова Е.О., Кузнецов В.К.

*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 viktor.krechetnikov@mail.ru*

Для организации земледелия на радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных землях с учетом уровней загрязнения и ландшафтных особенностей тестового хозяйства апробируется информационно-расчетный комплекс для оценки радиоэкологической ситуации. В мобильном приложении NextGIS Collector для полевых операторов создана пилотная версия рабочей среды и разработаны требования к информационному наполнению различных блоков комплекса. В программной среде NextGIS QGIS создан ГИС-проект тестового хозяйства Тульский НИИСХ, содержащий базы атрибутивных данных, а также созданные на их основе электронные карты различной тематической направленности. В проекте будут создаваться расчетно-аналитические модули на основе ранее разработанных математических моделей.

Ключевые слова: радиоактивное загрязнение, агроландшафты, радионуклиды, база атрибутивных данных, ГИС, информационно-расчетный комплекс, расчетно-аналитические модули

Для оценки радиоэкологической ситуации на сельскохозяйственных землях с различными элементами агроландшафта апробируется информационно-расчетный комплекс, позволяющий собирать, хранить, обрабатывать эмпирические данные, а также выполнять прогностические и сценарные расчеты. В качестве основы для создания такого рода комплекса была выбрана программная среда NextGIS, которая обладает всеми возможностями СУБД и мощным расчетно-аналитическим инструментарием. В программной среде NextGIS QGIS хранится вся собранная атрибутивная информация и обрабатывается посредством созданных расчетно-аналитических модулей, написанных на языке программирования Python.

Для получения информации о временных, географических, административно-хозяйственных, ландшафтно-агроэкологических и части почвенно-

геологических и радиологических показателей в ходе полевых работ определяются на месте и указываются в мобильном приложении. На данный момент создана пилотная версия рабочей среды для полевого оператора в мобильном приложении NextGIS Collector, которая позволяет автоматически определять координаты точек, время и дату обследования, а также выбирать из списков показателей те, которые характеризуют исследуемую территорию (рис. 1).

Собранные показатели в режиме онлайн передаются в облачное хранилище (рис. 2), откуда в дальнейшем экспортируются в NextGIS QGIS для добавления в атрибутивную базу данных и последующего анализа. Хранение атрибутов осуществляется в формате GeoPackage, который является базой данных, поддерживающей прямое использование в NextGIS QGIS.

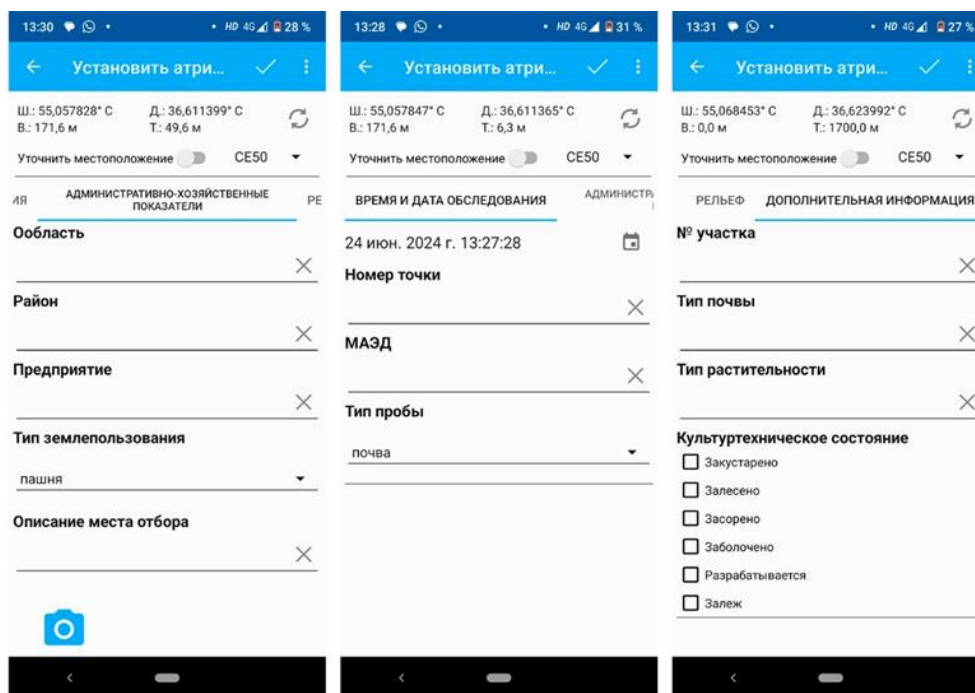


Рисунок 1. Рабочая среда журнала для полевого оператора

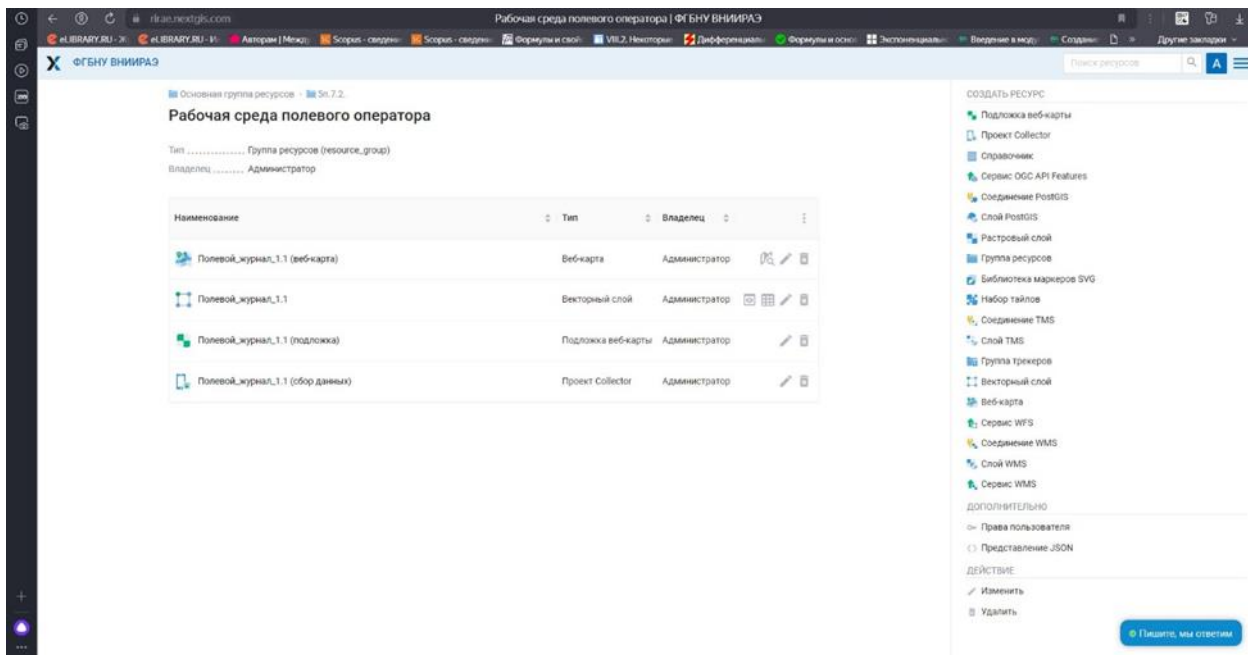


Рисунок 2. Облачное хранилище собранной полевыми операторами информации

На данный момент в информационно-расчетный комплекс добавлены атрибутивные данные и построенные на их основе векторные карты для тестового хозяйства Тульский НИИСХ [1]. Созданный комплекс содержит следующую информацию: административно-хозяйственная характеристика участков и

полей севооборотов, рельеф, почвы, радиоактивное загрязнение, агрохимические показатели (рис. 3). Вся собранная и обработанная информация добавляется в облачное хранилище для публичного просмотра (рис. 4).

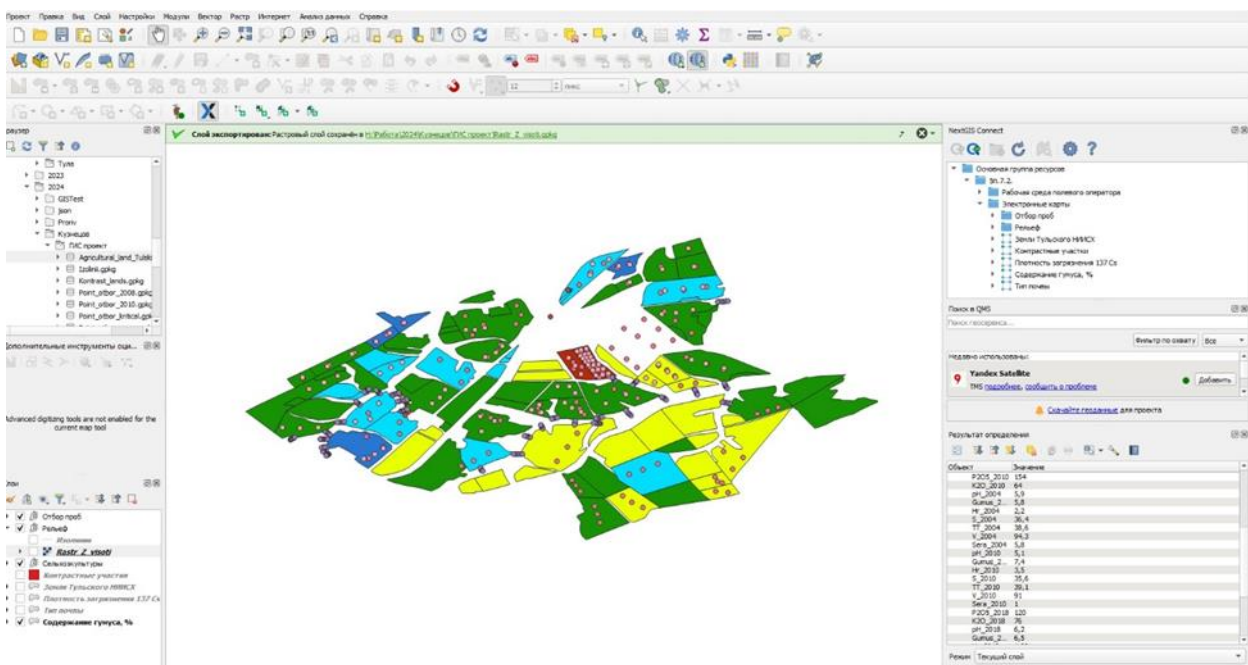


Рисунок 3. Созданные векторные карты в программной среде NextGIS QGIS

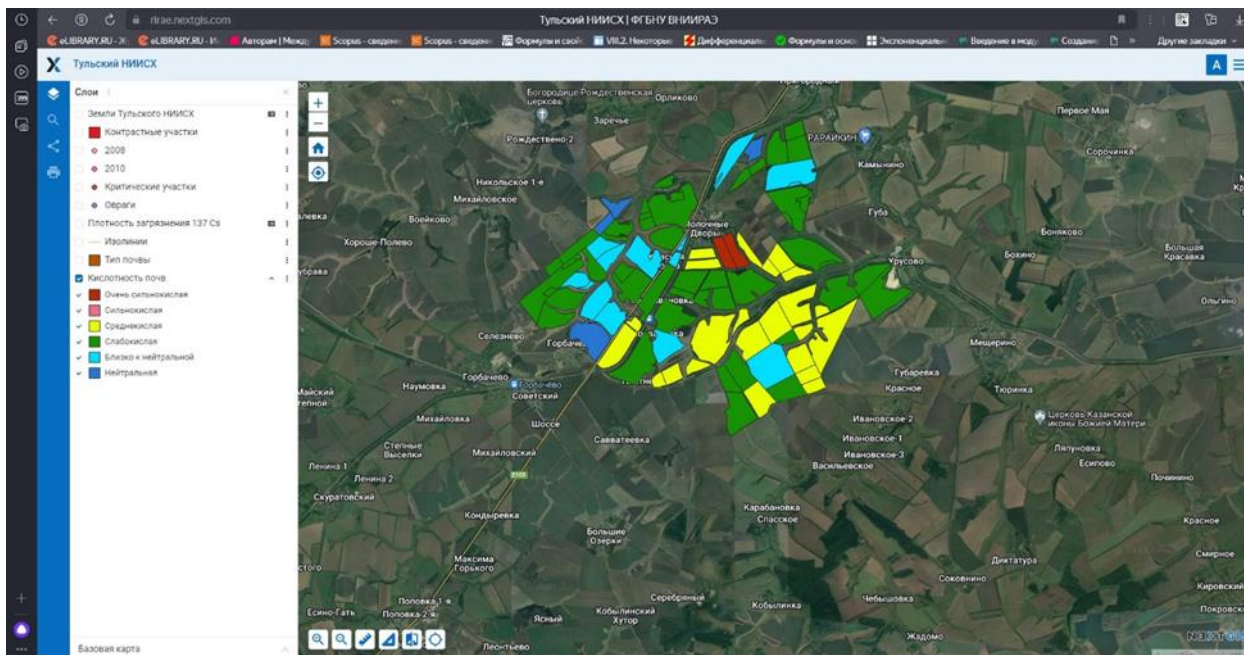


Рисунок 4. Веб представление созданных электронных карт

На следующем этапе работ планируется создать на языке Python расчетно-аналитические модули, основанные на ранее разработанных математических моделях. Они будут обрабатывать собранные показатели, выделять условно однородные участки, определять значения коэффициента KDA и осуществлять оценку рисков превышения нормативов содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства и кормопроизводства.

Представленные материалы будут использованы для практической апробации на территории тестового сельскохозяйственного предприятия и последующей разработки рекомендаций по проектированию

адресных защитных и реабилитационных мероприятий ландшафтно-экологической направленности для разных видов агроландшафтов на радиоактивно загрязненных территориях.

Список литературы

1. Эколого-агрономическая геоинформационная система радиоактивно загрязненных угодий Тульского НИИСХ / Е.О. Кречетникова, В.В. Кречетников, В.К. Кузнецов, И.Е. Титов // Геоинформатика. 2023. № 4. С. 52-60.

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND CALCULATION COMPLEX FOR ASSESSING THE RADIOECOLOGICAL SITUATION ON THE LANDS OF THE TULA RESEARCH INSTITUTE OF AGRICULTURE

Krechetnikov V.V., Titov I.E., Krechetnikova E.O., Kuznetsov V.K.

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

To organize agriculture on radioactively contaminated agricultural lands, taking into account the levels of contamination and landscape features of the test farm, an information and calculation complex for assessing the radioecological situation is tested. A pilot version of the working environment has been created in the NextGIS Collector mobile application for field operators, and requirements for the information content of various blocks of the complex have been developed. In the NextGIS QGIS software environment, a GIS project of the Tula Research Institute of Agriculture test farm was created, containing attribute data bases, as well as electronic maps of various thematic focus created on their basis. The project will create calculation and analytical modules based on previously developed mathematical models.

Keywords: *radioactive contamination, agrolandscapes, radionuclides, attribute data base, GIS, information and calculation complex, calculation and analytical modules*

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ РАДИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТЧУЖДЕННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Кречетников В.В.^а, 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: ^а viktor.krechetnikov@mail.ru

Дано описание разработки структуры и наполнения базы пространственно-временных данных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области. Дан обзор источников информации для наполнения базы, а также обоснование выбора формата хранения собранной информации. В рамках работ по наполнению базы пространственных данных было добавлено 3049 записей в 31 таблице. Часть информации представлена в таблицах без пространственной привязки. Основная часть данных, характеризующих различные свойства реальных участков, представлена в виде атрибутов ранее созданных и обновленных векторных объектов. Дальнейшее использование базы пространственно-временных данных позволяет получать актуальную, полную и достоверную информацию о состоянии отчужденных угодьях Брянской области. Собранные и организованные пространственные данные в дальнейшем будут встроены во веб-картографические сервисы.

Ключевые слова: *отчужденные территории, пространственные данные, авария на ЧАЭС, радиоактивное загрязнение, реабилитационные технологии, база данных*

Результатом аварии на Чернобыльской атомной электростанции стало изменение правового статуса больших площадей сельскохозяйственных территорий юго-западных районов Брянской области. Ряд территорий с плотностью загрязнения ¹³⁷Cs свыше 1480 кБк/м² были полностью выведены из землепользования. Не смотря на высокие плотности загрязнения часть из них используется населением. Отдельные территории используются как сенокосы и пастбища, в редком исключении под пашню. Ряд территорий заинтересованы вернуть в хозяйственное пользование различные крупные сельхозпредприятия.

Такая тенденция указывает на необходимость проведения работ по мониторингу этих территорий, а также проведения комплекса мероприятий для их дальнейшего возвращения в хозяйственный оборот. Учитывая особенности территорий, их состояние и пятнистость загрязнения наиболее целесообразно применять современные методы и средства обработки информации.

Поскольку вся собранная в ходе многолетних исследований информация является пространственно-определенной, для работы с такого рода данными необходимы специализированные программные продукты, к которым относятся геоинформационные системы. В качестве рабочей среды для выполнения поставленных задач была выбрана ГИС среда NextGIS. Эта программа обладает всем необходимым функционалом и позволяет не только обрабатывать массивы информации, но и представлять полученные результаты в веб среде для сторонних лиц.

Цель работы заключалась в разработке структуры базы пространственно-временных данных и ее информационное насыщение. Для реализации этого проекта были поставлены следующие задачи:

- выбор наиболее удобного формата хранения собранной информации для дальнейшего прямого доступа из ГИС среды;
- сбор, систематизация и анализ информации об исследуемых территориях;
- разработка структуры базы пространственно-временных данных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области и ее наполнение собранной информацией.

В качестве среды для хранения геоданных был выбран формат GeoPackage. Он является встроенным форматом в NextGIS и позволяет хранить в себе растры, векторы и даже стили и проекты NextGIS QGIS. Он представляет собой контейнер SQLite базы данных, который состоит только из одного файла с расширением .gpkg. Геометрия в нем хранится в формате WKB. Данный формат удобен для хранения данных в разных слоях ГИС проекта в одном файле. GeoPackage может содержать в себе несколько слоев, как растровых, так и векторных. Векторные данные хранятся в привычном виде: отдельный слой – отдельный тип геометрии, как в большинстве форматов.

В качестве источника информации расположения отчужденных участков выступали картосхемы сельхозпредприятий, на землях которых они расположены (рис. 1). Информация о культуротехническом состоянии оценивалась с помощью определения

значений индекса NDVI, на основании которого делался вывод о залесенности и закустаренности территорий [1]. Тип землепользования, данные о радиологической обстановке и информация о почвенных характеристиках бралась из базы данных ЭЛРЕВУЗ

[2]. Также была собрана информация о реабилитационных мероприятиях из программного продукта ReSCA и коэффициентах перехода ^{137}Cs в продукцию сельского хозяйства, полученных из справочных материалов.



Рисунок 1. Загрузка космического снимка и наложение на него схемы хозяйства «им. Кирова» Красногорского района

В базу данных внесена информация о отчужденных сельскохозяйственных угодьях 22 хозяйств юго-западных районов Брянской области. Полученные данные прикреплялись в качестве атрибутивной информации оцифрованных ранее границ отчужденных хозяйств и отдельных участков. Затем обновленные слои экспортировались в базу пространственно-временных данных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области (рис. 2). В структуру созданной базы данных были включены следующие слои: реабилитационные мероприятия, административно-хозяйственная

характеристика, границы хозяйств, КП CS, почвенная характеристика, радиологическое состояние.

Если рассмотреть структуру созданной базы данных в качестве SQL-базы, то она представлена набором системных таблиц, хранящих информацию о стиле слоев, геометрии и системных настройках, а также пользовательских таблиц, содержащих атрибутивные данные. База содержит в себе 31 таблицу, 9 из которых являются системными, 4 виртуальные таблицы с геометрией, 12 физических таблиц с геометрией и 6 пользовательских таблиц (рис. 3, табл. 1).

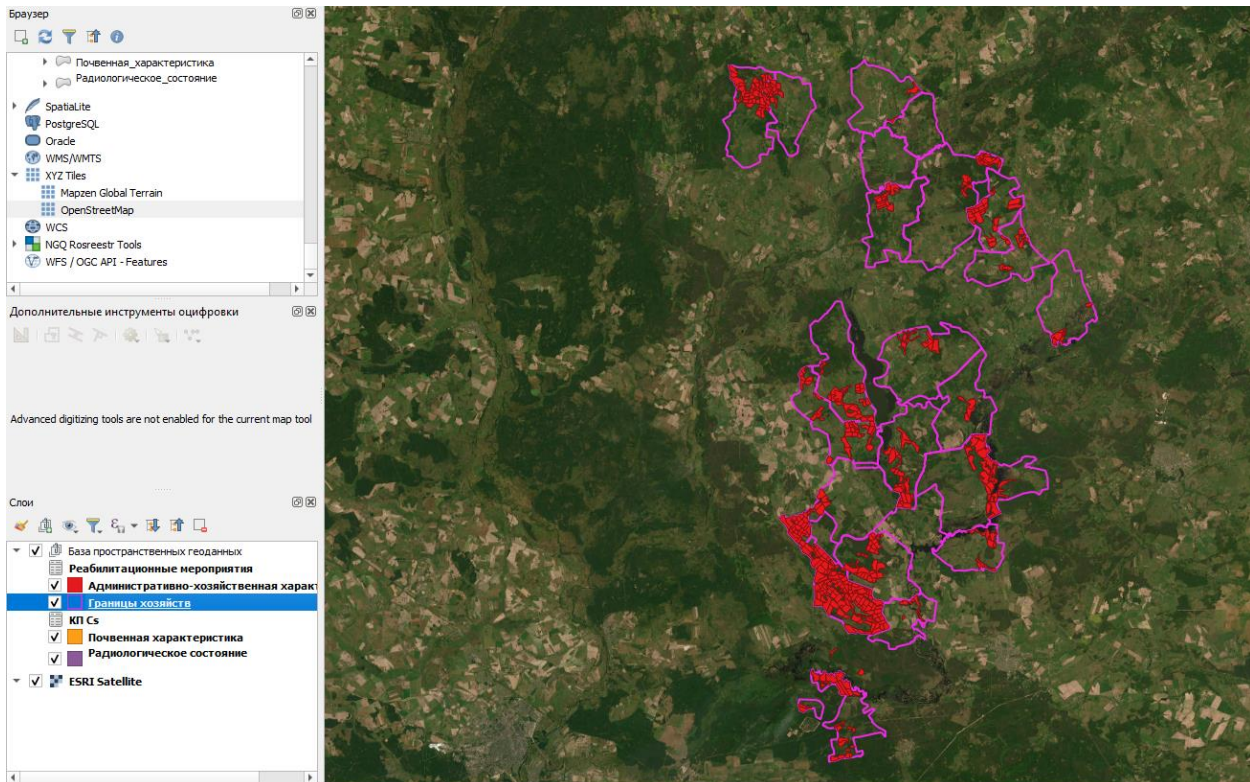


Рисунок 2. Отображение добавленных в базу данных атрибутов

id	Почва	Продукция	Клей до 1	Клей 80	Клей 140	Клей 200	Клей 300	Клей 500
1	Дерново-подзолистая супесчаная	Овес зерно	0,25	0,08	0,06	0,05	0,04	NULL
2	Дерново-подзолистая супесчаная	Озимая рожь зерно	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	NULL
3	Дерново-подзолистая супесчаная	Озимая пшеница зерно	NULL	NULL	0,03	0,02	0,01	NULL
4	Дерново-подзолистая супесчаная	Яровая пшеница зерно	NULL	NULL	0,04	0,02	0,02	NULL
5	Дерново-подзолистая супесчаная	Ячмень зерно	0,07	0,06	0,05	0,03	0,03	NULL
6	Дерново-подзолистая супесчаная	Овес солома	0,52	0,12	0,06	0,05	0,03	NULL
7	Дерново-подзолистая супесчаная	Озимая рожь солома	0,09	0,06	0,04	0,04	0,02	NULL
8	Дерново-подзолистая супесчаная	Озимая пшеница солома	NULL	NULL	0,09	0,06	0,03	NULL
9	Дерново-подзолистая супесчаная	Яровая пшеница солома	NULL	NULL	0,07	0,05	0,02	NULL
10	Дерново-подзолистая супесчаная	Ячмень солома	0,12	0,09	0,05	0,05	0,05	NULL
11	Дерново-подзолистая супесчаная	Клевер сено	0,95	0,7	0,51	0,41	0,37	NULL
12	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы сено	2,03	1,59	0,67	0,57	0,5	NULL
13	Дерново-подзолистая супесчаная	Естественные сенокосы сено	3,2	2,1	NULL	NULL	NULL	NULL
14	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы на поймах сено	3,42	2,34	1,96	1,55	1,5	NULL
15	Дерново-подзолистая супесчаная	Клевер сенаж	0,48	0,38	0,27	0,23	0,2	NULL
16	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы сенаж	1,09	0,85	0,36	0,31	0,27	NULL
17	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаково-бобовые смеси сенаж	0,63	0,48	0,33	0,25	0,23	NULL
18	Дерново-подзолистая супесчаная	Естественные сенокосы сенаж	1,59	1,07	NULL	NULL	NULL	NULL
19	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы на пойменных землях сенаж	1,71	1,2	0,95	0,83	0,8	NULL
20	Дерново-подзолистая супесчаная	Клевер силос	0,31	0,21	0,15	0,12	0,11	NULL
21	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы силос	0,6	0,47	0,2	0,17	0,15	NULL
22	Дерново-подзолистая супесчаная	Естественные сенокосы силос	0,88	0,4	NULL	NULL	NULL	NULL
23	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы на поймах силос	0,95	0,67	0,53	0,46	0,45	NULL
24	Дерново-подзолистая супесчаная	Клевер з.м.	0,21	0,15	0,11	0,09	0,08	NULL
25	Дерново-подзолистая супесчаная	Многолетние злаковые травы з.м.	0,44	0,34	0,14	0,12	0,11	NULL
26	Дерново-подзолистая супесчаная	Естественные сенокосы з.м.	0,64	0,43	NULL	NULL	NULL	NULL
27	Дерново-подзолистая супесчаная	Мл. злаковые травы на поймах з.м.	0,68	0,48	0,38	0,33	0,32	NULL
28	Дерново-подзолистая супесчаная	Картофель	NULL	0,06	0,04	0,03	0,02	NULL
29	Дерново-подзолистая супесчаная	Кормовая свекла, овощи	NULL	NULL	0,04	0,02	0,02	NULL
30	Дерново-подзолистая суглинистая	Овес зерно	0,18	0,06	0,04	0,04	0,03	NULL
31	Дерново-подзолистая суглинистая	Озимая рожь зерно	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	NULL
32	Дерново-подзолистая суглинистая	Озимая пшеница зерно	NULL	NULL	0,02	0,01	0,01	NULL
33	Дерново-подзолистая суглинистая	Яровая пшеница зерно	NULL	NULL	0,03	0,01	0,01	NULL
34	Дерново-подзолистая суглинистая	Ячмень зерно	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	NULL
35	Дерново-подзолистая суглинистая	Овес солома	0,36	0,08	0,04	0,04	0,02	NULL

Рисунок 3. Структура базы пространственно-временных данных

Список таблиц, входящих в базу данных

Наименование	Тип	Кол-во записей
gpkg_contents	Системная основная	6
gpkg_extensions	Системная основная	6
gpkg_geometry_columns	Системная основная	4
gpkg_metadata	Системная основная	5
gpkg_metadata_reference	Системная основная	5
gpkg_ogr_contents	Системная основная	6
gpkg_spatial_ref_sys	Системная основная	4
gpkg_tile_matrix	Системная основная	0
gpkg_tile_matrix_set	Системная основная	0
Reabil_meropr	Пользовательская	20
rtree_Административно-хозяйственная_характеристика_geom	Виртуальная	0
rtree_Административно-хозяйственная_характеристика_geom_node	Системная основная	16
rtree_Административно-хозяйственная_характеристика_geom_parent	Системная основная	15
rtree_Административно-хозяйственная_характеристика_geom_rowid	Системная основная	460
rtree_Границы хозяйств_geom	Виртуальная	0
rtree_Границы хозяйств_geom_node	Системная основная	1
rtree_Границы хозяйств_geom_parent	Системная основная	0
rtree_Границы хозяйств_geom_rowid	Системная основная	24
rtree_Почвенная_характеристика_geom	Виртуальная	0
rtree_Почвенная_характеристика_geom_node	Системная основная	15
rtree_Почвенная_характеристика_geom_parent	Системная основная	14
rtree_Почвенная_характеристика_geom_rowid	Системная основная	460
rtree_Радиологическое_состояние_geom	Виртуальная	0
rtree_Радиологическое_состояние_geom_node	Системная основная	15
rtree_Радиологическое_состояние_geom_parent	Системная основная	14
rtree_Радиологическое_состояние_geom_rowid	Системная основная	460
Административно-хозяйственная_характеристика	Пользовательская	460
Границы хозяйств	Пользовательская	24
КП_Cs	Пользовательская	95
Почвенная_характеристика	Пользовательская	460
Радиологическое_состояние	Пользовательская	460
Всего		3049

Созданная база пространственно-временных данных радиологического состояния отчужденных сельскохозяйственных угодий Брянской области позволяет получать актуальную, полную и достоверную информацию о состоянии отчужденных угодьях Брянской области на разные моменты времени. Собранные и организованные пространственные данные в дальнейшем будут использоваться для прогнозных расчетов. Полученные результаты будут

экспортированы в веб среду платформы NextGIS для публичного доступа.

Список литературы

1. Ничипорович З.А., Радевич Е.А. Опыт использования NDVI-индекса для мониторинга сельскохозяйственных земель Полесья по данным

спектрозональной космосъемки Ikonos // Журнал прикладной спектроскопии. 2012. Т. 79. № 4. С. 681-684.

2. Электронный реестр земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ): а.с. 2016620529, 26.04.2016 / Шубина О.А., Титов И.Е.; заявка № 2016620220 от 09.03.2016.

CREATION OF A DATABASE OF SPATIAL-TEMPORAL DATA ON THE RADIOLOGICAL STATE OF ALIENATED AGRICULTURAL LANDS IN THE BRYANSK REGION

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*

The paper describes the development of the structure and content of the spatiotemporal database of the radiological state of alienated agricultural lands in the Bryansk region. An overview of the sources of information for filling the database is given, as well as the rationale for choosing the storage format for the collected information. As part of the work on filling the spatial database, 3049 records were added to 31 tables. Some information is presented in tables without spatial reference. The main part of the data characterizing various properties of real areas is presented in the form of attributes of previously created and updated vector objects. Further use of the spatiotemporal database allows obtaining up-to-date, complete and reliable information on the state of alienated lands in the Bryansk region. The collected and organized spatial data will be further integrated into web mapping services.

Keywords: *alienated territories, spatial data, Chernobyl accident, radioactive contamination, rehabilitation technologies, database*

УДК 546.791/.795/:631.41

СОДЕРЖАНИЕ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ И ПЕРЕХОД В РАСТЕНИЯ ^{238}U И ^{232}Th НА ПАСТБИЩНЫХ УЧАСТКАХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В АЙГУРСКОЙ ПРОВИНЦИИ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Крыленкин Д.В.^а, Анисимов В.С., Анисимова Л.Н., Дикарев А.В., Мезина М.В., Саруханов А.В., Корнеев Ю.Н.

*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: ^аcornblum@mail.ru*

В данной работе представлены результаты обследования компонентов экосистем пастбищных участков расположенных в Айгурской провинции Ставропольского края неподалеку от населенных пунктов Арзгир и Серафимовское. Было исследовано содержание в почве и различной растительности тяжелых радиоактивных элементов ^{238}U и ^{232}Th . На основании этих измерений были рассчитаны коэффициенты накопления и коэффициенты перехода этих элементов. Для лучшей оценки подвижности тяжелых радионуклидов также были определены физико-химические свойства исследованных почв и их гранулометрический состав.

Ключевые слова: *уран, торий, тяжелые радионуклиды, коэффициент накопления, коэффициент перехода*

Актиноиды ^{238}U и ^{232}Th – это тяжелые естественные радионуклиды, при превышении определенных концентраций представляющие угрозу для человека

и биоты, будучи химическими и радиоактивными токсикантами [1]. Ведущим источником урана в биосфере является земная кора. Источником

загрязнения внешней среды торием, особенно сельскохозяйственных земель, является широкое применение фосфорных удобрений, где содержание Th от 1.5 до 25 Бк/кг [2]. Для определения уровня загрязнения и степени подвижности этих радионуклидов в экосистемах необходимо проводить исследование их содержания в значимых компонентах этих экосистем

Ключевые участки, выбранные для обследования, были расположены в пределах Айгурского ландшафта злаковых и полынно-злаковых степей и эрозивно-аккумулятивных равнин с долинно-балочным расчленением [3].

Первый участок – пастбище на водораздельном плато между р. Чограй и Чограйским водохранилищем (в 6 км к юго-западу от Чограйского водохранилища и в 4.5 км к северу от русла р. Чограй) в Арзгирском районе Ставропольского края. N: 45°28'43,95756"; E: 44°21'25,30764". Почва – светло-каштановая, под разреженной полынно-типчаковой

растительной ассоциацией. Почвообразующая порода – лесс желтоватой окраски, однородный, не слоистый, пылеватый, пористый. Второй участок – пастбище в 1.2 км к северо-западу от с. Серафимовское (в 26 км к юго-западу от с. Арзгир в направлении г. Благодарный). N: 45°13'31,34388"; E: 43°54'1,43388". Почва – каштановая, под полынно-типчаковой растительной ассоциацией. Почвообразующая порода – лесс желтоватой окраски однородный, не слоистый, пылеватый, пористый.

Физические и химические показатели почвы (табл. 1) определяли общепринятыми методами [4, 5].

Гранулометрический состав почв (табл. 2) определяли седиментационным методом на приборе марки SediGraph III 5120 (Particle Size Analysis System). Предварительно образец подвергался диспергированию ультразвуковым диспергатором мощностью 120 Вт в 50 мл 1 %-ном растворе пирофосфата натрия Na₄P₂O₇ в течение 10 мин.

Таблица 1

Физико-химические характеристики образцов почв

Показатель Слой почвы, см	Ключевой участок	Тип почвы	Величина показателя			
			0-5	5-10	10-15	15-20
C _{орг} , %	1	Светло-каштановая	1.94±0.06	1.18±0.12	1.01±0.13	0.76±0.15
	2	Каштановая	2.52±0.32	2.00±0.09	1.65±0.13	1.75±0.02
pH _{H2O}	1	Светло-каштановая	7.57±0.06	7.40±0.04	7.38±0.04	7.55±0.06
	2	Каштановая	7.90±0.05	7.63±0.06	7.79±0.08	8.06±0.03
pH _{KCl}	1	Светло-каштановая	6.13±0.01	6.22±0.02	6.52±0.01	6.66±0.01
	2	Каштановая	7.10±0.01	6.65±0.01	7.22±0.01	7.30±0.01
ЕКО, смоль(+)/кг	1	Светло-каштановая	20.61±0.32	22.31±0.39	20.97±0.86	21.54±0.12
	2	Каштановая	30.05±0.45	29.02±1.02	29.27±0.04	32.07±0.24
Hg, смоль(+)/кг	1	Светло-каштановая	0.88	0.53	0.35	0.26
	2	Каштановая	0.9	0.48	0.26	0.31
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	1	Светло-каштановая	337.2±11.3	240.5±2.3	209.3±6.8	197±13.5
	2	Каштановая	268.9±8.5	237.3±1.1	254.5±9.6	227.3±10.7
K ₂ O обменный, мг/кг	1	Светло-каштановая	421.7±23.2	436.2±0.9	290.3±9.5	233.3±2.9
	2	Каштановая	446.2±0.5	381.1±33	258.5±18.2	114.8±3.2
Ca обменный, смоль(+)/кг	1	Светло-каштановая	11.5±1.17	13.72±1.32	14.38±1.72	15.81±1.51
	2	Каштановая	16.93±4.49	17.60±1.80	19.49±0.01	25.8±0.64
Mg обменный, смоль(+)/кг	1	Светло-каштановая	3.45±0.08	4.2±0.17	3.83±0.13	3.76±0.28
	2	Каштановая	3.91±1.15	3.49±0.23	3.18±0.32	4.83±0.01
Na обменный, смоль(+)/кг	1	Светло-каштановая	1.25±0.14	1.01±0.05	0.9±0.08	0.85±0.12
	2	Каштановая	1.04±0.10	0.97±0.09	1.23±0.28	5.31±0.79

1 – Светло-каштановая почва – с. Арзгир, 2 – каштановая почва – с. Серафимовское.

Гранулометрический состав исследуемых почв

Слой почвы, см	Ключевой участок	Тип почвы	0-5	5-10	10-15	15-20
<1	1	Светло-каштановая	17.83±2.59	26.90±0.85	22.83±2.30	23.00±1.47
	2	Каштановая	23.03±1.16	28.33±0.96	25.43±1.71	28.93±0.58
1-5	1	Светло-каштановая	8.47±1.19	10.00±0.42	9.80±0.61	10.27±0.35
	2	Каштановая	9.67±1.27	10.77±0.42	9.87±0.75	10.57±0.59
5-10	1	Светло-каштановая	4.77±0.29	4.25±0.07	4.27±0.06	4.73±0.25
	2	Каштановая	4.87±0.58	5.87±0.15	5.07±0.21	5.70±0.26
10-50	1	Светло-каштановая	39.43±0.60	31.10±0.28	32.87±0.49	33.50±0.56
	2	Каштановая	34.63±0.51	35.23±0.55	34.07±0.45	34.07±0.86
50-250	1	Светло-каштановая	29.50±1.65	27.75±0.64	30.23±2.25	28.5±1.73
	2	Каштановая	27.80±2.51	19.80±0.44	25.57±2.35	20.73±0.40

Определение удельной активности радионуклидов в почве проводили методом γ -спектрометрии с помощью спектрометра Гамма-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35 %. Из высушенных растений (по видам) предварительно удаляли частицы пыли при помощи обработки сжатым воздухом в камере-циклон. В качестве фильтра, удерживающего частицы пыли в циклоне, использовали мешки, изготовленные из фильтрующего полотна Петрянова марки ФПП-15-1.5. После чего растения разлагались в азотной кислоте под давлением и в разбавленном растворе проводилось измерение тяжелых радионуклидов на масс-спектрометре ICP-MS 7000 SUPES FPI [6].

Удельная активность Th в почве немного увеличивалась с увеличением глубины слоя на обоих участках от 28.4±1.1 до 31.0±1.6 у Арзгира и от 31.7±0.9 до 32.9±0.7 Бк/кг у Серафимовского. Данная тенденция более заметна в увеличении величин объемной активности возрастающей от 34.8±1.4 до 47.1±2.4 и от 34.5±1.0 до 45.2±1.0 Бк/кг, соответственно, и плотности загрязнения торием, возрастающей от 1740±69 до 2357±118 и от 1726±48 до 2259±49 Бк/кг, соответственно.

Уран демонстрирует такую же тенденцию. Удельная активность растет от 41.5±4.9 до 58.0±5.7 для Арзгира и от 59.7±3.2 до 71.7±13.8 Бк/кг для Серафимовского с увеличением глубины слоя. Объемная активность растет с 51±6 до 88±9 и от 65.0±3.5 до 98.3±18.9 Бк/кг, соответственно. (табл. 3).

Таблица 3

Послойное распределение радионуклидов ^{232}Th и ^{238}U в корнеобитаемом слое каштановой и светло-каштановой почвы

Почва	Слой (глубина), см	Удельная активность, Бк/кг		Объемная активность, Бк/дм ³		Плотность загрязнения, Бк/м ²	
		^{232}Th	^{238}U	^{232}Th	^{238}U	^{232}Th	^{238}U
Светло-каштановая (ППП.1, Арзгир)	0-5	28.4±1.1	41.5±4.9	34.8±1.4	51±6	1740±69	2543±303
	5-10	31.9±0.4	54.0±2.8	41.8±0.6	71±4	2091±28	3540±185
	10-15	30.7±0.6	55.0±0.0	44.8±0.9	80±0	2239±46	4019±585
	15-20	31.0±1.6	58.0±5.7	47.1±2.4	88±9	2357±118	4410±430
Каштановая (ППП.2, Серафимовское)	0-5	31.7±0.9	59.7±3.2	34.5±1.0	65.0±3.5	1726±48	3252±175
	5-10	32.7±1.0	58.7±5.5	40.5±1.2	72.7±6.8	2025±59	3633±341
	10-15	32.0±1.3	68.7±6.8	44.4±1.8	95.1±9.4	2219±90	4757±472
	15-20	32.9±0.7	71.7±13.8	45.2±1.0	98.3±18.9	2259±49	4917±946

Содержание радионуклидов ^{232}Th и ^{238}U в различных растениях, а также коэффициенты накопления и перехода из почвы в растения

Растение (вид)	Удельная активность, Бк/кг сухой массы		КН ($n \times 10^{-1}$)		КП ($n \times 10^{-4}$), м ² /кг	
	^{232}Th	^{238}U	^{232}Th	^{238}U	^{232}Th	^{238}U
Светло-каштановая почва (ппп.1, Арзгир)						
Мятлик луковичный (<i>Poa angustifolia</i> L.)	0.48±0.34	8.3E-02 ±1.2E-02	0.017	0.0020	0.0003	3.2E-05
Полынь Лерха (Полынь белая) (<i>Artemisia lercheana</i> Web.)	1.33±0.61	1.9E-01 ±2.9E-02	0.047	0.0046	0.0008	7.6E-05
Молочай Сегиеров (<i>Euphorbia seguierana</i> Neck. (<i>E. gerardina</i> Jacq.))	0.45±0.05	5.7E-02 ±2.7E-03	0.016	0.0014	0.0003	2.3E-05
Чертополох колючий (<i>Carduus acanthoides</i> L.)	0.64±0.24	1.8E-01 ±5.4E-03	0.022	0.0044	0.0004	7.2E-05
Ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)	0.10±0.05	4.7E-02 ±2.1E-02	0.004	0.0011	6E-05	1.8E-05
Верблюжья колючка (<i>Alhagi Gagnebin</i>)	0.03±0.01	3.7E-02 ±5.5E-03	0.001	0.0009	1E-05	1.5E-05
Каштановая почва (ппп.2, Серафимовское)						
Овсяница валлиская (Типчак) (<i>Festuca valesiaca</i> Schleich. ex Gaudin)	0.05±0.01	4.8E-02 ±1.2E-02	0.001	0.0008	3E-05	1.5E-05
Полынь Лерха (Полынь белая) (<i>Artemisia lercheana</i> Web.)	0.18±0.03	9.0E-02 ±1.1E-02	0.006	0.0015	0.0001	2.8E-05
Бодяк реснитчатый – <i>Cirsium ciliatum</i> (Murray) Moench	0.16±0.02	7.1E-02 ±7.0E-03	0.005	0.0012	9E-05	2.2E-05
Ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)	0.02±0.01	3.1E-02 ±7.3E-03	0.001	0.0005	1E-05	9.6E-06

Коэффициенты накопления оказались наибольшими для Полыни Лерха как для урана, так и для тория (0.047 и 0.0046, соответственно, на почве первого участка и 0.006 и 0.0015 – на почве второго участка, соответственно). Наименьшими коэффициентами накопления характеризовались верблюжья колючка, Ковыль Лессинга и Овсяница Валийская (табл. 4).

Список литературы

1. Technical reports series #488 / F.P. Carvalho [et al.]. // The environmental behavior of uranium. IAEA: Vienna, 2023.

2. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. Сельскохозяйственная радиоэкология. М.: Экология, 1992. 400 с.

3. Современные ландшафты Ставропольского края / В.А. Шальнев [и др.]. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2002. 227 с.

4. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.

5. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.

6. Environmental Protection Agency. Method 3052. SW-846. 1996.

THE ^{238}U AND ^{232}Th CONTENT IN ECOSYSTEM COMPONENTS AND THEIR UPTAKE BY PLANTS IN PASTURE AREAS LOCATED IN THE AIGUR PROVINCE OF STEPPE LANDSCAPES IN THE STAVROPOL REGION

Krylenkin D.V., Anisimov V.S., Anisimova L.N., Dikarev A.V., Mezina M.V., Sarukhanov A.V., Korneev Yu. N.

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

This paper presents the results of a survey of ecosystem components of pasture areas located in the Aigur province of Stavropol Territory near the settlements of Arzgir and Serafimovskoye. The content of heavy radioactive elements ^{238}U and ^{232}Th in the soil and various vegetation was investigated. Based on these measurements, the accumulation coefficients and transition coefficients of these elements were calculated. To better assess the mobility of the heavy radionuclides, the physicochemical properties of the studied soils and their granulometric composition were also determined.

Keywords: uranium, thorium, heavy radionuclides, concentration ratio, concentration factor

Both ^{238}U and ^{232}Th showed slight increase in content with the increase of layer depth. Their specific activities varied from 41.5 ± 4.9 to 71.7 ± 13.8 and from 28.4 ± 1.1 to 32.9 ± 0.7 correspondingly taking in account

both sites. The concentration factors were on the order of 10^{-3} and were the highest in the *Artemisia* and the lowest in the *Alhagi*, *Stipa* and *Festuca*.

УДК 614.876:544.58:615.835.56

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ^{137}Cs В ВОЗДУШНЫХ АЭРОЗОЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНОЙ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Кудако И.С.^а, Кудако С.А., Калиниченко С.А.

Государственное природоохранное научно-исследовательское учреждение «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», 247618, г. Хойники, ул. Терешковой, д. 7, Республика Беларусь
e-mail: ^а nanaivanova247@gmail.com

В работе рассматривается изменение уровней содержания ^{137}Cs в воздушных аэрозолях при вторичном переносе в зависимости от различных видов профессионально-трудовой деятельности, осуществляемых на территории зоны отчуждения. Методология исследований основывалась на отборе проб аэрозолей и лабораторной γ -спектрометрии с оценкой объемной активности ^{137}Cs в аэрозолях воздуха на участках территории зоны отчуждения при различной экспериментально-хозяйственной деятельности, структуре поверхности напочвенного покрова. Установлено, что наиболее низкие значения объемной активности ^{137}Cs в воздушной среде характерны для производственных помещений, более высокие – для открытой местности.

Ключевые слова: радиоэкологический мониторинг, цезий-137, аэрозоли, радиоактивное загрязнение, воздухозаборное устройство

Введение

Атмосфера является мощным акцептором техногенных, в том числе и ядерно-энергетических, радиоактивных газо-аэрозольных выбросов как штатно-эксплуатационного, так и аварийного характера. Их последующее включение в потоки воздушных масс, рассеяние, медленная механическая (гравитационная) седиментация ведут к относительно равномерному (глобальному) распределению фоновых загрязнений среды. Вторичный ветровой перенос выпавших на почву радиоактивных веществ может произойти как в результате пожара, так и в результате ветрового воздействия, под влиянием естественной турбулентности атмосферы и деятельности человека, например, при проведении земляных работ, вспашке и т.п. Степень вторичного ветрового переноса радиоактивных веществ с различных поверхностей зависит от многих факторов, например, характера и возраста выпавших веществ, физических характеристик поверхности и силы ветра, способа использования

земель. Тем не менее, отдельные категории населения, так называемые критические группы или группы риска с определенной спецификой профессионально-трудовой деятельности потенциально могут подвергаться дополнительному облучению, обусловленному ингаляционным поступлением радионуклидов вследствие пребывания в условиях повышенных концентраций радиоактивных веществ во вдыхаемом воздухе [1, 2].

Материалы и методы

Для проведения исследований использовалась мобильная радиологическая лаборатория, полученная Полесским государственным радиационно-экологическим заповедником (далее – ПГРЭЗ) в рамках проекта технической помощи МАГАТЭ ВУЕ9024 на базе автомобиля Volkswagen Crafter, укомплектованная высокопроизводительным воздухозаборным устройством VOPV-12 (VF Nuclear, Czech). Методология исследований основывалась на лабораторной γ -

спектрометрии с оценкой объемной активности ^{137}Cs в аэрозолях воздуха на участках территории зоны отчуждения с различной экспериментально-хозяйственной деятельностью, структурой поверхности, напочвенного покрова, уровнем плотности загрязнения радионуклидами, характером их распределения по вертикальному почвенному профилю. Отбор проб аэрозолей осуществлялся путем прокачки воздуха через аэрозольный фильтр FPM 1515 или FPM 1530 размером 270 × 230 мм (VF Nuclear, Czech) с помощью цифрового высокообъемного воздухозаборного устройства VOPV-12 (VF Nuclear, Czech) (калибровка производителя – 2020 г.). Скорость потока воздуха колебалась от 100 до 130 м³/ч. Для уточнения скорости потока воздуха, прокаченного через фильтр, применялся анемометр Testo 410-2. Объем прокачанного воздуха (Q , м³), вычисляли по формуле 1:

$$Q = S \times V \times t \quad (1),$$

где: S – площадь поперечного сечения, м²; V – линейная скорость воздушного потока, м/с; t – время прокачивания воздуха, с.

В полевых условиях установка размещалась на высоте около 0.4 м от подстилающей поверхности

территории воздухозабора и обеспечивалась электропитанием от мобильного бензинового генератора. После окончания прокачки выполнялись измерения активности ^{137}Cs и других γ -излучающих радионуклидов в аэрозольных фильтрах на γ -спектрометре Canberra с использованием программного обеспечения Genie-2000 (набор и анализ γ -спектров). Для получения оптимальной геометрии измерения фильтр перед измерением складывался в 4 раза (16 слоёв).

Результаты и их обсуждение

Исследования были проведены в 2023 г. на территории зоны отчуждения аварии на Чернобыльской АЭС в ПГРЭЗ. Для отбора проб аэрозолей использовали котельные, шишкосушилки, участки экспериментально-хозяйственной зоны заповедника при различных этапах сельскохозяйственной деятельности, начиная от боронования, культивации, внесения удобрений и сева (апрель), заканчивая уборкой урожая (август) и осенней пахотой (сентябрь). Результаты определения объемной активности ^{137}Cs в аэрозолях воздуха рабочих зон приведены в таблице 1.

Таблица 1

Объемная активность ^{137}Cs в аэрозолях воздуха

Место фильтрации воздуха	Даты прокачки	Объем прокачанного воздуха, м ³	Суммарная объемная активность A_0 , Бк/м ³
Котельная научно-административного корпуса (НАК) (б.н.п. Бабчин)	14.03.23; 15.03.23; 17.03.23; 20.03.23	419+413+491+303	4.17×10^{-4}
Шишкосушилка	21.03.23; 22.03.23; 23.03.23	311+287+280	1.40×10^{-3}
Шишкосушилка (при замене шишек)	24.03.23	285	2.22×10^{-3}
Котельная ПуСО	11.04.23; 12.04.23	737	0.71×10^{-3}
Поле возле НАК (боронование)	10.04.23	316	1.9×10^{-4} <МДА
Поле возле фермы Воротец (внесение удобрений, культивация, сев)	20.04.23	560	17.69×10^{-3}
Поле возле КПП Бабчин (культивация, сев)	16.05.23	205	12.41×10^{-3}
Кожушки (горельник)	11.07.23	215	2.12×10^{-3}
Поле возле НАК (прессование соломы)	15.08.23	631.7	0.7×10^{-4} <МДА
Возле НАК (без сельхозопераций)	22.08.23; 23.08.23; 24.08.23	457+753+615	1.5×10^{-4}
Возле б.н.п. Масаны (сосняк)	25.08.23	400	1.08×10^{-3}
Поле возле КПП Бабчин (уборка гречихи)	11.09.23	155	2.17×10^{-3}
Поле возле КПП Бабчин за мех.двором (вспашка)	13.09.23	520	6.31×10^{-3}

Место фильтрации воздуха	Даты прокачки	Объем прокачанного воздуха, м ³	Суммарная объемная активность Ао, Бк/м ³
Поле возле КПП Бабчин левая сторона (вспашка)	19.09.23	530	3.03×10 ⁻³

Работа в котельной, также как и в сушилке, носит сезонный характер. В котельной работа ограничена отопительным сезоном, а в сушилке привязана к сезону сбора шишек и продолжается пока все собранные шишки не будут переработаны. Объемная активность ¹³⁷Cs в аэрозолях воздуха котельных определяется содержанием радионуклида в топливной древесине и в 2023 году находилась в диапазоне 0.42×10⁻³-0.71×10⁻³Бк/м³. Производственная операция по замене шишек приводит к небольшому увеличению содержания ¹³⁷Cs в аэрозолях воздуха в шишкосушилке (2.22×10⁻³Бк/м³). Наибольшие значения (3.40×10⁻³Бк/м³) объемной активности ¹³⁷Cs были получены 20 апреля (культивация, внесение удобрений, сев) и 16 мая (2.47×10⁻³Бк/м³) (культивация и сев). Остальные значения существенно ниже – от 3 до 100 раз. Два значения оказались ниже минимально детектируемой активности (МДА).

Заключение

По результатам исследований 2023 года наиболее низкие значения объемной активности ¹³⁷Cs в воздушной среде характерны для производственных помещений, более высокие – для открытой местности. В 2024 году продолжаются радиохимические

исследования аэрозольных фильтров для анализа содержания ⁹⁰Sr.

Список литературы

1. Калиниченко С.А., Калинин В.Н., Забродский В.Н. Оценка параметров ресуспензии радионуклидов при выполнении мероприятий по содержанию территории зоны отчуждения ЧАЭС // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2023. № 3. С. 21-27.
2. Черныш А.Ф., Аношко В.С. Миграция и аккумуляция радионуклидов в эродированных агроландшафтах белорусского Полесья // Вестник БГУ. 2006. № 1. С. 98-102.
3. Калиниченко С.А., Калинин В.Н., Забродский В.Н. Влияние вторичного ветрового подъема радионуклидов на формирование дозы внутреннего облучения персонала в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023: сб. статей по материалам междунауч.-практ. конф. (18-21 сентября 2023 г.) / Под ред. Д.М. Сытникова, Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук. Севастополь: СевГУ, 2023. С. 180-185.

RADIOECOLOGICAL MONITORING OF ¹³⁷Cs IN AIRBORNE AEROSOLS USING A MOBILE RADIOLOGICAL LABORATORY

Kudako I.S., Kudako S.A., Kalinichenko S.A.

State environmental research institution «Polesky State Radiation-Ecological Reserve», Tereshkova st. 7, Khoyniki, Republic of Belarus, 247618

The article considers the change in the levels of ¹³⁷Cs content in airborne aerosols during secondary transfer, depending on various types of professional labor activities carried out on the territory of the exclusion zone. The research methodology is based on the aerosol sampling and laboratory γ -spectrometry with the assessment of the volumetric activity of ¹³⁷Cs in air aerosols in areas of the exclusion zone under various experimental and economic activities, as well as the structure of the surface soil cover. It was established that the lowest values of volumetric activity of ¹³⁷Cs in the air environment are characteristic of industrial premises, while higher values are found in open areas.

Keywords: radioecological monitoring, cesium-137, airborne aerosols, radioactive contamination, air-intake device

ФИТОМОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРНЕОБИТАЕМОЙ СРЕДЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

Кулешова Т.Э.^а, Эзерина Е.М., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В., Синявина Н.Г., Панова Г.Г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14, Российская Федерация

e-mail: ^аkuleshova@agrophys.ru

В работе исследована возможность совмещения получения высоких урожаев качественной растительной продукции различного типа с выращиванием растений в биоэлектрохимических системах, генерирующих электроэнергию и позволяющих осуществлять фитомониторинг электрогенных процессов в прикорневой зоне. Средняя разность потенциалов, формируемая в корнеобитаемой среде растений, составила: для салата сорта Балет – 289 ± 27 мВ при урожайности 73.5 ± 10.3 кг/м², для редиса сорта Петербургский фиолетовый – 394 ± 50 мВ при продуктивности 68.6 ± 3.8 кг/м² и для томатов сорта Наташа – 257 ± 123 мВ при урожае 71.2 ± 9.2 кг/м².

Ключевые слова: биоэлектрогенез, прикорневая зона, электродные системы, биоэлектрохимические системы, растительно-микробный топливный элемент, *Lactuca sativa* L., *Raphanus sativus* L., *Solanum lycopersicum* L.

Растительные биоэлектрохимические системы (БЭС), также называемые растительно-микробные топливные элементы – новые альтернативные природные «зеленые» энергоресурсы, принцип работы которых заключается в получении электрической энергии за счет протекания химических реакций, сопряженных с жизнедеятельностью живых растительных организмов. На эффективность работы БЭС существенно влияет выбор растительного объекта. Значимую роль при этом играют интенсивность окислительно-восстановительных реакций, выделение ризодепозитов и формирование микробного сообщества в корнеобитаемой среде [1].

Хотя возможность практического использования биоэнергетических ресурсов уже показана во многих исследованиях [2], природу электрогенеза, включая его зависимость от генетически обусловленных физиологических особенностей растений и их состояния на протяжении развития, еще предстоит раскрыть.

Поиск биосовместимых, энергогенерирующих, высокопроизводительных компонентов БЭС, включая технические элементы, корнеобитаемые среды, растения, является сложной, но весьма актуальной задачей, решение которой позволит повысить автономность и эффективность производства растительной продукции.

Целью данной работы было исследование биоэлектрогенных процессов в корнеобитаемой среде различных типов овощных культур.

Исследование проводили с использованием представителей основных овощных культур – листовых, корнеплодных и плодовых. Фитотест-объектами служили: растения салата (*Lactuca sativa* L.) сорта Балет (коллекция ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова,

Санкт-Петербург), характеризующийся высокой урожайностью, устойчивостью к негативным факторам и длительным периодом хранения; редис (*Raphanus sativus* L.) сорта Петербургский фиолетовый (ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург) с салатным типом листа, выведенный с помощью методологии ускоренного получения трансгрессий по хозяйственно ценным признакам растений специально для интенсивной светокультуры и характеризуемый скороспелостью, компактной листовой розеткой и устойчивостью к загущенному посеву [3]; карликовый томат (*Solanum lycopersicum* L.) сорта Наташа (ФГБНУ Федеральный научный центр овощеводства, Московская область), компактный и не требующий пасынкования, предназначенный для выращивания в многоярусных узкостеллажных вегетационных установках.

Растения выращивали в контролируемых условиях интенсивной светокультуры на биополигоне ФГБНУ АФИ с регулируемыми условиями микроклимата [4]. Растения высевали сухими семенами. Плотность посева салата составляла 50 растений на м², редиса – 160 растений на м², томата – 24 растения на м². Температура воздуха поддерживалась в пределах $+20-22$ °С в световой период и $+18-20$ °С в темновой период для растений салата и редиса, $+22-24$ °С в световой период и $+18-20$ °С в темновой период для растений томата. Относительная влажность воздуха составляла 65-70 %. В качестве корнеобитаемой среды использовали торфяной грунт Агробалт С (Пиндstrup, Россия) на основе верхового торфа низкой степени разложения, содержащий не менее: N – 150 мг/л, P₂O₅ – 150 мг/л, K₂O – 250 мг/л, Mg – 30 мг/л, Ca – 120 мг/л. Питание осуществляли раствором Кнопа. Уборку и морфометрические измерения

растений салата и редиса осуществляли на 28-ой день, томата на 110-ый день от посева семян.

Измерение биоэлектродгенеза – процесса генерации разности потенциалов в корнеобитаемой среде растений в ходе их выращивания, осуществляли путем размещения исследуемых культур в биоэлектродхимических ячейках. Для этого в емкостях для выращивания различного объема – 440 см³ для листовых зеленых культур, 320 см³ для корнеплодных растений и 3000 см³ для плодовых овощных культур, размещали разработанные ранее электродные системы [5], обеспечивающие поверхностный электрический контакт с корневой системой исследуемых растений и осуществляющих автоматический фитомониторинг генерируемой в корнеобитаемой среде разности потенциалов каждые 15 минут.

Средняя разность потенциалов, формируемая в корнеобитаемой среде растений салата сорта Балет, составила 289±27 мВ, максимальное значение достигало 391 мВ. В первые 10-ть суток вегетационного периода величина напряжения была практически стационарна на уровне 271±17 мВ. С 12-ого дня в период активного формирования надземной биомассы наблюдался небольшой рост значений на 13 % до 306±25 мВ и стабилизация на уровне ~300 мВ в конце вегетационного цикла.

Для растений редиса сорта Петербургский фиолетовый величина разности потенциалов в корнеобитаемой среде составляла в среднем 394±50 мВ и максимально 532 мВ. В первые 10-ть суток это значение достигало 407±35 мВ. Затем в период интенсивного развития корнеплода с 10-ых до 20-ых суток напряжение возрастало до 424±34 мВ и к 22-ым суткам снова снижалось до 340±37 мВ.

Среднее значение разности потенциалов в корнеобитаемой среде томатов сорта Наташа составило 257±123 мВ. В ходе начального развития надземной массы и корней в течение первых 20-ти суток наблюдалась стабильная генерация напряжения на уровне 317±17 мВ. Затем на 23-ие сутки был отмечен рост до максимального показателя 454 мВ. В начале фазы цветения на 27-ые сутки наблюдалось уменьшение величины разности потенциалов до 366±23 мВ и сохранение на этом уровне в течение периода завязывания плодов. Во время налива произошло резкое уменьшение напряжения до 120±34 мВ и удержание в этом диапазоне в течение 40-ых-77-ых суток. При переходе в фазу созревания наблюдалось плавное увеличение со скоростью ~23 мВ в день. В период с 90-ых суток разность потенциалов в корнеобитаемой среде поддерживалась на уровне 340±74 мВ.

Полученная масса растения салата сорта Балет составила 113±16 г, высота достигала 31.7±2.1 см и урожайность с м² – 5.7 кг. При культивировании в БЭС редиса сорта Петербургский фиолетовый масса растения была 31±5 г, высота – 16.3±0.8 см, общая

урожайность с учетом салатного типа листа – 4.9±0.8 кг/м² и корнеплодов – 3.5±0.3 кг/м². Масса растения томата сорта Наташа достигала 591±46 г, высота – 33.0±2.4 см и урожайность плодов – 17.8±2.3 кг/м².

С учетом возможного количества сборов урожая с одного яруса за год общая производительность исследованных культур была схожая – 73.5±10.3 кг/м² в год для салата, 68.6±3.8 кг/м² в год для редиса и 71.2±9.2 кг/м² в год для томата.

Исходя из полученных данных можно отметить, что плодовые культуры имеют некоторый недостаток использования в БЭС, так как на генеративной стадии может возникать конкуренция между выработкой биоэлектричества и нарастанием биомассы плодов. В связи с этим, перспективными растениями для БЭС являются листовые и корнеплодные культуры, продукционный потенциал которых полностью реализуется на вегетативной стадии.

Показанная возможность использования биоэлектродгенеза в системе корнеобитаемая среда-растения в качестве нового зеленого источника электроэнергии имеет большой потенциал использования, в первую очередь, в сельском хозяйстве для обеспечения электропитанием маломощных устройств мониторинга состояния окружающей среды и растений, а также частичного электроснабжения устройств поддержки жизнедеятельности растений в искусственных агроэкосистемах, что особенно важно на удаленных от энергосетей территориях.

Список литературы

1. Evaluation of long-term performance of plant microbial fuel cells using agricultural plants under the controlled environment / N. Tongphanpharn, C.Y. Guan, W.S. Chen [et al.] // Clean Technologies and Environmental Policy. 2023. V. 25(2). PP. 633-644.
2. Биоэлектродхимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) / Т.Э. Кулешова, А.С. Галушко, Г.Г. Панова [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 425-440.
3. Breeding Approaches for Controlled Conditions of Artificial Light Culture for Small Radish and Radish (*Raphanus sativus* L.) / N.G. Sinyavina, A.A. Kochetov, N.V. Kocherina [et al.] // Horticulturae. 2023. V. 9: PP. 678-696.
4. Growth and development of leaf vegetable crops under conditions of the phytotechnical complex in antarctica / G.G. Panova, A.V. Teplyakov, A.B. Novak [et al.] // Agronomy. 2023. V. 13. № 12. P. 3038.
5. Растительно-микробный топливный элемент на примере салата при культивировании методом панопоники / Т.Э. Кулешова, Н.П. Галль, А.С. Галушко [и др.] // Аграрный научный журнал. 2021. № 1. С. 24-28.

PHYTOMONITORING OF ELECTROGENIC PROCESSES IN THE ROOT ENVIRONMENT OF VARIOUS TYPES OF VEGETABLE CROPS

Kuleshova T.E., Ezerina E.M., Vertebny V.E., Khomyakov Yu.V., Sinyavina N.G., Panova G.G.

Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy pr. 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220

The paper investigates the possibility of combining obtaining high yields of various types high-quality plant products with growing in bioelectrochemical systems that generate electricity and allow for phytomonitoring of electrogenic processes in the root zone. The average potential difference formed in the root environment of plants was: for lettuce of the Balet variety – 289 ± 27 mV with a yield of 73.5 ± 10.3 kg/m², for radish of the Petersburg violet variety – 394 ± 50 mV with a productivity of 68.6 ± 3.8 kg/m² and for tomatoes of the Natasha variety – 257 ± 123 mV with a yield of 71.2 ± 9.2 kg/m².

Keywords: *bioelectrogenesis, root environment, electrode systems, bioelectrochemical systems, plant-microbial fuel cell, Lactuca sativa L., Raphanus sativus L., Solanum lycopersicum L.*

Plant bioelectrochemical systems (BES), also called plant-microbial fuel cells, are new alternative natural "green" energy resources, the operating principle of which is to obtain electrical energy through chemical reactions associated with the vital activity of living plant organisms. Although the possibility of practical use of bioenergy resources has already been shown in many studies [2], the nature of electrogenesis, including its dependence on genetically determined physiological characteristics of plants and their state during development, remains to be revealed.

The aim of this work was to study bioelectrogenic processes in the root environment of various types of vegetable crops.

The study was conducted using representatives of the main vegetable crops – leafy, root and fruit.

The plants were grown under controlled conditions of intensive light culture at the biotesting ground of the AFI with controlled microclimate conditions [4]. Measurement of bioelectrogenesis, the process of generating potential differences in the root environment of plants during their cultivation, was carried out by placing the studied crops in bioelectrochemical cells.

The average potential difference formed in the root environment of lettuce variety Ballet was 289 ± 27 mV, the maximum value reached 391 mV. For small radish cultivar Petersburgskiy fioletovy, the potential difference in the root environment averaged 394 ± 50 mV and a maximum of 532 mV. The average value of the potential difference in the root environment of tomatoes variety Natasha was 257 ± 123 mV. Taking into account the possible number of harvests from one tier per year, the overall productivity of the studied crops was similar – 73.5 ± 10.3 kg/m² per year for lettuce, 68.6 ± 3.8 kg/m² per year for radish and 71.2 ± 9.2 kg/m² per year for tomato.

The demonstrated possibility of using bioelectrogenesis in the root environment-plants system as a new green source of electricity has great potential for use, first of all, in agriculture to provide power to low-power devices for monitoring the state of the environment and plants, as well as partial power supply of devices to support plant life in artificial agroecosystems, which is especially important in areas remote from power stations.

УДК 632.152

МОНИТОРИНГ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАБИЛИТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА ТЕРРИТОРИЯХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Курбаков Д.Н.^а, Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.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: ^аKurbakov007@gmail.com

Воздействие техногенных факторов на компоненты окружающей среды является одной из ключевых проблем обеспечения устойчивого развития современного общества. Особую опасность представляет загрязнение

тяжелыми металлами (ТМ), которые, накапливаясь в почвах, могут быть токсичными для растений, животных и человека. Площадь техногенного загрязнения почв в России охватывает 18 млн. га, в том числе наиболее опасными свинцом, цинком и кадмием [1]. Наиболее высокие уровни загрязнения объектов окружающей среды наблюдаются на территориях, прилегающих к предприятиям черной металлургии, которые в соответствии с международной «Конвенцией об оценке воздействия на окружающую среду в трансграничном контексте» относятся к наиболее экологически опасным производствам. На данных территориях актуальной также является проблема производства сельскохозяйственной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам. Это определяет необходимость разработки на сельскохозяйственных угодьях комплекса технологических подходов, обеспечивающих производство экологически безопасной продукции, а также оценки эффективности и оптимизации применяемых реабилитационных мероприятий (РМ).

Ключевые слова: тяжелые металлы, сельское хозяйство, почва, растительность, реабилитационные мероприятия, оптимизация

По результатам многолетнего агроэкологического мониторинга дана оценка эколого-токсикологической обстановки и состояния агроэкосистем в зонах воздействия предприятий черной металлургии. Исследования проводились в регионах размещения ПАО «НЛМК-Липецк» и ООО «НЛМК-Калуга», различающихся как почвенно-климатическими условиями, так и технологиями и объемами производства черных металлов. Объектами исследований являлись атмосферные выпадения, снежный и почвенно-растительный покров наземных экосистем, входящих в 30-километровую зону воздействия металлургических предприятий.

Атмосферные выпадения и снежный покров. По результатам исследования снежного покрова проводилась оценка загрязнения воздушного бассейна и устанавливались количественные связи между содержанием металлов в атмосферном воздухе и выпадением их на изучаемой территории.

В результате химического анализа выявлено 9 химических загрязнителей (Fe, Cr, Zn, Mn, Ni, Co, Pb, Cu, Cd), накопление которых в снежном покрове и почве обследуемых территорий районов расположения

металлургических предприятий превышает фоновые показатели. Спектр элементов характерен для производства черных металлов с изготовлением легированной стали. Лабораторные исследования показали, что основное количество ТМ содержится в форме труднорастворимых соединений, а содержание водорастворимой фракции в снежном покрове находится в низких концентрациях.

Установлено, что содержание ряда ТМ в твердом осадке снежного покрова в зоне воздействия выбросов ПАО «НЛМК» (г. Липецк) до 20 раз превышает аналогичные показатели для электрометаллургического завода ООО «НЛМК-Калуга».

Максимальные концентрации загрязнителей и пылевая нагрузка [2] на снежный покров в районе расположения ПАО «НЛМК-Липецк» проявляется в ближней зоне на расстоянии 4-6 км от источников загрязнения в юго-восточном направлении и превышает содержания ТМ по отношению к фоновым показателям до 16 раз. С увеличением расстояния от источника загрязнения выбросов до 10-12 км пылевая нагрузка переходит в среднюю и далее фиксируется ее низкая степень (рис. 1 А).

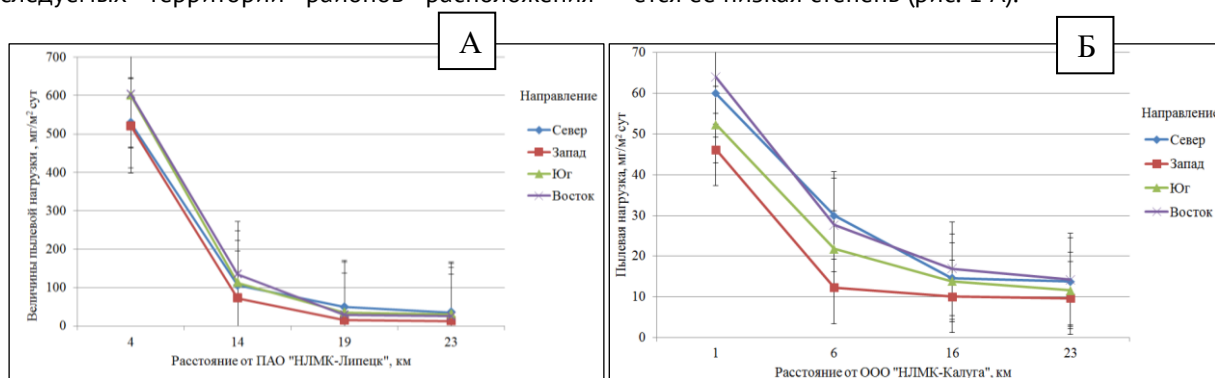


Рисунок 1. Пылевая нагрузка (Pn) на снежный покров в зависимости от расстояния и направления от «А» – ПАО «НЛМК-Липецк»; «Б» – «НЛМК-Калуга», (100-250 мг/м² – нагрузка низкая, 250-450 – средняя, 450-850 – высокая)

В районе расположения ООО «НЛМК-Калуга» максимальные концентрации ТМ и относительно высокая пылевая нагрузка на снежный покров наблюдаются в ближней зоне на расстоянии 1-3 км от источника загрязнения, содержания ТМ по отношению к фоновым были больше до 8 раз (рис. 1В).

Суммарный показатель загрязнения (Zc) и коэффициент техногенной концентрации (Kc) в зависимости от вида металла, расстояния и направления от источников загрязнения варьируют в широких пределах. Коэффициент Kc в снежном покрове указывает, что пыль и ее компоненты являются существенным

источником загрязнения снежного покрова [2]. На всех площадках отбора проб в зоне воздействия ООО «НЛМК-Калуга» Z_c снега находится в диапазоне низких значений, тогда как в зоне ПАО «НЛМК-Липецк» Z_c достигает 96.9, что соответствует средней степени загрязнения снежного покрова.

Концентрация катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) и анионов (SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Cl^-) в талых водах в ближней зоне ПАО «НЛМК» выше (до 10 раз) соответствующих значений района расположения «НЛМК-Калуга», но не превышает предельно допустимых показателей, установленных для питьевой воды [3]. В тоже время для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение в зоне воздействия ПАО «НЛМК», в ряде случаев фиксируются превышения ПДК по NO_2^- , NH_4^+ до 3 раз, Cu до 5 раз, Zn до 9 раз (Приказ Минсельхоза РФ № 552 от 2016).

Различия в степени образования поллютантов объясняется используемыми технологиями: для производства стали на ООО «НЛМК-Калуга» используется электродуговое сталеплавильные печи, на ПАО «НЛМК» – доменные печи с более высокими значениями выбросов в атмосферу. Кроме того, на ООО «НЛМК-Калуга» используется лом черных металлов, а на ПАО «НЛМК» – руда. Стоит отметить, что производственные мощности ПАО «НЛМК Липецк» (9.9 млн. т стали) примерно в 6 раз превышают проектную мощность ООО «НЛМК-Калуга» (1.6 млн. т стали). Даже с учетом этой поправки электродуговое производство стали с использованием лома черных металлов является более экологически эффективным по сравнению с производством стали с использованием доменных печей и руды в качестве сырья.

Установлено, что интенсивность загрязнения снежного покрова и почвы в зоне влияния металлургических комбинатов зависит: от используемых технологий и вида производимой продукции, объемов выбросов, погодных-климатических условий, направления и расстояния от источников загрязнения, характера подстилающей поверхности.

Почвенный покров и растительность. Обследование сельскохозяйственных угодий, находящихся в зоне возможного воздействия выбросов ООО «НЛМК-Калуга», показало, что содержание ТМ в почвах не превышает установленных ПДК. В то же время на природных участках и целинных кормовых угодьях в районе расположения ПАО «НЛМК» выявлена аккумуляция ТМ в верхних 0-2 и 2-5 см слоях почвы, что в дальнейшем может способствовать деградации почвенного плодородия и ухудшению экологических ситуаций.

Экологический мониторинг сельскохозяйственных угодий, расположенных в 30-км зоне влияния ПАО «НЛМК» Липецкой области показал, что загрязнение урожая сельскохозяйственных культур в ближней зоне воздействия происходит преимущественно аэральным путем в результате атмосферных выпадений. Наблюдаемые превышения ВМДУ по содержанию Cr в травостое составляют до 16 раз, Ni – до 13 раз, Fe – до 2 раз. Увеличение расстояния от

предприятий ПАО «НЛМК» до 30 км способствует снижению накопления Fe в растениях до 15, Cr до 8 и Ni до 23 раз.

В районе расположения электрометаллургического завода ООО «НЛМК-Калуга» превышений содержания тяжелых металлов в природной растительности и урожае сельскохозяйственных культур не обнаружено.

Установленные закономерности подтверждают необходимость проведения в районах расположения промышленных предприятий агроэкологического мониторинга, обеспечивающего объективную оценку токсико-экологической ситуации и выявления тенденций в ее изменении.

По данным литературных источников около 50 % поступления ТМ в пахотную почву связано с внесением минеральных удобрений, что определяет необходимость оценки характера их накопления и содержания в почве и сельскохозяйственной продукции при длительном применении удобрений. В лабораторных исследованиях проведен анализ коллекции из 119 проб различных видов и форм отечественных и зарубежных минеральных удобрений на содержание ТМ. На основании собственных данных и обобщения литературных источников показано, что содержание ТМ в удобрениях зависит от комплекса факторов: качества поступающего сырья, технологии его переработки, чистоты применяемых химических реагентов и т.д. При этом уровень ТМ, особенно Cd , в удобрениях из отечественного сырья значительно ниже, чем из сырья зарубежных месторождений (Китай, США, Австралии, стран западной Европы и Ближнего Востока). Анализ показал, что наиболее загрязненными ТМ являются фосфорные и сложные комплексные удобрения. В среднем в них содержится кадмия в 10 раз, а свинца почти в 20 раз больше, чем в азотных. Концентрация мышьяка в данных удобрениях вдвое больше, чем в калийных.

Интенсивное использование минеральных удобрений может приводить не только к накоплению ТМ, но и изменять формы нахождения их в почвах и биологическую подвижность.

На основе собственных полевых и лабораторных исследований, а также литературных источников создана база данных, которая включает 3809 строк записей, в том числе данные: о месте проведения опытов, источнике информации, агрохимических и гранулометрических свойствах почв, урожайности культур, коэффициентах накопления для 16 ТМ, результатах применения технологий реабилитации. Созданная база данных послужила основой для разработки компьютерной системы поддержки принятия решений по оценке эколого-экономической эффективности технологий реабилитации в хозяйствах, расположенных на территориях, загрязненных ТМ (СППР ОЭРТ-ТМ).

Разработанная база данных и компьютерная система поддержки принятия решений позволили разработать ряд рекомендаций по ведению сельского хозяйства в условиях аэрного и корневого пути

поступления ТМ в растения на территории сельскохозяйственного предприятия ООО «Россия» в случае гипотетической ситуации превышения содержания ТМ в почвах и растительности. При аэральном пути поступления ТМ на близлежащих к источнику загрязнения угодьях предлагается проведение организационных мероприятий в виде изменения сроков уборки урожая зерновых, использование пропашных и овощных культур, хозяйственно-ценная часть которых располагается в почве, размещение кормовых угодий на максимально возможном удалении от предприятий.

При поступлении ТМ в растения корневым путем рекомендуется внесение различных доз и сочетаний минеральных и органических удобрений, определяемых видом и технологическими особенностями возделывания сельскохозяйственных культур. В зависимости от вида химического загрязнителя и характера проводимых мероприятий снижение накопления ТМ, а также повышение урожайности разных сельскохозяйственных культур достигается 2 раз.

Проведенные исследования показали, что состав выбросов и поступление ТМ в почву носит ярко выраженный региональный характер и определяется в каждом конкретном случае спецификой промышленного производства, технологиями и объемами производства черных металлов, почвенно-климатическими условиями. Данные особенности имеют важное значение, которые следует учитывать при ведении

сельскохозяйственного производства, разработке и применении управленческих решений в различных регионах Российской Федерации.

Список литературы

1. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2021 году: ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2022. 131 с.

2. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве» (Утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 15 мая 1990 г., №5174-90). М.: Главное санитарно-профилактическое управление МЗ СССР. - 16 с.

3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М.: АО «Кодекс», 2021. 1004 с.

4. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 № 552. М.: АО «Кодекс», 2017. 200 с.

MONITORING AND OPTIMIZATION OF REHABILITATION MEASURES IN AGRICULTURE IN AREAS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

Kurbakov D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova E.V., Sarukhanov A.V., Dementieva N.V.

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

The impact of man-made factors on environmental components is one of the key problems of ensuring the sustainable development of modern society. Pollution with heavy metals (HM) is particularly dangerous, which, accumulating in soils, can be toxic to plants, animals and humans. The area of technogenic soil pollution in Russia covers 18 million hectares, including the most dangerous ones with lead, zinc and cadmium [1]. The highest levels of environmental pollution are observed in the territories adjacent to ferrous metallurgy enterprises, which, in accordance with the international Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context, belong to the most environmentally hazardous industries. In these territories, the problem of producing agricultural products that meet sanitary and hygienic standards is also relevant. This determines the need to develop a set of technological approaches on agricultural land that ensure the production of environmentally safe products, as well as evaluating the effectiveness and optimization of applied rehabilitation measures (RM).

Keywords: *heavy metals, agriculture, soil, vegetation, rehabilitation measures, optimization*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦАХ РАЗНЫХ ТИПОВ ПОЧВ

Маркова М.В.^{1,а}, Эдомская М.А.¹, Лукашенко С.Н.¹, Ступакова Г.А.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 научное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31а, Российская Федерация
e-mail: ^а markovamv01@mail.ru

Проведена оценка содержания естественных радионуклидов в коллекции стандартных образцов разных типов почв ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» имени Д.Н. Прянишникова. Установлено, что их средние значения содержания рассматриваемых радионуклидов в разных типах почв варьирует незначительно. Содержание рассматриваемых радионуклидов в дерново-подзолистых супесчаных почвах практически в два раза меньше, чем в глинистых дерново-подзолистых почвах.

Ключевые слова: ⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, тип почвы, гранулометрический состав почв

Введение

Распределение радионуклидов и уровень радиации в окружающей среде важны для оценки последствий радиационного воздействия. Радиоактивность окружающей среды обусловлена радионуклидами, присутствующими в различных количествах в почве, строительных материалах, воде, горных породах и атмосфере [1]. Следует отметить, что именно они вносят основной вклад в дозу облучения человека на радиоактивно незагрязненных территориях [2].

Концентрации естественных радионуклидов в почвах варьируются в широком диапазоне значений, которые зависят от факторов окружающей среды, таких как почва и горные породы, что, в свою очередь, зависит от местной геологии региона. Содержание ЕРН для территории России в среднем составляет 410 Бк/кг для калия-40, 45 Бк/кг для урана-238, 25 Бк/кг для тория-232 и 19 Бк/кг для радия-226 [4-6].

Как правило, работы по исследованию ЕРН направлены на оценку радиологической ситуации территории и не рассматривают причины выявленных концентраций. Таким образом, имеющихся данных недостаточно для полноценной оценки зависимости содержания естественных радионуклидов в разных типах почв.

Цель исследования – оценить содержание естественных радионуклидов в стандартных образцах разных типов почв.

Методика

Объектом исследования являлась научная коллекция стандартных образцов разных типов почв ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» имени

Д.Н. Прянишникова (СО). Всего было исследовано 56 образцов: 17 образцов дерново-подзолистых почв, 27 черноземных, 7 серых-лесных и 5 каштановых.

Анализ содержания радионуклидов проводили гамма-спектрометрическим методом на спектрометре с германиевыми детекторами коаксиального типа фирмы Canberra IndustriesInc.

Результаты и их обсуждение

Полученные значения удельной активности естественных радионуклидов в стандартных образцах разных типов почв представлены на рисунке 1.

Средние значения содержания калия-40, тория-232, урана-238, радия-226 и свинца-210 в дерново-подзолистых почвах составило 563 Бк/кг, 29.4 Бк/кг, 27.1 Бк/кг, 22.7 Бк/кг, 26.5 Бк/кг, соответственно. В серых лесных почвах содержание калия-40 оценивается в 553 Бк/кг, тория-232 в 33.1 Бк/кг, урана-238 в 24.9 Бк/кг, радия-226 в 24.3 Бк/кг, свинца-210 в 26.9 Бк/кг. Для черноземов среднее содержание калия-40 составляет 589 Бк/кг, тория-232 – 38.4 Бк/кг, урана-238 – 25.2 Бк/кг, радия-226 – 28.4 Бк/кг, свинца-210 – 28.0 Бк/кг. Содержание данных ЕРН в каштановых почвах оценивается в 541 Бк/кг, 35.4 Бк/кг, 22.8 Бк/кг, 26.4 Бк/кг и 24.8 Бк/кг, соответственно.

Средние значения содержания рассматриваемых радионуклидов в разных типах почв варьирует незначительно и соответствуют их содержанию в почвах, представленных в литературных данных [4-7]. При этом для тория-232 и радия-226 отмечается увеличение их содержания в ряду: дерново-подзолистые почвы < серые лесные < каштановые < черноземы.

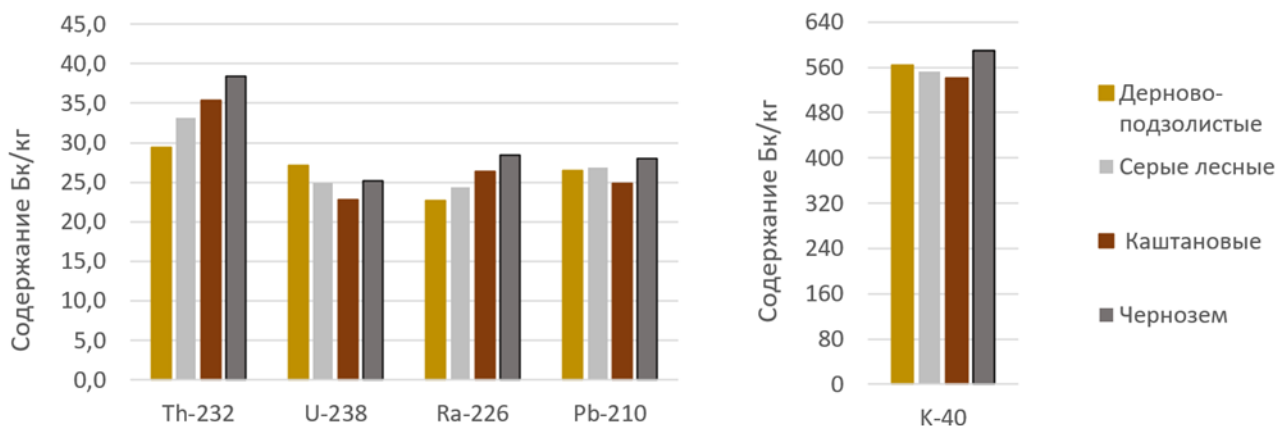


Рисунок 1. Содержание естественных радионуклидов в стандартных образцах разных типов почв

Для урана-238, свинца-210 и калия-40 достоверных отличий значений содержания в разных типах почв не наблюдается, однако заметна закономерность их наименьшей концентрации в каштановых почвах.

Полученные результаты содержания ЕРН в СО согласуются с относительно равномерным распределением радия-226, тория-232 и калия-40 по основным типам почвы сельскохозяйственных угодий России [7].

Полученные значения удельной активности естественных радионуклидов в стандартных образцах дерново-подзолистой почвы разного гранулометрического состава представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 следует, что в дерново-подзолистых супесчаных почвах среднее содержание калия-40

оценивается в 299 Бк/кг, тория-232 в 13.3 Бк/кг, урана-238 в 12.9 Бк/кг, радия-226 в 11.6 Бк/кг, свинца-210 в 17.9 Бк/кг. Что примерно в 2 раза ниже, чем в глинистых дерново-подзолистых почвах, для которых среднее содержание данных радионуклидов составляет 695 Бк/кг, 37.5 Бк/кг, 34.2 Бк/кг, 28.2 Бк/кг, соответственно.

Полученное распределение ЕРН согласуется с представленными результатами для почв сельскохозяйственных угодий России различного гранулометрического состава [7], для которых отмечается увеличение содержания радия-226, тория-232 и калия-40 от песчаных к тяжелосуглинистым почвам.

На рисунках 3 и 4 представлены значения удельной активности естественных радионуклидов в стандартных образцах черноземов.

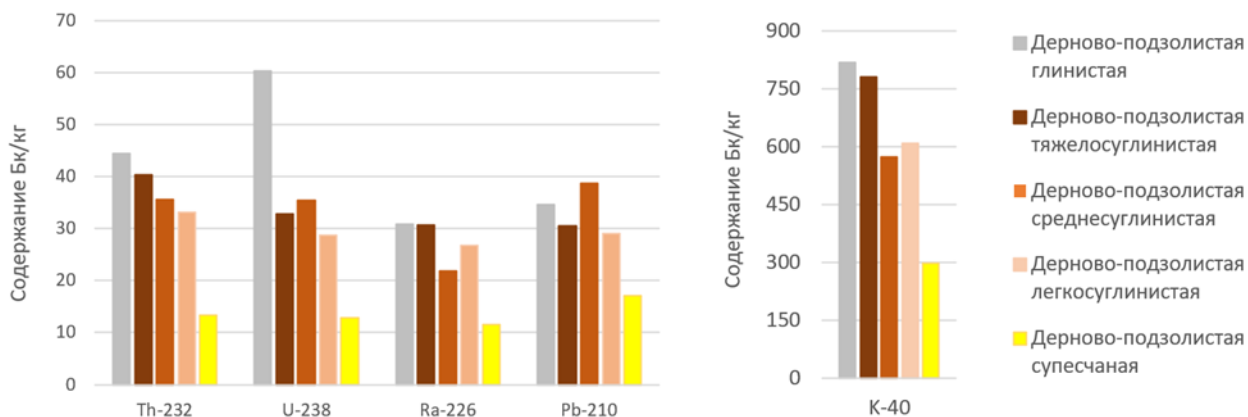


Рисунок 2. Содержание естественных радионуклидов в СО дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава

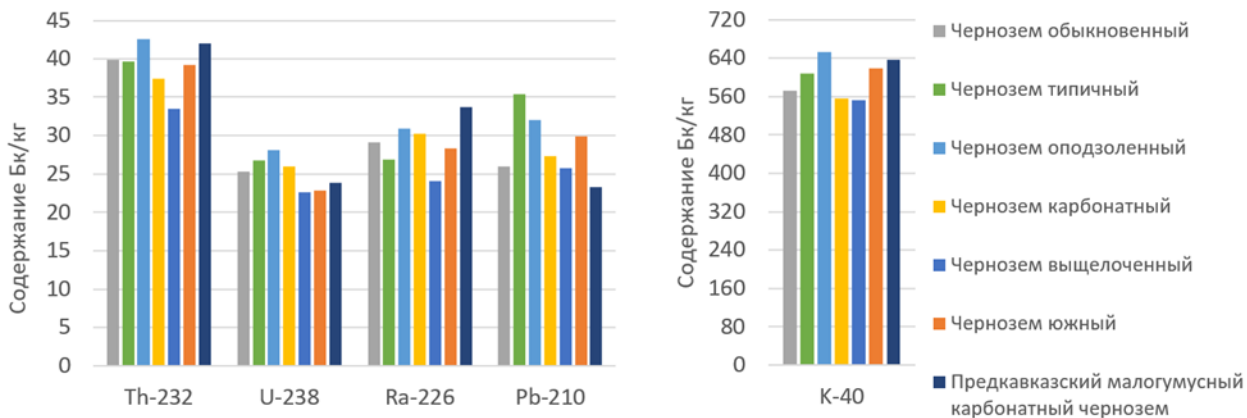


Рисунок 3. Содержание естественных радионуклидов в СО черноземов

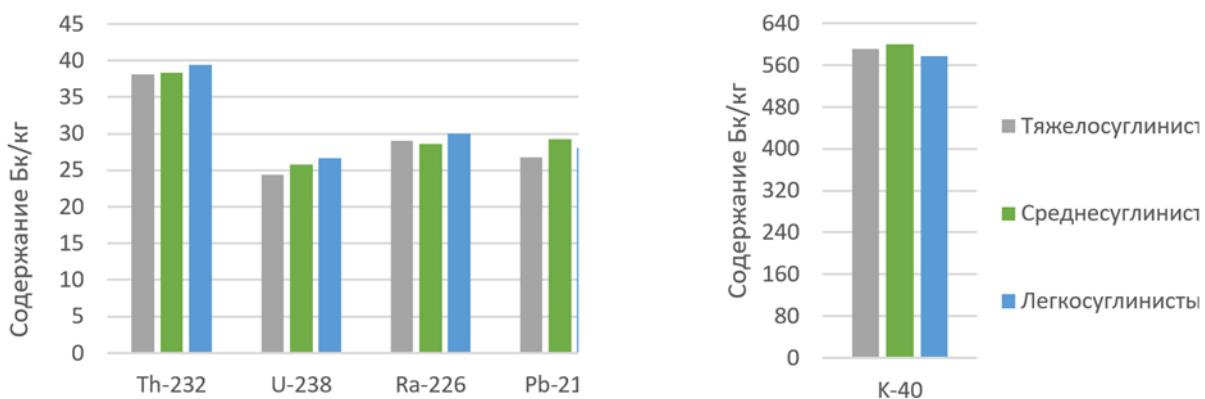


Рисунок 4. Содержание естественных радионуклидов в СО черноземах разного гранулометрического состава

Рисунок 3 свидетельствует, что наименьшее содержание рассматриваемых ЕРН наблюдается в черноземах выщелоченных. Четкой зависимости содержания естественных радионуклидов от гранулометрического состава черноземов (рис. 4) не выявлено. Стоит заметить, что все черноземы являются глинистыми почвами с разным процентом содержания глины.

Заключение

В работе проведена оценка содержания калия-40, тория-232, урана-238, радия-226 и свинца-210 в стандартных образцах разных типов почв. Показано, что средние значения содержания рассматриваемых радионуклидов в разных типах почв варьирует незначительно.

Содержание тория-232 и радия-226 имеет увеличение в ряду: дерново-подзолистые почвы < серые лесные < каштановые < черноземы. Достоверных отличий значений содержания в разных типах почв урана-238, свинца-210 и калия-40 не выявлено, однако заметна закономерность их наименьшей концентрации в каштановых почвах.

Содержание рассматриваемых радионуклидов в дерново-подзолистых супесчаных почвах

практически в два раза меньше, чем в глинистых дерново-подзолистых почвах.

Список литературы

1. Abd El-Azeem S.A., Mansour H. Determination of natural radionuclides and mineral contents in environmental soil samples // Arabian Journal for Science and Engineering. 2021. V. 46. № 1. PP. 697-704.
2. Пути формирования доз облучения современного человека в связи с его хозяйственной деятельностью / В.Ф. Дричко, Э.М. Крисюк, Т.М. Поникарова [и др.] // Радиационная гигиена. Вестник. 1997. С. 67.
3. Егорова И.А., Салтыков А.В. Естественные и искусственные радионуклиды в почвах высокогорных ландшафтов Северо-Западного Алтая // Проблемы региональной экологии. 2008. № 6. С. 63-67.
4. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно-и среднетаежных подзон Республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824-829.
5. Перевошиков Р.Д. Естественные радионуклиды (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) в депонирующих средах (территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей) // Известия Томского политехнического

университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 3. С. 29-38.

6. Естественные и искусственные радионуклиды в растительных объектах Ростовской области / С.Р. Аветисян [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1. С. 533-533.

7. Орлов П.М., Сычев В.Г., Аканова Н.И. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты // Международный сельскохозяйственный журнал. 2020. № 4. С. 62-67.

NATURAL RADIONUCLIDES IN REFERENCE SAMPLES OF DIFFERENT SOIL TYPES

Markova M.V.¹, Edomsкая M.A.¹, Lukashenko S.N.¹, Stupakova G.A.²

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

²Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Pryanishnikova st. 31a, Moscow, Russian Federation, 127434

The content of natural radionuclides in the collection of standard samples of different types of soils of the Pryanishnikov Institute of Agrochemistry was assessed. It has been established that average contents of the radionuclides under consideration in different types of soils vary slightly. The content of the radionuclides under consideration in sod-podzolic sandy loam soils is almost two times less than in clayey soddy-podzolic soils.

Keywords: ⁴⁰K, ²³²Th, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb, soil type, soil texture

The work assessed the content of potassium-40, thorium-232, uranium-238, radium-226 and lead-210 in standard samples of different types of soils. It is shown that the average values of the content of the considered radionuclides in different soil types vary insignificantly.

The content of thorium-232 and radium-226 increases in the series: sod-podzolic soils < gray forest

soils < chestnut soils < chernozems. No reliable differences in the content of uranium-238, lead-210 and potassium-40 in different soil types were found, however, a pattern of their lowest concentration in chestnut soils is noticeable.

The content of the considered radionuclides in sod-podzolic sandy loam soils is almost two times less than in clay sod-podzolic soils.

УДК 546.32/36:631.41

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ¹³⁷Cs и ⁴⁰K В БИОГЕОЦЕНОЗАХ ПАСТБИЩНЫХ УЧАСТКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В АЙГУРСКОЙ ПРОВИНЦИИ СТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Мезина М.В.^а, Анисимов В.С., Фесенко С.В., Анисимова Л.Н., Крыленкин Д.В., Дикарев А.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: ^аshishulina2005@yandex.ru

Определены основные физико-химические свойства и содержание ¹³⁷Cs и ⁴⁰K в почвах и растительности двух ключевых участков, расположенных в Айгурской провинции степных ландшафтов Ставропольского края. Изучение полойного распределения радионуклидов показало, что удельная активность ¹³⁷Cs в почве первого участка составила 3.9-6.03 Бк/кг при относительно равномерном распределении радионуклида по глубине корнеобитаемого слоя почвы. На втором участке наблюдалось резкое снижение содержания ¹³⁷Cs с глубиной (от 22.77 Бк/кг до 0.81 Бк/кг). Удельная активность ⁴⁰K в почвах обоих участков была приблизительно одинаковой и составила в среднем

563 Бк/кг, при этом содержание радионуклида не менялась с глубиной. Накопление ^{137}Cs степной растительностью было незначительным, а биофильный ^{40}K аккумуляровался в биомассе.

Ключевые слова: радионуклиды ^{137}Cs и ^{40}K , почвы степей, послойное распределение радионуклидов, накопление радионуклидов растительностью

Изучение биологической подвижности радионуклидов в почвенно-растительном покрове аридных зон представляет большой интерес для современной радиоэкологии. ^{137}Cs – искусственный, долгоживущий изотоп, основной дозообразующий радионуклид, поступивший в окружающую среду в результате глобальных и чернобыльских выпадений. Элемент-аналог цезия – калий является биогенным металлом и его радиоактивный изотоп ^{40}K может служить надежным базовым маркером биогеохимических процессов транслокации элементов в окружающей среде.

Цель работы – оценка биологической подвижности ^{137}Cs и ^{40}K в биогеоценозах пастбищ, расположенных в Айгурской провинции степных ландшафтов Ставропольского края.

Основными показателями биологической подвижности радионуклидов являются: коэффициент накопления (КН), равный отношению удельной активности радионуклида в сухой вегетативной массе (Бк/кг) к его удельной активности в почве (Бк/кг); и коэффициент перехода (КП), представляющий собой отношение удельной активности радионуклида в сухой вегетативной массе (Бк/кг) к поверхностной плотности загрязнения участка радионуклидом (Бк/м²).

Ключевые участки, где проводили исследования, были расположены в пределах Айгурского ландшафта злаковых и полынно-злаковых степей и эрозивно-аккумулятивных равнин с долинно-балочным расчленением [1]:

Участок № 1 – пастбище на водораздельном плато между р. Чограй и Чограйским водохранилищем в Арзгирском районе Ставропольского края. Почва – светло-каштановая, под разреженной полынно-типчакковой растительной ассоциацией.

Участок № 2 – пастбище в 1.2 км к северо-западу от с. Серафимовское. Почва – каштановая, под полынно-типчакковой растительной ассоциацией.

Отбор образцов почвы по слоям 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 см проводили с помощью радиологического кольцевого пробоотборника (D=14 см, H=5 см) Послойный отбор проб почвы вели методом квадрата в пяти точках (по углам и в центре пробной площадки 10×10 м²), одновременно с отбором сопряженных проб растений. Ввиду малой плотности растительного покрова отбор проб растений по видам осуществлялся со всей площади пробной площадки.

Определение удельной активности радионуклидов в почве и растительности проводили методом

гамма-спектрометрии с помощью спектрометра Гамма-1П с полупроводниковым детектором из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 35 %. Из высушенных растений (по видам) предварительно удаляли частицы пыли при помощи обработки сжатым воздухом в камере-циклон. Физические и химические показатели почвы определяли общепринятыми методами [2, 3].

Результаты анализа химических свойств исследуемой почвы по слоям 0-5, 5-10, 10-15 и 15-20 см представлены в таблице 1. Содержание органического вещества снижается с глубиной с 1.94 до 0.76 % для почвы первого ключевого участка, и соответственно с 2.52 до 1.65 % – для почвы второго ключевого участка. Обе исследуемые почвы обладают низким содержанием гумуса (согласно классификации Орлова, Гришиной [4]). По степени кислотности обе почвы можно отнести к нейтральным. Так, для почвы первого участка pH_{KCl} варьировал в пределах 6.13-6.66, для почвы второго участка – от 6.65 до 7.10. Показатель емкости катионного обмена существенно не изменялся с глубиной и составил в среднем 21.4 смоль(+)/кг для светло-каштановой почвы и 30.1 смоль(+)/кг для каштановой. Содержание подвижного фосфора в исследуемых почвах снижается с глубиной. Так, для почвы первого участка данный показатель изменяется от 337.2 до 197 мг/кг, для почвы второго – от 268.9 до 227.3 мг/кг. Максимальное содержание обменного калия (446.2 мг/кг) отмечалось для слоя 0-5 см, а минимальное (114.8 мг/кг) – для слоя 15-20 см каштановой почвы. В целом, обе исследуемые почвы характеризуются очень высокой обеспеченностью фосфором и калием.

По гранулометрическому составу светло-каштановая почва ключевого участка 1 по классификации Качинского может быть отнесена к разновидности: средний суглинок крупно-пылеватый мелкопесчаный. Каштановая почва ключевого участка 2 являлась среднесуглинистой крупно-пылеватой-иловатой.

Результаты наших исследований в виде данных по удельной и объемной активности ^{137}Cs и ^{40}K в почвах по слоям на глубину корнеобитаемого слоя, а также плотности загрязнения почв исследуемыми радионуклидами приведены в таблице 2. Удельная активность ^{137}Cs в почве участка 1 составила 3.9-6.03 Бк/кг при относительно равномерном распределении радионуклида по глубине корнеобитаемого слоя почвы.

Таблица 1

Химические характеристики образцов исследованных почв, отобранных послойно из корнеобитаемого слоя (0-20 см) на ключевых участках 1 и 2, среднее \pm стандартное отклонение, $n = 3$

Показатель Слой почвы, см	Ключевой участок	Величина показателя			
		0-5	5-10	10-15	15-20
C _{орг} , %	1	1.94 \pm 0.06	1.18 \pm 0.12	1.01 \pm 0.13	0.76 \pm 0.15
	2	2.52 \pm 0.32	2.00 \pm 0.09	1.65 \pm 0.13	1.75 \pm 0.02
pH _{H2O}	1	7.57 \pm 0.06	7.40 \pm 0.04	7.38 \pm 0.04	7.55 \pm 0.06
	2	7.90 \pm 0.05	7.63 \pm 0.06	7.79 \pm 0.08	8.06 \pm 0.03
pH _{KCl}	1	6.13 \pm 0.01	6.22 \pm 0.02	6.52 \pm 0.01	6.66 \pm 0.01
	2	7.10 \pm 0.01	6.65 \pm 0.01	7.22 \pm 0.01	7.30 \pm 0.01
ЕКО, смоль(+)/кг	1	20.61 \pm 0.32	22.31 \pm 0.39	20.97 \pm 0.86	21.54 \pm 0.12
	2	30.05 \pm 0.45	29.02 \pm 1.02	29.27 \pm 0.04	32.07 \pm 0.24
Нг, смоль(+)/кг	1	0.88	0.53	0.35	0.26
	2	0.9	0.48	0.26	0.31
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	1	337.2 \pm 11.3	240.5 \pm 2.3	209.3 \pm 6.8	197 \pm 13.5
	2	268.9 \pm 8.5	237.3 \pm 1.1	254.5 \pm 9.6	227.3 \pm 10.7
K ₂ O обменный, мг/кг	1	421.7 \pm 23.2	436.2 \pm 0.9	290.3 \pm 9.5	233.3 \pm 2.9
	2	446.2 \pm 0.5	381.1 \pm 33	258.5 \pm 18.2	114.8 \pm 3.2
Ca обменный, смоль(+)/кг	1	11.5 \pm 1.17	13.72 \pm 1.32	14.38 \pm 1.72	15.81 \pm 1.51
	2	16.93 \pm 4.49	17.60 \pm 1.80	19.49 \pm 0.01	25.8 \pm 0.64
Mg обменный, смоль(+)/кг	1	3.45 \pm 0.08	4.2 \pm 0.17	3.83 \pm 0.13	3.76 \pm 0.28
	2	3.91 \pm 1.15	3.49 \pm 0.23	3.18 \pm 0.32	4.83 \pm 0.01
Na обменный, смоль(+)/кг	1	1.25 \pm 0.14	1.01 \pm 0.05	0.9 \pm 0.08	0.85 \pm 0.12
	2	1.04 \pm 0.10	0.97 \pm 0.09	1.23 \pm 0.28	5.31 \pm 0.79

1 – Светло-каштановая почва – с. Арзгир, 2 – каштановая почва – с. Серафимовское

На участке 2 наблюдалось резкое снижение содержания ¹³⁷Cs с глубиной. Удельная активность радиоцезия варьировала от 0.81 Бк/кг в слое 15-20 см до 22.77 Бк/кг в слое 0-5 см. Подобные различия могут быть обусловлены роющей деятельностью животных в почве первого участка.

Удельная активность ⁴⁰K в почвах обоих участков была приблизительно одинаковой и составила в среднем 563 Бк/кг, при этом содержание радионуклида не менялась с глубиной. Плотность

загрязнения почв соответствовала глобальному фоновому уровню [5].

Накопление ¹³⁷Cs степной растительностью было незначительным, так содержание радионуклида в сухой массе варьировало от 0.12 до 1.08 Бк/кг в зависимости от вида растения. А коэффициент накопления ¹³⁷Cs КН ¹³⁷Cs = [¹³⁷Cs(раст.)] / [¹³⁷Cs(почва)] < 0.3.

Калий является биофильным элементом. Его удельная активность в растениях изменялась от 132 Бк/кг до 817 Бк/кг в зависимости от вида. При этом КН = [⁴⁰K (раст.)] / [⁴⁰K (почва)] ~ 1

Таблица 2

Послойное распределение радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁴⁰K в корнеобитаемом слое каштановой и светло-каштановой почвы на ключевых участках 1 и 2, среднее \pm стандартное отклонение, $n = 3$

Почва	Слой (глубина), см	Удельная активность, Бк/кг		Объемная активность, Бк/дм ³		Плотность загрязнения, кБк/м ²	
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
Светло-каштановая (ППП.1)	0-5	4.97 \pm 0.23	548 \pm 12	6.09 \pm 0.36	642 \pm 7	0.30 \pm 0.02	33.6 \pm 0.3
	5-10	6.03 \pm 0.75	590 \pm 19	7.93 \pm 1.24	773 \pm 1.24	0.40 \pm 0.06	38.6 \pm 0.7
	10-15	4.17 \pm 0.51	566 \pm 10	6.09 \pm 0.81	827 \pm 14	0.31 \pm 0.04	41.4 \pm 0.7
	15-20	3.90 \pm 0.40	575 \pm 18	5.95 \pm 0.96	873 \pm 32	0.30 \pm 0.05	43.7 \pm 1.6
Каштановая (ППП.2)	0-5	22.77 \pm 1.12	556 \pm 24	24.77 \pm 2.01	605 \pm 49	1.24 \pm 0.10	30.2 \pm 2.5
	5-10	14.47 \pm 2.51	569 \pm 9	17.89 \pm 2.89	705 \pm 19	0.89 \pm 0.14	35.3 \pm 0.9
	10-15	1.60 \pm 0.69	549 \pm 41	2.22 \pm 0.93	761 \pm 49	0.11 \pm 0.05	38.0 \pm 2.4
	15-20	0.81 \pm 0.16	552 \pm 25	1.11 \pm 0.22	757 \pm 33	0.06 \pm 0.01	37.8 \pm 1.6

Удельная активность и коэффициенты накопления, перехода радионуклидов ^{137}Cs , ^{40}K в различные виды естественно-луговой растительности, отобранные ключевых участках 1 и 2, среднее \pm стандартное отклонение, $n = 3$

Растение (вид)	Удельная активность, Бк/кг сухой массы		КН ($n \times 10^{-1}$)		КП ($n \times 10^{-4}$), м ² /кг	
	^{137}Cs	^{40}K	^{137}Cs	^{40}K	^{137}Cs	^{40}K
Светло-каштановая почва (участок 1)						
Мяталик луковичный (<i>Poa angustifolia</i> L.)	1.02 \pm 0.45	519 \pm 26	2.13 \pm 1.03	9.11 \pm 0.67	7.79 \pm 3.46	33.0 \pm 1.7
Полынь Лерха (Полынь белая) (<i>Artemisia lerecheana</i> Web.)	0.98 \pm 0.28	532 \pm 14	2.06 \pm 0.71	9.34 \pm 0.56	5.29 \pm 0.56	33.8 \pm 1.0
Молочай Сегиеров (<i>Euphorbia seguierana</i> Neck. (<i>E. gerardina</i> Jacq.))	0.39 \pm 0.08	354 \pm 5	0.82 \pm 0.24	6.21 \pm 0.34	3.45 \pm 0.19	22.5 \pm 0.4
Чертополох колючий (<i>Carduus acanthoides</i> L.)	1.02 \pm 0.37	817 \pm 10	2,13 \pm 0.90	14.3 \pm 0.79	5.75 \pm 0.70	52.0 \pm 0.9
Ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)	0.87 \pm 0.28	438 \pm 21	1.81 \pm 0.68	7.69 \pm 0.55	8.13 \pm 0.53	27.9 \pm 1.4
Верблюжья колючка (<i>Alhagi Gagnebin</i>)	0.70 \pm 0.53	720 \pm 25	1.47 \pm 1.15	12.6 \pm 0.81	5.37 \pm 0.89	45.8 \pm 1.7
Каштановая почва (участок 2)						
Овсяница валлиская (Типчак) (<i>Festuca valesiaca</i> Schleich. ex Gaudin)	1.08 \pm 0.49	132 \pm 10	-	2.37 \pm 0.29	4.70 \pm 0.26	9.34 \pm 0.75
Полынь Лерха (Полынь белая) (<i>Artemisia lerecheana</i> Web.)	0.27 \pm 0.06	548 \pm 18	-	9.85 \pm 1.01	1.17 \pm 0.04	38.8 \pm 1.7
Чертополох колючий (<i>Carduus acanthoides</i> L.)	1.34 \pm 0.22	706 \pm 10	-	12.7 \pm 1.25	5.83 \pm 0.20	49.9 \pm 1.6
Ковыль Лессинга (<i>Stipa lessingiana</i> Trin. & Rupr.)	0.12 \pm 0.48	532 \pm 10	-	9.56 \pm 0.95	0.52 \pm 0.21	37.6 \pm 1.3

Список литературы

1. Современные ландшафты Ставропольского края / В.А. Шальнев, П.А. Диденко, Л.Н. Петрова [и др.]. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2002. 227 с.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.

4. Практикум по химии гумуса / Д.С. Орлов, Л.А. Гришина. М.: Изд-во МГУ, 1981. 271 с.

5. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / Под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. М.-Минск: Фонд «Инфосфера» НИИ-Природа, 2009. 140 с.

BIOLOGICAL MOBILITY OF ^{137}Cs AND ^{40}K IN BIOGEOCENOSSES OF PASTURE AREAS LOCATED IN THE AIGUR PROVINCE OF STEPPE LANDSCAPES OF STAVROPOL TERRITORY

Mezina M.V., Anisimov V.S., Fesenko S.V., Anisimova L.N., Krylenkin D.V., Dikarev A.V.

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

The main physico-chemical properties and the content of ^{137}Cs and ^{40}K in the soils and vegetation of two key sites located in the Aigur province of the steppe landscapes of the Stavropol Territory have been determined. The study of the layered distribution of radionuclides showed that the activity of ^{137}Cs in the soil of the first site was 3.9-6.03 Bq/kg with a relatively uniform distribution of radionuclide over the depth of the root layer of the soil. In the second site, a sharp decrease in

the content of ^{137}Cs with depth was observed (from 22.77 Bq/kg to 0.81 Bq/kg). The activity of ^{40}K in the soils of both sites was approximately the same and averaged 563 Bq/kg, while the radionuclide content did not change with depth. The accumulation of ^{137}Cs by steppe vegetation was insignificant, and the biophilic ^{40}K accumulated in the biomass.

Keywords: radionuclides ^{137}Cs and ^{40}K , steppe soils, layered distribution of radionuclides, accumulation of radionuclides by vegetation

^{137}Cs is an artificial, long-lived isotope, the main dose-forming radionuclide released into the environment as a result of global and Chernobyl fallout. The analog element caesium – potassium is a biogenic metal and its radioactive isotope ^{40}K can serve as a reliable basic marker of biogeochemical processes of translocation of elements in the environment.

The aim of the work is to assess the biological mobility of ^{137}Cs and ^{40}K in biogeocenoses of pastures located in the Aigur province of steppe landscapes of the Stavropol Territory.

Plot No. 1 is a pasture on the watershed plateau between the Chograi river and the Chograi reservoir in the Arzgirsky district of the Stavropol Territory. The soil is light chestnut, under a sparse wormwood-type plant association. Organic matter content=1.22 %; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}=7.48$; $\text{CEC}=21.36 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$.

Plot No. 2 is a pasture 1.2 km northwest of the village of Serafimovskoye. The soil is chestnut, under a wormwood-type plant association. Organic matter content=1.98 %; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}=7.85$; $\text{CEC}=32.6 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$.

The specific activity of radionuclides in soil and vegetation was determined by gamma spectrometry using a Gamma-1P spectrometer with a semiconductor detector made of especially pure germanium with a

relative registration efficiency of 35 %. Dust particles were previously removed from dried plants (by species) by treatment with compressed air in a cyclone chamber. The physical and chemical parameters of the soil were determined by conventional methods.

In the soil of site 1 the specific activity of ^{137}Cs was 3.9-6.03 Bq/kg with a relatively uniform distribution of radionuclide over depth. A sharp decrease in the content of ^{137}Cs with depth was observed at site 2. The specific activity of radiocesium ranged from 0.81 Bq/kg in a 15-20 cm layer to 22.77 Bq/kg in a 0-5 cm layer.

The specific activity of ^{40}K in the soils of both sites was approximately the same and averaged 563 Bq/kg, while the radionuclide content did not change with depth. The density of soil pollution corresponded to the global background level.

The accumulation of ^{137}Cs by steppe vegetation was insignificant, since the radionuclide content in the dry mass varied from 0.12 to 1.08 Bq/kg, depending on the type of plant. And the concentration ratio of ^{137}Cs $\text{CR}^{137}\text{Cs} = [^{137}\text{Cs}(\text{plant})] / [^{137}\text{Cs}(\text{soil})] < 0.3$. Potassium is a biophilic element. Its specific activity in plants varied from 132 Bq/kg to 817 Bq/kg, depending on the species. At the same time: $\text{CR}^{40}\text{K} = [^{40}\text{K}(\text{plant})] / [^{40}\text{K}(\text{soil})] \sim 1$.

УДК: 621.039.5:574

ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА НАСЕЛЕНИЕ ОТ ВЫБРОСОВ КУРСКОЙ АЭС С УЧЕТОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Микаилова Р.А.а, Спиридонов С.И., Нуштаева В.Э.

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 mik_r_a@rirae.ru

Данная работе посвящена оценке дозовых нагрузок на население, проживающее вблизи Курской АЭС, с учетом региональных особенностей и усовершенствованных моделей для трития и углерода-14. Исследование показало, что годовая доза облучения населения не превышает 50 % от предельно допустимой дозы, установленной для АЭС. Использование региональных параметров, таких как доля местных продуктов питания, позволило уточнить оценку внутренних путей облучения, особенно для детей. Сравнение равновесных и неравновесных моделей показало, что последние предоставляют более точные результаты для оценки накопления трития и углерода-14. Основными источниками дозовой нагрузки являются радионуклиды ^{131}I и ^{14}C , при этом их влияние варьируется в зависимости от возрастной группы.

Ключевые слова: Курская АЭС, радиационная безопасность, дозовые нагрузки, тритий (^3H), углерод-14 (^{14}C), региональные параметры, равновесные и неравновесные модели, радиоактивные выбросы, население

Экологическая безопасность объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) является важнейшим элементом стратегического планирования в атомной отрасли. Объекты ЯТЦ оказывают многофакторное воздействие на окружающую среду, однако наибольшее внимание уделяется радиационным рискам, характерным для ядерной энергетики. Оценка радиационного воздействия атомных электростанций (АЭС) как на здоровье населения, так и на биосферу – ключевая задача при обосновании радиоэкологической безопасности этих объектов. В контексте увеличения мощностей АЭС и повышения требований к экологической безопасности, значимость оценки дозовых нагрузок на население возрастает.

Курская АЭС, являясь одним из крупнейших объектов атомной энергетики в России, генерирует радиоактивные выбросы в окружающую среду, что требует постоянного мониторинга и оценки их воздействия. Исследование направлено на оценку доз

облучения населения, проживающего в непосредственной близости от станции, с учетом специфических условий региона и современных подходов к моделированию.

Целью исследования является количественная оценка доз облучения населения, проживающего в регионах, прилегающих к Курской АЭС, с использованием данных по радиоактивным атмосферным выбросам и региональных параметров, а также анализ дозовых нагрузок от выбросов трития и углерода-14 на основе усовершенствованных моделей.

Для оценки доз облучения использовались данные по атмосферным выбросам радионуклидов Курской АЭС за период с 2002 по 2022 годы (табл. 1). Расчеты выполнены с помощью программного пакета CROM, позволяющего оценить дозы, полученные вследствие долговременных выбросов на критические группы населения [1].

Таблица 1

Среднегодовая активность атмосферных выбросов Курской АЭС

Наименование радионуклида	Активность, Бк/год	Наименование радионуклида	Активность, Бк/год
⁶⁰ Co	2.23E+08	⁴¹ Ar	7.47E+13
¹³¹ I	2.10E+09	⁵⁴ Mn	2.85E+08
¹³⁷ Cs	4.96E+07	^{85m} Kr	7.65E+12
⁹⁰ Sr	4.11E+07	⁸⁷ Kr	8.24E+12
¹³⁴ Cs	8.55E+07	⁸⁸ Kr	2.05E+13
³ H	5.43E+11	¹³³ I	2.07E+08
¹⁴ C	7.87E+11	¹³³ Xe	8.83E+13

Для оценки доз от трития (³H) и углерода-14 (¹⁴C) использованы как равновесные, так и неравновесные модели, доработанные в соответствии с [2, 3]. В исследование были включены региональные параметры, такие как доля местных продуктов питания, произведенных в районе расположения Курской АЭС, что позволило учитывать особенности питания населения данного региона.

Результаты исследования показали, что суммарная эффективная годовая доза для взрослого населения в 2002 году составляла 2.75 мкЗв/год, а к 2030 году возрастет до 2.78 мкЗв/год. Для детей 1-2 лет годовая доза была выше: 4.57 мкЗв/год в 2002 году и 4.6 мкЗв/год в 2030 году (рис. 1). Основной вклад в дозовую нагрузку вносят радионуклиды ¹³¹I, ⁸⁸Kr, ⁴¹Ar

и ¹⁴C (рис. 2). Наибольшее воздействие на детей оказывает потребление продуктов питания (64 % от общей дозы), а для взрослого населения основным фактором является внешнее облучение (рис. 3).

В ходе исследования проведена сравнительная оценка дозовых нагрузок с использованием равновесных и неравновесных моделей для ³H и ¹⁴C, что позволяет глубже понять влияние различных радионуклидов на население. Сравнение двух моделей (равновесной и неравновесной) показало, что равновесные модели дают более высокие оценки доз, особенно для ¹⁴C. При использовании равновесной модели вклад ¹⁴C в суммарную дозу достигает 32.5 %, тогда как при использовании неравновесной модели – 19.9 % (табл. 2).

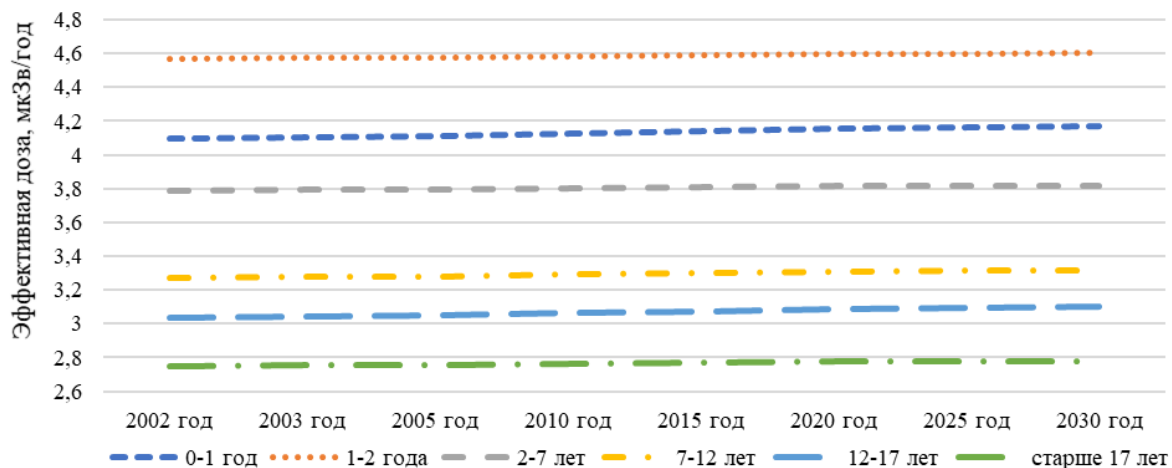


Рисунок 1. Динамика годовой дозы облучения населения с 2002 по 2030 гг., мкЗв/год

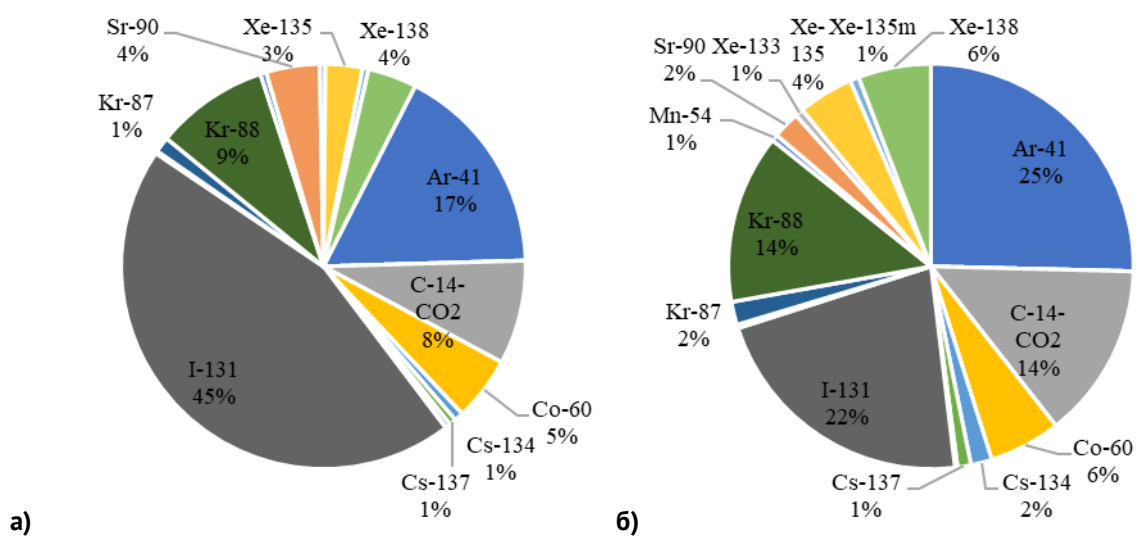


Рисунок 2. Вклад отдельных радионуклидов в годовую дозу облучения детей 1-2 лет (а) и взрослого населения (б), %

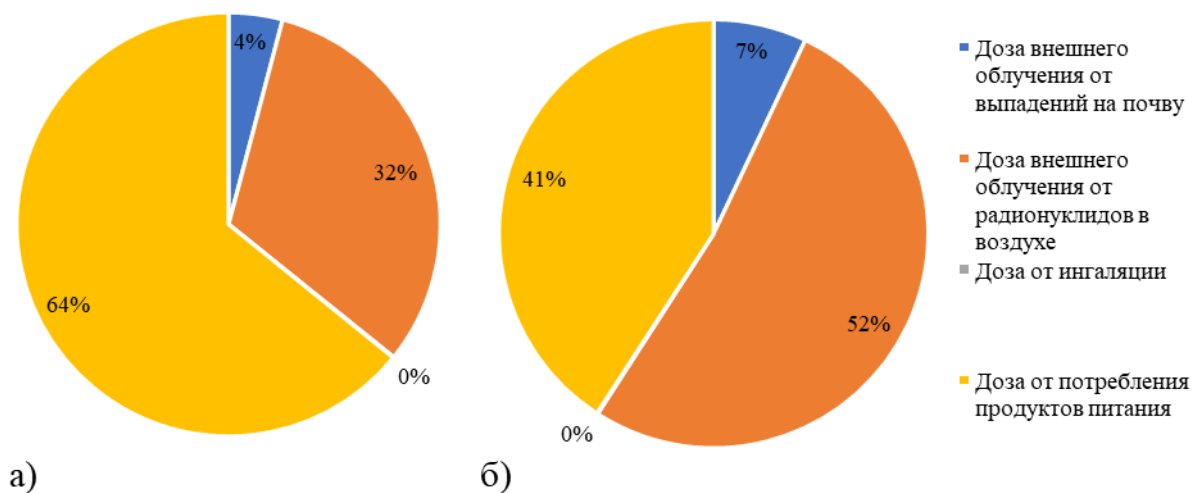


Рисунок 3. Вклад путей облучения в годовую дозу детей 1-2 лет (а) и взрослого населения (б)

Результаты оценки по региональному сценарию для Курской АЭС (взрослое население, 2030 год)

Модель для ^3H и ^{14}C	Эффективная доза, мкЗв/год	Вклад отдельных радионуклидов, %							
		ИРГ	^3H	^{14}C	^{131}I	$^{134,137}\text{Cs}$	^{90}Sr	^{60}Co	Другие радионуклиды
Равновесная	3.6	40.7	0.3	32.5	17.0	2.2	2.2	4.6	0.5
Неравновесная	2.8	52.1	0.1	13.9	21.7	2.9	2.9	5.9	0.6

В результате проведенного исследования была получена комплексная оценка доз облучения населения, проживающего вблизи Курской АЭС. Одной из ключевых особенностей исследования является учет региональных параметров, таких как доля местных продуктов питания, что существенно повлияло на результаты расчета дозовых нагрузок. Использование усовершенствованных моделей для трития и углерода-14 позволяет более точно оценить их вклад в суммарную дозу облучения. Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования систем мониторинга и контроля радиационной безопасности АЭС, а также для разработки региональных рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения.

1. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de impacto) / *Editado por Beatriz Robles, Ana Suárez, Juan Carlos Mora, David Cancio*. Madrid, 2007. 60 p.

2. *Алексахин Р.М.* Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // *Атомная энергия*. 2013. Т. 114. Вып. 5. С. 243-249.

3. Поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС с ВВЭР и оценка дозы облучения населения / *А.И. Крышев, М.Е. Васянович, А.А. Екидин [и др.]* // *Атомная энергия*. 2020. Т. 128. Вып. 6. С. 333-337.

4. Оценка дозы облучения населения от выброса ^{14}C АЭС с РБМК-1000 и ЭГП-6 / *А.И. Крышев, И.И. Крышев, М.Е. Васянович [и др.]* // *Атомная энергия*. 2020. Т. 128. Вып. 1. С. 46-52.

Список литературы

ASSESSMENT OF RADIATION DOSES TO PUBLIC FROM EMISSIONS OF THE KURSK NPP WITH CONSIDERATION OF REGIONAL DATA

Mikhailova R.A., Spiridonov S.I., Nushtaeva V.E.

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

This study assesses radiation exposure for people living near the Kursk Nuclear Power Plant, considering local factors and enhanced models for tritium and carbon-14. The research found that the annual radiation exposure to the population is twice lower than the allowed limit for nuclear power plants. Using regional parameters, like the amount of locally produced food, improved the accuracy of estimating internal exposure pathways, particularly for children. The comparison of equilibrium and non-equilibrium models demonstrated that the latter provides more precise results for estimating tritium and carbon-14 accumulation. The primary dose sources are the radionuclides ^{131}I and ^{14}C , and their effects differ by age group.

Keywords: *Kursk NPP, radiation safety, radiation exposure, tritium (^3H), carbon-14 (^{14}C), regional parameters, equilibrium and non-equilibrium models, radioactive emissions, members of the public*

ОЦЕНКА СТИМУЛИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ БИОМАССЫ ЛИШАЙНИКОВ В ОТНОШЕНИИ *SORGHUM SUDANENSE* (PIPER) STAPF.

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 влияния биомассы лишайников *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. и *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. на всхожесть семян и первичный рост проростков одного из видов сорго семейства мятликовые – *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. 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

В научной литературе собраны данные о разнонаправленных взаимоотношениях между лишайниками и сосудистыми растениями. Рядом исследований выявлены стимулирующее и аллелопатические эффекты со стороны вторичных метаболитов лишайников [1, 2] на жизненные процессы высших растений [1, 3-9]. В представленной работе изложены результаты исследования *in vitro* влияния биомассы лишайников кладонии лесной и гипогимнии вздутой на всхожесть семян и первичный рост проростков сорго суданского, или суданской травы (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf). Показана зависимость величины стимулирующего и/или ингибирующего действия от концентрации внесенной биомассы лишайников на сорговое растение.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны часто встречающиеся на территории Республики Беларусь лишайники: кладония лесная (*Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot.), гипогимния вздутая (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.) и перспективная для выращивания как кормовая культура – сорго суданское, или суданская трава (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.).

Семена сорго проращивали на свету в контейнерах при температуре 25 ± 3 °С. В первой серии опытов на дно контейнера укладывали три слоя фильтровальной бумаги, равномерно распределяли биомассу лишайника и вносили семена. Во второй серии на дно контейнера укладывали два слоя фильтровальной бумаги, распределяли биомассу, дополнительно покрывали слоем фильтровальной бумаги и выкладывали семена растений. Для контрольных образцов

использовали аналогичные подложки из фильтровальной бумаги без внесения биомассы лишайника. Навески биомассы лишайника составляли 0.01, 0.03 и 0.05 г на 1 см² ложа прорастания семян. Для увлажнения среды проращивания использовали смесь Кнопа. Производили учеты всхожести, взвешивание проростков, а также измерения длины корневой системы и побегов. Энергию прорастания семян и всхожесть определяли на пятые, десятые сутки, соответственно.

Результаты и обсуждение

Основные показатели прорастания семян сорго суданского изменялись в зависимости от концентрации и расположения биомассы лишайников на и под ложем прорастания (рис. 1-3). На рисунках приняты следующие обозначения для графического представления результатов: Cl._S.Sud._0.01-0.05, которому соответствуют условия проращивания семян сорго суданского в присутствии 0.01-0.05г/см² биомассы кладонии лесной, а также H._S.Sud._0.01-0.05, которому соответствуют условия проращивания семян сорго в присутствии 0.01-0.05 г/см² биомассы гипогимнии вздутой.

Как видно из рисунка 1, в присутствии биомассы лишайников на ложе энергия прорастания и всхожесть семян сорго суданского подавлялась в прямой зависимости от концентрации первой. Если биомасса лишайников была под ложем, энергия прорастания и всхожесть семян относительно контрольных значений не отличалась.

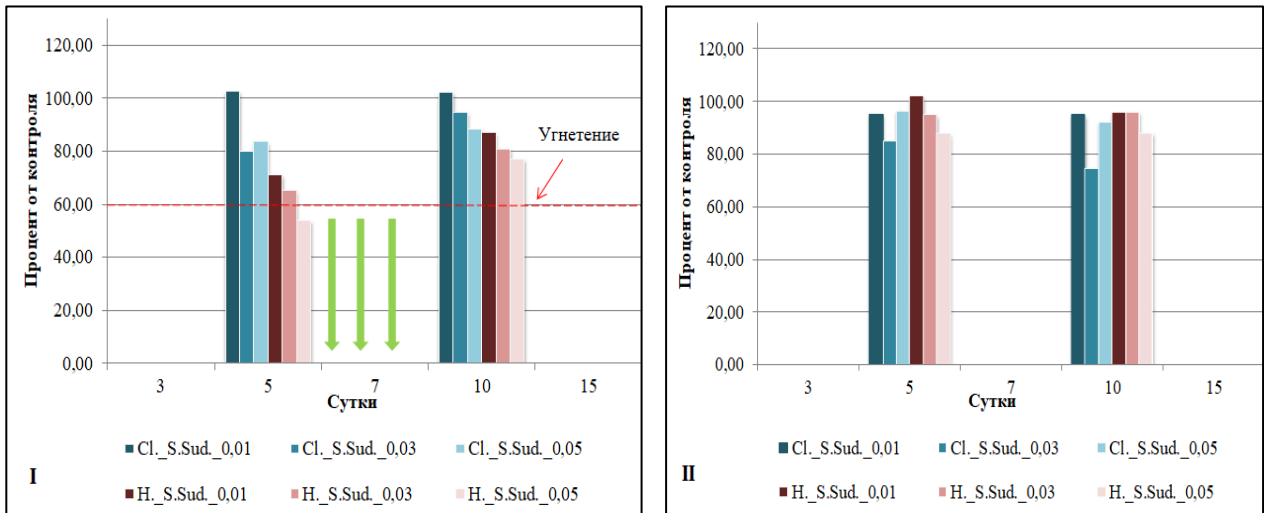


Рисунок 1. Энергия прорастания и всхожесть семян *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. на 5-е и 10-е сутки опыта в присутствии биомассы лишайников на ложе (I) и (II) под ложем прорастания

Установлено, что на тридцатые сутки наблюдений корни исследуемых проростков в условиях на ложе стимулировались в росте до 1.4 раза, за исключением среды 0.05г/см² гипогимнии (рис. 2(I)), в серии под ложем аналогично, за исключением проростков в средах 0.01-0.05 г/см² гипогимнии (рис. 2(II)).

Рост побегов сорго суданского стимулировался биомассой лишайников в 1.2 раза в условиях на ложе (рис. 3(I)). Реакция сосудистого растения путем роста фотосинтезирующей части является одним из способов приспособления к воздействию фактору. Стимулированные биомассой лишайников проростки сорго, соответственно, увеличивались и в массе.

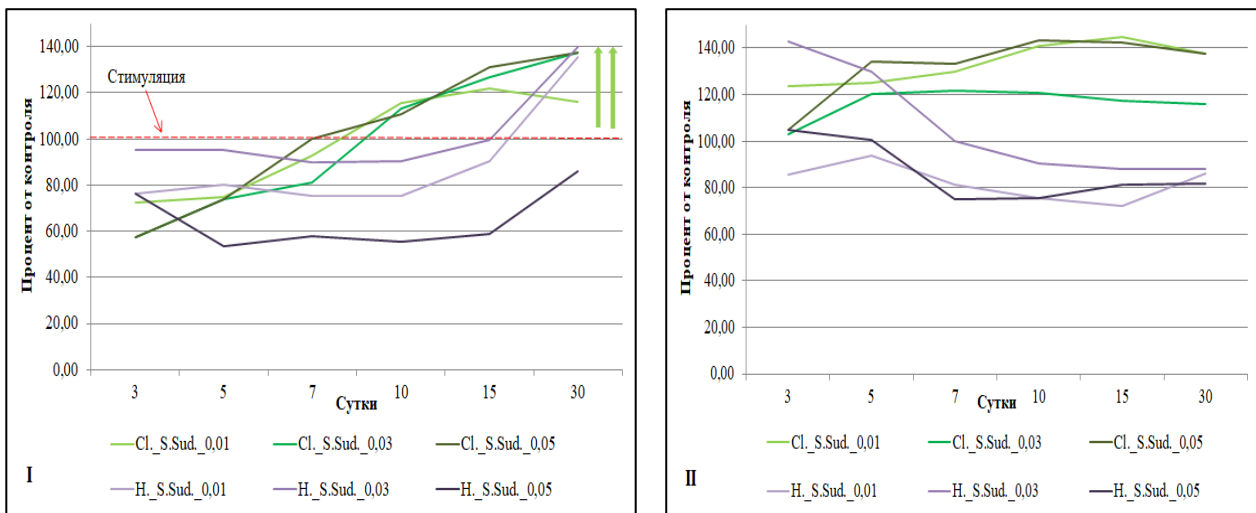


Рисунок 2. Длина корней всходов *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. на третьи – тридцатые сутки опыта в присутствии биомассы лишайников на ложе (I) и (II) под ложем прорастания

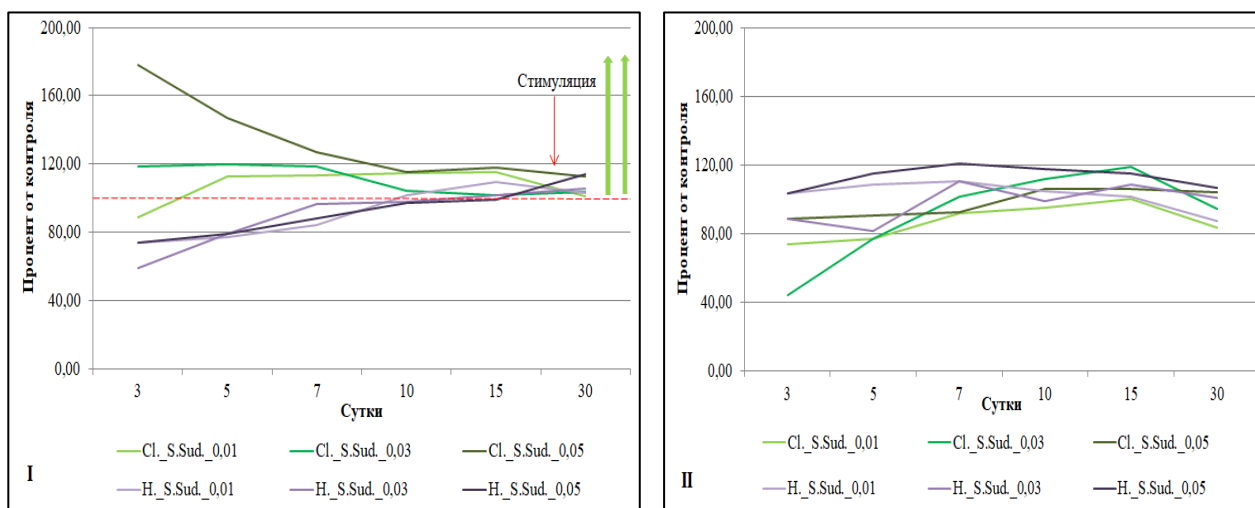


Рисунок 3. Длина побегов всходов *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. на третьи – тридцатые сутки опыта в присутствии биомассы лишайников на ложе (I) и (II) под ложем прорастания

Заключение

Таким образом, показана зависимость силы стимулирующего воздействия биомассы лишайников от расположения подложки и концентрации на показатели первичного роста проростков Сорго суданского.

Список литературы

1. Huneck S., Yoshimura I. Identification of lichen substances. Springer, 1996. 493 p.
2. Favero-Longo S.E., Piervittori R. Lichen – plant interactions // Journal of Plant Interactions. 2010. V. 5(3). PP. 163-177.
3. Reigosa M.J., Pedrol N., Gonzalez L. Allelopathy: A Physiological Process with Ecological Implications. Springer, 2006. 634 p.
4. Allelopathic effects of epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. colonization on the spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) bark / E. Latkowska [et al.] // Allelopathy Journal. 2015. V. 35(1). PP. 129-138.

5. Lichen secondary metabolites affect growth of *Physcomitrella patens* by allelopathy / M. Goga [et al.] // Springer-Verlag Wien. 2016. V. 254. PP. 1307-1315.

6. Cheng F., Cheng Zh. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy // Frontiers in Plant Science. 2015. V. 6. PP. 1-16.

7. Soln K., Koce J.D. Allelopathic root inhibition and its mechanisms // Allelopathy Journal. 2021. V. 52(2). PP. 181-198.

8. Weir T.L., Park S.-W., Vivanco J.M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals // Current Opinion in Plant Biology. 2004. V. 7. PP. 472-479.

9. Haque Md.E. A review on bio-pesticide for organic farming // International Journal of Chemistry Studies. 2018. V. 2(6). PP. 11-14.

ASSESSMENT OF THE STIMULATING EFFECT OF LICHENS BIOMASS ON *SORGHUM SUDANENSE* (PIPER) STAPF.

Mileiko A.A.

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
Fedyuninskogo st. 4, Gomel, Republic of Belarus, 246007

The paper presents the results of a study of the influence of lichen biomass *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. and *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. on seed germination and primary growth of seedlings of one of the sorghum species of the family Poaceae – *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. The dependence of the magnitude of the stimulating and / or inhibitory effect on the amount of lichen biomass introduced onto the sorghum plant is shown.

Keywords: lichen, sorghum crop, biomass, seed germination, primary growth, growth stimulation

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs ГЛОБАЛЬНЫХ И ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЙ В ПОЧВАХ РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ ЗОН ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Мингареева Е.В.^{1,а}, Санжарова Н.И.^{2,б}, Фесенко С.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Центральный музей почвоведения им. В.В. Докучаева», 199034, г. Санкт-Петербург, Биржевой проезд, д. 6, 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: ^аelena.mingareeva@yandex.ru, ^бnatsan2004@mail.ru

На основании анализа коллекции почвенных монолитов Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева, отобранных в период с 1947 по 2017 гг., получены данные о распределении и динамике содержания ^{137}Cs в почвах четырех природных зон на Европейской территории России в результате глобальных и чернобыльских выпадений. Определены эффективные и экологические периоды получищения почв.

Ключевые слова: ^{137}Cs , глобальные выпадения, чернобыльские выпадения, радиоактивные выпадения, почвы, природные зоны, периоды получищения

Введение

Современный техногенный радиоактивный фон сформировался в результате наземных ядерных взрывов большой мощности и выпадения аэрозольных частиц из стратосферы на землю. Основная часть радионуклидов выпала в том полушарии, где произведен ядерный взрыв, преимущественно между 30° и 60° с.ш. (максимальные уровни загрязнения отмечены на $40\text{--}50^\circ$ с.ш.) [1]. Основными радионуклидами глобальных выпадений являются долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs . Плотность загрязнения территории Восточно-европейской равнины до аварии на Чернобыльской АЭС составляла $1.85\text{--}7.4$ кБк/м² ($0.05\text{--}0.2$ Ки/км²). В последние десятилетия фоновые плотности загрязнения ^{137}Cs для территории СНГ составляют около 1.85 кБк/м² (0.05 Ки/км²), а в горах – 5.9 кБк/м² (0.16 Ки/км²) [2].

К другим источникам загрязнения относятся предприятия ЯТЦ, использование радиоактивных изотопов в различных отраслях и т.д. Влияние этих источников на формирование радиоэкологической ситуации невелико, за исключением крупных аварий. В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивные выпадения с плотностью загрязнения ^{137}Cs выше 37 кБк/м² (1 Ки/км²) на Европейской территории России (ЕТР). Радиоактивные выпадения регистрировались на территории 21 административного образования [3]. Наиболее высокие уровни загрязнения ^{137}Cs определены в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях – от 185 до 1480 кБк/м² ($5\text{--}40$ Ки/км²). В Воронежской, Курской, Липецкой, Ленинградской, Пензенской, Рязанской, Смоленской, Тамбовской и Ульяновской областях и Мордовии плотность загрязнения составляет $37\text{--}185$ кБк/м² ($1\text{--}5$

Ки/км²). Наиболее низкие плотности загрязнения по ^{137}Cs , сравнимые с фоновыми, отмечены в Архангельской, Астраханской, Владимирской, Волгоградской, Ивановской, Кировской областях. В остальных регионах ЕТР уровень загрязнения менее 37 кБк/м² (1 Ки/км²). Вологодская, Псковская, Новгородская, Оренбургская, Волгоградская, Ростовская области, Республика Башкортостан и Республика Крым – регионы с минимальным загрязнением или не подвергшиеся загрязнению.

Особенности осаждения радиоактивных выпадений при испытании ядерного оружия, неравномерный характер загрязнения чернобыльскими выпадениями, влияние ландшафтных характеристик местности привели к формированию сложных картин полей радиоактивного загрязнения.

Материалы и методы

Объектами исследования явились почвенные образцы из коллекции почвенных монолитов Центрального музея почвоведения им. В.В. Докучаева (КПМ ЦМП), отобранные в различных природных зонах на ЕТР с 1947 по 2017 гг. Проанализированы образцы на 45 участках (глубина отбора $0\text{--}10(20)$ см), которые расположены между 60° с.ш. (Вологодская и Ленинградская обл.) и $44\text{--}45^\circ$ с.ш. (Ростовская обл., Республика Крым), т.е. в основной зоне глобальных выпадений. Для части участков характерно суммарное загрязнение за счет глобальных выпадений и выпадений Чернобыльской АЭС.

Анализ результатов по содержанию ^{137}Cs проводился для трех групп образцов: 1 – образцы, отобранные до проведения ядерных испытаний; 2 – образцы, загрязнение которых связано с глобальными

выпадениями; 3 – образцы, основной вклад в загрязнение которых внесли чернобыльские выпадения.

Проведение данных исследований базировалось на пространственно-временном подходе изучения распределения техногенного ^{137}Cs в почвах различных природных зон, который имеет практическое значение для долгосрочного прогнозирования радиозоологической обстановки.

Результаты и обсуждение

При анализе образцов, отобранных 1962, 1965 и 1971 гг., получены объективные экспериментальные данные о плотности загрязнения почв ^{137}Cs в период интенсивных глобальных выпадений на ЕТР, которые представляют особую важность для оценки современной радиационной обстановки и динамики ее изменения. Плотность загрязнения участков на момент выпадений составила 4.47 ± 0.84 , 5.99 ± 0.97 и 2.98 ± 0.46 кБк/м², соответственно.

Полученные данные были использованы как «нулевая точка» для оценки радиационной обстановки перед чернобыльскими выпадениями: в 1986 г. плотность загрязнения участков с учетом радиоактивного распада ^{137}Cs составила 2.6 ± 0.5 , 3.1 ± 0.5 и 2.1 ± 0.3 кБк/м², соответственно. Данные были использованы для выделения территорий, загрязненных в результате глобальных выпадений, в современный период (2014-2017 гг.): уровень фонового (глобального) содержания ^{137}Cs составлял 1.1-1.6 кБк/м².

За период 1962-2017 гг. на ЕТР средняя плотность загрязнения ^{137}Cs в результате глобальных выпадений составила 1.61 ± 0.96 кБк/м², что в 2.7 раза ниже, чем в период выпадений в 1962-1971 гг. (4.48 ± 0.62 кБк/м²).

На территориях чернобыльских выпадений средняя плотность загрязнения составила 9.51 ± 0.29 кБк/м², что почти в 6 раз выше уровня глобальных выпадений. Следует отметить, что образцы отбирались на территориях, которые не отнесены к зонам с высокими уровнями загрязнения (>37 кБк/м²), поэтому установленное значение плотности загрязнения ^{137}Cs можно рассматривать как оценку ситуации для территорий с благополучной радиационной обстановкой.

В *таежной зоне* в настоящее время содержание ^{137}Cs в почвах в Вологодской, Псковской областях (обл.) и в Валдайском районе Новгородской обл. обусловлено глобальными выпадениями. При этом в Новгородском районе выявлены участки (сосновый лес, осушенное болото), где содержание ^{137}Cs связано с чернобыльскими выпадениями. В Ленинградской обл. загрязнение обусловлено преимущественно чернобыльскими выпадениями.

В *лесостепной зоне* только на территории Республики Башкортостан фоновое содержание ^{137}Cs в почвах обусловлено глобальными выпадениями. На части территории Тульской, Воронежской и Белгородской областей основной вклад в загрязнение вносят чернобыльские выпадения.

В *степной зоне* (Волгоградская, Ростовская и Оренбургская обл.) загрязнение почв ^{137}Cs обусловлено глобальными выпадениями. В Волгоградской области получены новые экспериментальные данные о влиянии защитных лесополос на задерживание и перераспределение ^{137}Cs в горизонтальном направлении под влиянием природных факторов.

Особенности осаждения радиоактивных выпадений в условиях *горной и засушливо-субтропической природной зоны* привели к формированию на территории Крымского полуострова загрязнения преимущественно за счет чернобыльского ^{137}Cs с плотностью загрязнения от 7.20 до 15.43 кБк/м². Выявлена тенденция к обратной взаимосвязи $A_{\text{уд}}$ ^{137}Cs со значениями абсолютной высоты при степенной линии тренда.

Вертикальная миграция ^{137}Cs в почвах определяется различными факторами – влиянием времени после выпадений, особенностями осаждения выпадений, почвенными свойствами и антропогенными факторами. Одним из интегральных параметров, используемых для прогноза радиозоологической обстановки, является период получищения корнеобитаемого слоя почвы – время, в течение которого содержание радионуклидов в слое почв уменьшается в 2 раза [4]. Определяются экологические (T_{ec}) и эффективные (T_{eff}) периоды получищения, т.е. рассчитанные без учета и с учетом радиоактивного распада. Для получения адекватных прогнозных оценок интенсивности миграции радионуклидов применяются различные математические модели [5]. Для оценки скорости процессов очищения почв была применена однокомпонентная конвективно-квазидиффузионная модель.

Определение *эффективных периодов получищения* (T_{eff}) почв для ^{137}Cs показало, что они близки для глобальных и чернобыльских выпадений и составляют 22.7-28.2 и 18.4-29.5 лет, соответственно. Наиболее длительные T_{eff} получены для чернобыльских выпадений для почв горной и засушливо-субтропической зоны, что обусловлено свойствами почв и влиянием климатических условий.

Заключение

Обобщение данных по пространственному содержанию и распределению ^{137}Cs в почвах различных природных зон на Европейской территории России показывает, что неоднородность загрязнения почв ^{137}Cs как глобальными, так и чернобыльскими выпадениями, имеет сложный характер и зависит от различных факторов: свойства выпадений, особенности их осаждения, характера подстилающей поверхности, возможного влияния метеоусловий и др. Радиоактивный распад, а также процессы миграции определяют динамику изменения радиационной обстановки, для оценки которой необходимым элементом является наличие информации на начальный момент выпадений, а также количественные параметра процессов самоочищения почв. Следует

подчеркнуть, что объективные данные о плотности загрязнения почв в результате глобальных выпадений на территории ЕТР, полученные в первый период после ядерных испытаний, ограничены, поэтому полученные результаты являются экспериментальной информацией, которая представляет особенную важность для оценки современной радиационной обстановки.

Список литературы

1. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Новикова Н.Я. Глобальные выпадения цезия-137 и человек. М.: Атомиздат, 1974. 168 с.

2. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году: ежегодник. Обнинск.: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2017. 376 с.

3. Атлас аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия - Беларусь) / Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. Москва-Минск: Фонд «Инфосфера» - НИА Природа, 2009. 140 с.

4. Павлоцкая Ф.И. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. М., Атомиздат, 1974. 215 с.

5. Оценка периодов полуснижения содержания ¹³⁷Cs в корнеобитаемом слое почвы луговых экосистем / С.В. Фесенко, С.И. Спиридонов, Н.И. Санжарова, Р.М. Алексахин // Радиационная биология. Радиоэкология. 1997. Т. 37. Вып. 2. С. 267-280.

CONTENT AND DISTRIBUTION OF ¹³⁷Cs OF GLOBAL AND CHERNOBYL PRECIPITATION IN SOILS OF VARIOUS NATURAL ZONES OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA

Mingareeva E.V.¹, Sanzharova N.I.², Fesenko S.V.²

¹ Central Museum of Soil Science named after V.V. Dokuchaev, Birzhevoy proezd 6, St. Petersburg, Russian Federation, 199034

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

Based on the analysis of the collection of soil monoliths of the Central Museum of Soil Science named after V.V. Dokuchaev, selected in the period from 1947 to 2017, data on the distribution and dynamics of ¹³⁷Cs content in the soils of four natural zones in the European territory of Russia as a result of global and Chernobyl precipitation were obtained. Effective and ecological periods of semi-purification of soils have been determined.

Keywords: ¹³⁷Cs, global fallout, Chernobyl fallout, radioactive fallout, soils, natural zones, half-life periods in soil

УДК 502.51:539.16:543.3 (574.41)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО, ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОГО И РАДИАЦИОННОГО СОСТАВА ВОД ОБЪЕКТОВ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Муликова А.Б.^а, Айдарханова А.К., Ларионова Н.В., Мамырбаева А.С., Богатырева Т.Ю.

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 Sarsenova@nnc.kz

В работе представлены результаты обследования 50 водных объектов действующих зимовок и летников, расположенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Выполнены анализы и получены данные по определению радионуклидного, химического и эпидемиологического состава воды. По результатам проведенных исследований вода в исследуемых объектах соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям качества питьевой воды.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон (СИП), искусственные радионуклиды, объекты водопользования, показатели воды

Семипалатинский испытательный полигон расположен на стыке трех областей Республики Казахстан. Площадь полигона равна порядка 18 000 км², ближайшим к полигону крупным населенным пунктом является город Курчатов, который расположен практически на границе СИП [1, 2]. В настоящее время большая часть территории полигона продолжает активно использоваться местным населением и населением с прилегающих территорий для постоянного и временного проживания, для разведения и выпаса сельскохозяйственных животных. Таким образом, все водные объекты, расположенные на данной

территории, являются действующими либо потенциальными объектами водопользования. В связи с чем с точки зрения безопасности являются одним из основных и наиболее значимых объектов исследования на территории полигона [1].

С целью получения новых данных о радионуклидном, эпидемиологическом и химическом составе объектов водопользования проводился отбор проб воды с 50 объектов водопользования, представлены действующими скважинами и колодцами, расположенных на территории СИП (рис. 1, рис. 2).

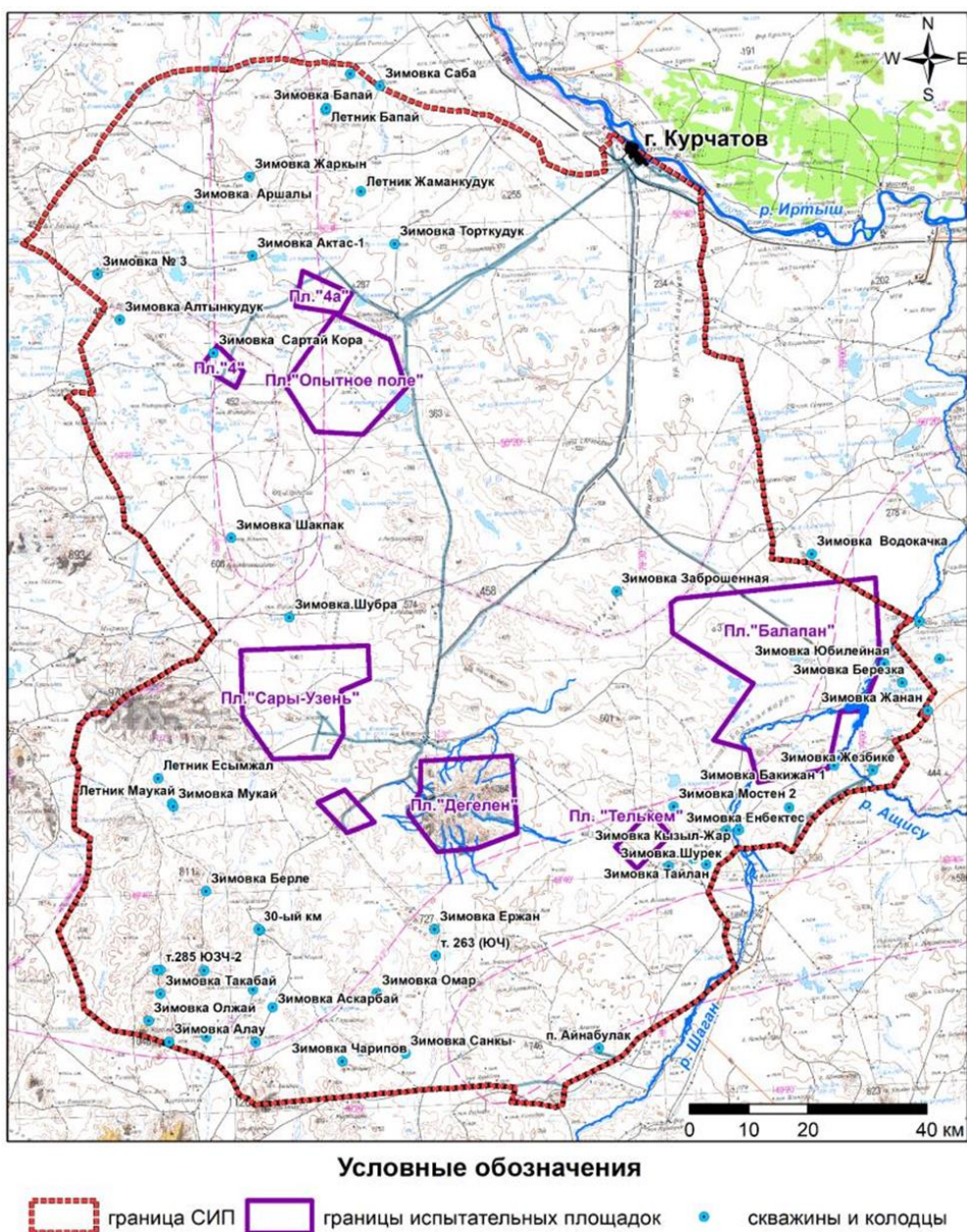


Рисунок 1. Карта расположения объектов исследования



Рисунок 2. Отбор проб воды: а) – со скважины; б) – с колодца

Общая методология проведения исследований включала в себя следующие этапы: визуальный осмотр объекта; отбор проб, временное хранение и транспортировка проб; проведение лабораторных исследований. Полевые и лабораторные работы проводились в соответствии с методами отбора, подготовки и анализа проб согласно ГОСТ и методическим рекомендациям [1-6].

Характеристика вод по химическому и эпидемиологическому нормированию проводилась в соответствии с нормативными документами [1, 2]. По результатам общего химического анализа следует, что исследуемые воды по степени минерализации – пресные и слабосоленоватые. По уровню кислотности: 22 % – слабощелочные, 10 % – сильнощелочные и 68 % – щелочные. По степени жесткости 10 % вод являются мягкими, 46 % – средней жесткости и 30 % – жесткими. По анионному составу 52 % исследуемых вод являются сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридными, 40 % – гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридными, 6 % – сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатными и 2 % – хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатными. По катионному составу 2 % являются кальциевомагниево – натриевыми, 8 % натриево – магниевое – кальциевые, 20 % – кальциево-натриево-магниевые, 76 % – натриево-кальциево-магниевые.

Общая бактериальная загрязненность воды характеризуется количеством бактерий, содержащихся в 1 мл воды. Согласно требованиям, питьевая вода не должна содержать более 100 бактерий в 1 мл. Исходя из результатов по определению таких микробиологических показателей как общего микробного числа (ОМЧ), общих колиформных бактерий (ОКБ), термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) в воде водных объектов СИП их содержание в воде отсутствует.

Согласно полученным данным присутствие искусственных радионуклидов в воде выявлено не было. Удельная активность радионуклидов в анализируемых образцах составила для Cs^{137} <0.07 Бк/кг, ^{241}Am <0.15 Бк/кг, ^{90}Sr <0.01 Бк/кг, $^{239+240}Pu$ <0.09 Бк/кг и для 3H <6 Бк/кг. Полученные значения не превышают значений уровней вмешательства (^{137}Cs – 11

Бк/кг, ^{241}Am – 0.69 Бк/кг, $^{239+240}Pu$ – 0.55 Бк/кг, 3H – 7600 Бк/кг, ^{90}Sr – 4.9 Бк/кг) по содержанию в питьевой воде согласно Гигиеническим нормативам [1].

По результатам проведенных исследований химического, эпидемиологического и радиационного составов объектов водопользования СИП, вода в исследуемых объектах соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям качества питьевой воды.

Список литературы

1. Оптимизация исследований территорий Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот: монография / Под рук. С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана / Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. Павлодар: ТОО «Дом печати», 2015. Вып. 5. 57 с.
2. Комплексное Радиозоологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография / Э.Г. Батырбеков, А.О. Айдарханов, В.А. Витюк [и др.]. Курчатов: Институт радиационной безопасности и экология РГП НЯЦ РК, 2021. 340 с.
3. Современные уровни активности искусственных радионуклидов в объектах водопользования, расположенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) / О.Н. Ляхова, С.Н. Лукашенко, Л.В. Тимонова, О.В. Бурдакина // Радиационная биология. Радиозология. 2017. Т. 57. № 1. С.77-85.
4. ГОСТ СТ РК Р 51593 – 2003. Вода питьевая. Отбор проб. Введ. 2005-01-01. – Астана: Госстандарт, 2003. 14 с.
5. СТ РК ГОСТ Р 51592-2003. Вода. Общие требования к отбору проб. Введ. 2003-11-07. Астана: Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2003. 58 с.
6. ГОСТ 17.1.5.04-81. Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие

технические условия. Введ. 1981-12-30, Государственный комитет СССР по стандартизации, 1981. 7 с.

7. ГОСТ 26449.1-85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Введ. 01.01.87. Государственный комитет СССР по стандартизации, 1985. 101 с.

8. ISO 9698:2019 (E). Качество воды. Определение удельной активности трития – метод жидкостно-сцинтилляционного счета».

9. МВИ KZ.06.01.00449-2022. Определение содержания искусственных радионуклидов плутония – (239+240), стронция-90 и цезия-137 в водах методом концентрирования. Алматы, 2022.

10. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 24 ноября 2022 года № ҚР ДСМ-138. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 25 ноября 2022 года № 30713 Об

утверждении «Гигиенических нормативов показателей безопасности хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования».

11. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 20 февраля 2023 года № 26. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 20 февраля 2023 года № 31934 Об утверждении Санитарных правил «Санитарно-эпидемиологические требования к водозаборам, местам водозабора для хозяйственно-питьевых целей, хозяйственно-питьевому водоснабжению и местам культурно-бытового водопользования и безопасности водных объектов».

12. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71 Об утверждении гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности.

RESEARCH INTO THE CHEMICAL, EPIDEMIOLOGICAL AND RADIOACTIVITY COMPOSITION OF OBJECTS OF WATER USE IN THE TERRITORY OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

Mulikova A.B., Aidarhanova A.K., Larionova N.V., Mamyrbayeva A.S., Bogatyryova T.Yu.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK, Beibyt atom st. 2, Kurchatov, Abai region, Republic of Kazakhstan, 071100

The paper presents survey findings on 50 water bodies at operating wintering and summering grounds located within the Semipalatinsk Test Site (STS). Analyses were carried out and determinations were obtained on the radionuclide, chemical and epidemiological water composition. Based upon research findings, water in the objects of interest conforms to the sanitary and epidemiological requirements for the potable water quality.

Keywords: *Semipalatinsk Test Site (STS), artificial radionuclides, objects of water use, water indices*

УДК 502.51:502.3: 550.42 (574.41)

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ИХ КАЧЕСТВО

Надеева А.М.^а, Мамырбаева А.С., Айдарханова А.К., Муликова А.Б., Маден Б.Е.

*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 Nadeeva@nnc.kz*

В работе представлены результаты исследования водных ресурсов села Бескарагай области Абай. В результате проведенных работ получены результаты макро-, микро-компонентных и изотопного составов вод, общих химических показателей. Установлено, что изотопный состав вод (^2H и ^{18}O) изменяется в широком диапазоне, и характеризуется «легким» изотопным составом. Исследуемые образцы вод по степени минерализации классифицируются как пресные и слабосоленоватые. По уровню кислотности – нейтральные и слабощелочные. По степени жесткости – мягкие, средней жесткости и жесткие. По ионному составу преобладают воды гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридной и натриево-магниевое-кальциевой группы.

Ключевые слова: стабильные изотопы (^2H и ^{18}O), изотопная гидрология, атмосферные осадки, подземная вода, поверхностная вода

Казахстан сталкивается с широким спектром гидрологических угроз, связанных с истощением и загрязнением запасов воды. Основные стратегические запасы водных ресурсов республики сконцентрированы в поверхностных и подземных источниках. В целом, распределение водных ресурсов по регионам страны неравномерно. Однако восточный регион является самым водообеспеченным, располагая 34.5 % от общего объема водных ресурсов страны. Для изучения качества водных ресурсов, имеющих важное стратегическое значение, выбраны подземные воды Ишим-Иртышского района, залегающие в области расположения населенного пункта с. Бескарагай [1, 2].

В рамках проведения рекогносцировочного обследования и для получения данных для дальнейшей оценки влияния атмосферных осадков на качество водных ресурсов были проведены работы по определению макро-, микро-компонентных и изотопного составов вод, общих химических показателей поверхностных и подземных вод, а также изотопного состава атмосферных осадков.

В качестве водных ресурсов выбрано: 4 поверхностных водоема, 4 скважины с придомовых

участков, 2 скважины централизованного водоснабжения, река Иртыш. Отбор проб поверхностных и подземных вод с исследуемых объектов проводился 1 раз в месяц в течение с декабря по май месяцы. Отбор атмосферных осадков проводился событийно.

Водоемы представлены отдельными озерами, наличие визуально определяемых притоков и оттоков не обнаружено. Озера представляют собой неглубокие блюдцеобразные впадины и имеют неглубокие котловины с невысокими берегами. Относятся они к малым озерам, ширина и длина озер варьируется в интервалах от 360 до 1500 м. Глубина озер не превышает 0/7 м. В обследование в качестве поверхностных водоемов также включен участок реки Иртыш, который является главной водной артерией региона.

Отбор подземных вод на данный момент проведен со скважин придомовых участков, расположенных на территориях вблизи озер и колодцев центрального водоснабжения. Вода в скважинах с придомовых территорий относится к поровым водам неглубокого залегания до 5 м. Места расположения объектов показаны на рисунке (рис. 1).

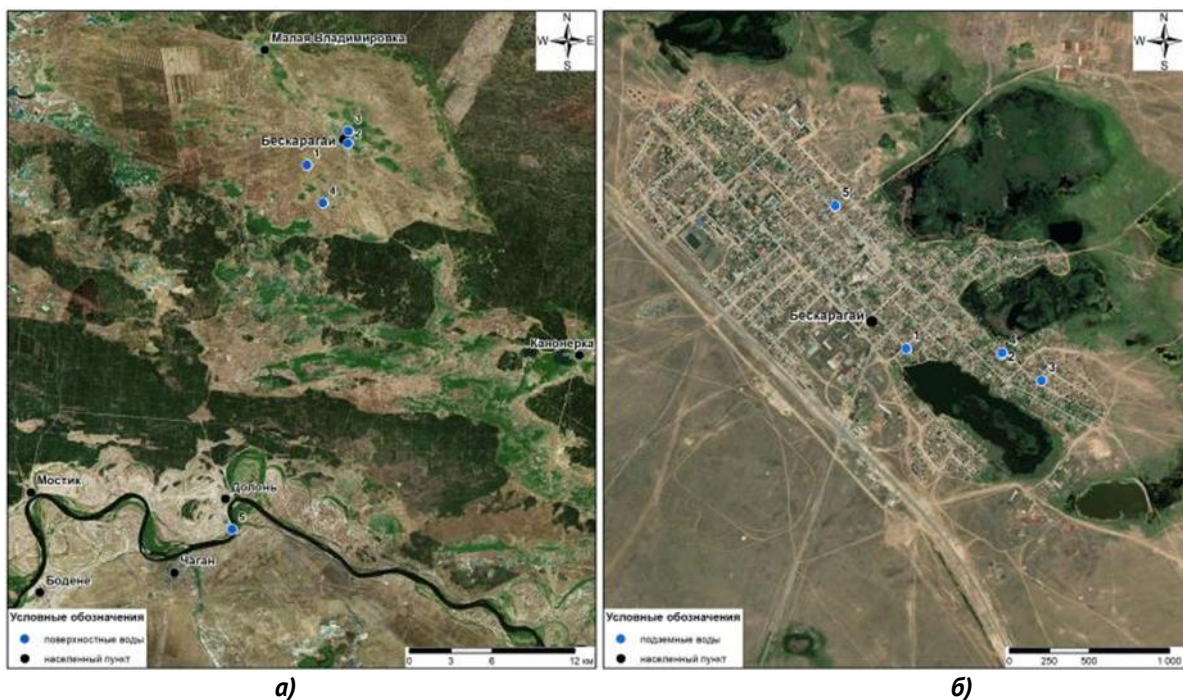


Рисунок 1. Точки отбора проб воды: **а)** – поверхностной; **б)** – подземной

Отбор проб атмосферных выпадений (снег, дождь) осуществлялся согласно разработанной ранее методологии и рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) посредством пробоотборника RAIN SAMPLER 1C (RS-1C) [1, 2]. Данная модель пробоотборника предназначена для отбора проб дождя и твердых осадков.

Лабораторные работы по определению химического состава воды: органолептических показателей (мутности, цветности, прозрачности), водородного показателя, минерализации, общей жесткости, макроэлементов (Na^+K^+ , Ca^+ , Mg^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- + CO_3^{2-}), микроэлементов (Li, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Ag, Ba, Pb, Bi, Th, U) проводились в

соответствии с нормативной документацией на методы выполнения подготовки и анализа [1-3].

Для определения изотопного состава воды применялся метод изотопной гидрологии, который основан на определении соотношений стабильных изотопов поверхностных и подземных вод ($^2\text{H}/^1\text{H}$; $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Измерения стабильных изотопов проводились на высокочувствительном лазерном спектрометре LGR 912-0008. В качестве внутренних стандартов использовались пробы воды, откалиброванные относительно Международного стандарта VSMOW (МАГАТЭ). Точность измерения ^2H и ^{18}O составила $\pm 1 \text{ ‰}$ и $0/5 \text{ ‰}$, соответственно [1].

В результате проведения лабораторных испытаний получены исходные значения распределения стабильных изотопов в поверхностных и подземных водах на исследуемой территории. Согласно полученным данным изотопный состав поверхностных вод изменяется в диапазоне: по ^{18}O от -4.8 ‰ до -17.3 ‰ , а по ^2H от -63.3 ‰ до -127.2 ‰ , и подземных по ^{18}O от -8.7 ‰ до -16.5 ‰ , а по ^2H от -83.5 ‰ до -122.99 ‰ .

По результатам общего химического анализа следует, что исследуемые воды по степени минерализации пресные и слабосолоноватые. По уровню кислотности 40 % вод являются нейтральными и 60 % – слабощелочными. По степени жесткости 40 % вод являются мягкими, 30 % – средней жесткости и 30 % – жесткими.

По анионному составу 75 % исследуемых вод являются гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридными и 25 % – гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатными. По катионному составу 44 % являются натриево-магниево-натриевыми.

Проведен масс-спектрометрический анализ воды по определению основных 22 микроэлементов, которые относятся к I-III классу опасности по своей биологической роли, к которым относятся Li, Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni и др. Согласно анализу полученных результатов обнаружено превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) химических элементов относящихся к II-III классу опасности: Li – 5.3 ПДК, Ba – 4 ПДК, Ag – 2.5 ПДК, V – 2.4 ПДК, Mn – 1.1 ПДК.

В результате проведенного исследования и полученных данных установлено, что общие химические показатели, макро-, микро-компонентный и изотопный составы воды села Бескарагай Абайской области в период зимнего и весеннего сезона изменяются в широком интервале значений.

Список литературы

1. Информация по управлению рисками природных и техногенных / антропогенных опасностей в Республике Казахстан. Обзор результативности экологической деятельности Казахстана, Центр по чрезвычайным ситуациям и снижению риска стихийных бедствий. Алматы. 31 с.

2. Смоляр В.А., Сапаргалиев Д.С., Ким Д.В. Комплексное и рациональное использование поверхностных и подземных вод – основа водной безопасности Республики Казахстан // Геология и охрана недр. 2020. № 1(74). С. 59-71.

3. Global Network of Isotopes in Precipitation: руководство МАГАТЭ по отбору проб осадков. Вена: МАГАТЭ, 2014 г.

4. РИ «Методические рекомендации по отбору проб твердых и жидких атмосферных выпадений», РГП на ПХВ НЯЦ РК филиал ИРБЭ, г. Курчатова. 7 с.

5. ГОСТ Р 57164-2016. Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности. – Москва, 2019 г.

6. ГОСТ 26449.0-85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Общие требования к методам химического анализа при опреснении соленых вод. Москва, 1987 г.

7. ISO 17294-2-2019. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (Часть 2). Определение некоторых элементов, включая изотопы урана. Введ. 01.03.2022. Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Межгосударственный стандарт, 2019. 27 с.

8. «Изотопный анализатор» Модель LGR 912-0008, Руководство пользователя. Документ № 912-U008 Переработанное и исправленное издание 01. Дата выпуска 9/12/2014.

RECONNAISSANCE SURVEY OF WATER SOURCES TO ASSESS THE IMPACT OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON THEIR QUALITY

Nadeyeva A.M., Mamyrbayeva A.S., Aidarkhanova A.K., Mulikova A.B., Maden B.Ye.

Branch Institute of Radiation Safety and Ecology RSE NNC RK, Beibyt atom st. 2, Kurchatov, Abai region, Republic of Kazakhstan, 071100

The paper presents findings of water resources of Beskaragay village, Abai region. Macro-, micro-component and isotopic compositions of waters, general chemical parameters were obtained. It has been established that the isotopic composition of waters (^2H and ^{18}O) varies widely and is characterized by a "light" isotopic composition. The studied water samples are classified as fresh and slightly subsaline according to the degree of mineralization. By the acidity level – neutral and

slightly alkaline. According to the degree of hardness – soft, medium hard and hard. The ion composition of waters of the hydrocarbonate-sulfate-chloride and sodium-magnesium-calcium group is dominant.

Keywords: *stable isotopes (^2H and ^{18}O), isotope hydrology, atmospheric precipitation, ground water, surface water*

УДК 631.4:502.76

ОЦЕНКА ДОЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОЧИХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ НА ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

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: ^а N_Akanova@mail.ru, ^б p.ermakov@mail.ru

Проведены оценки уровней загрязнения почвы ^{137}Cs в Гордеевском и Злынковском районе Брянской области в 2014, 2025 и 2030 году. Отмечена высокая вариабельность содержания на уровне муниципалитетов и сельских поселений. В Гордеевском районе, муниципалитете Мирнинское, поселок Мирный стандартный интервал содержания ^{137}Cs в почве в 2025 г. составлял 0.7-40.3 Ки/км²; в муниципалитете Творшинский, поселок Творшинское – 1.3-92.6 Ки/км². Высокие уровни содержания ^{137}Cs наблюдаются также и в муниципалитетах и сельских поселениях Злынковского района. В 2025 г. верхние пределы дополнительных эффективных годовых доз внешнего облучения от ^{137}Cs во всех муниципалитетах указанных районов не превысят требований норм радиационной безопасности для населения в 1 мЗв/год. В отдельных сельских поселениях, имеющих аномально высокое содержание ^{137}Cs в почве, рассчитаны мощности эффективных внешнего облучения для сельскохозяйственных рабочих, проводящих сельскохозяйственные или реабилитационные работы. Оценено ориентировочно допустимое годовое время их пребывания (200-1200 час/год) на аномально сильно загрязненных полях.

Ключевые слова: *почва, уровень загрязнения ^{137}Cs , дополнительная годовая эффективная доза, сельскохозяйственные рабочие*

Ведение сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения почвы представляет собой сложную научно-производственную задачу. С одной стороны, требуется получение сельскохозяйственной продукции с уровнем загрязнения радионуклидами, удовлетворяющим требованиям санитарных норм. С другой стороны, необходимо обеспечить радиационную безопасность сельскохозяйственных рабочих.

При радиоактивном загрязнении почвы ^{137}Cs от Чернобыльской аварии основное внимание уделялось проблеме получения «чистой» сельскохозяйственной продукции. Между тем, в Брянской области уровни загрязнения почв ^{137}Cs были достаточно велики. На отдельных территориях плотность загрязнения почвы ^{137}Cs превышала 100 Ки/км². На 17000 га сельскохозяйственных угодий плотность загрязнения ^{137}Cs почве в 1992-93 г. превышала 40 Ки/км², что обеспечивало весомый вклад внешнего облучения человека в эффективную годовую дозу. В этой связи возникает проблема учета годовых эффективных доз внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих, выполняющих работы на сельскохозяйственных угодьях с высоким уровнем загрязнения почвы ^{137}Cs .

Проблема учета годовых эффективных доз внешнего облучения осложняется тем, что загрязнение почвы после радиоактивных выпадений в Брянской области характеризуется сильной неравномерностью

на уровне районов, муниципалитетов, отдельных сельских поселений. Это требует большого объема статистических расчетов.

Спустя 35 лет после Чернобыльской аварии в Брянской области высокие уровни загрязнения почвы ^{137}Cs остаются в 6 районах: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском и Новозыбковском районе.

Ранее нами были проведены статистические оценки средних значений и стандартных интервалов содержания ^{137}Cs в почве и годовых эффективных доз для населения, проживающего и работающего в сильно загрязненных районах Брянской области. В 2022 г. эти дозы не превышают требований норм радиационной безопасности в 1 мЗв/год для населения.

Однако при обработке массива данных были выявлены сельские поселения, которые содержали аномально высокие концентрации ^{137}Cs в почве. Соответственно, требуется оценка мощности и годовых эффективных доз внешнего облучения для сельскохозяйственных рабочих при проведении реабилитационных работ на угодьях, которые были выведены из землепользования (плотность загрязнения почвы ^{137}Cs более 80 Ки/км² в 1992-93 г.).

В настоящей работе проведена оценка мощности и годовых эффективных доз внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих при проведении ими

работ на сильно загрязненных (40-80 Ки/км²) и аномально сильно загрязненных полях (более 80 Ки/км²) Гордеевского и Злынковского района Брянской области. Целью работы является оценка ориентировочно допустимого времени пребывания в течение 1 года сельскохозяйственных рабочих на сильно загрязненных и аномально сильно загрязненных сельскохозяйственных угодьях. Из совокупности данных по содержанию ¹³⁷Cs в почве отобраны муниципалитеты и сельские поселения, в которых среднее содержание превышало 5 Ки/км² в 2014 г. С учетом периода полувыведения ¹³⁷Cs из почвы рассчитано его содержание в почве в 2025 и 2030 г. в муниципалитетах и сельских поселениях.

Сильная вариабельность содержания ¹³⁷Cs в почве обуславливает необходимость оценки годовых эффективных доз облучения сельскохозяйственных рабочих, проживающих и работающих на территории сильно загрязненных муниципалитетов. В таблице 1 представлены дополнительные годовые эффективные дозы внешнего облучения от ¹³⁷Cs в почве

для сельскохозяйственных рабочих на уровне муниципалитетов Гордеевского и Злынковского района.

В 2014 г. в Мирнинском муниципалитете Гордеевского района верхняя граница стандартных эффективных годовых доз равнялась 1.24 мЗв/год, в Вышиковском муниципалитете Злынковского района эта величина равнялась 1.20 мЗв/год. Внутри муниципалитетов выделены поселения (села, деревни), в которых годовая эффективная доза внешнего облучения от ¹³⁷Cs в почве превышала 1 мЗв/год.

На этих территориях рассчитана мощность эффективной дозы внешнего облучения от ¹³⁷Cs для сельскохозяйственных рабочих в 2014 2025 и 2030 годах. Расчет проводился по формуле 1:

$$H^* = B_2 \cdot K_1 / J \quad (2)$$

где B_2 – дозовый коэффициент внешнего облучения, т.е. мощность эквивалентной дозы поля внешнего облучения от поверхностного загрязнения ¹³⁷Cs почвы 1 Ки/км² на высоте 1 м ($B = 0.039$ мкЗв·км²/час·Ки).

Таблица 1

Дополнительные годовые эффективные дозы внешнего облучения (H_1) от ¹³⁷Cs в почве для сельскохозяйственных рабочих на уровне муниципалитетов

Муниципалитет	Годовая эффективная доза, мЗв/год		
	2014	2025	2030
Гордеевский район			
Глинковское	0.41/0.34-0.48	0.33/0.27-0.38	0.29/0.26-0.34
Гордеевское	0.45/0.26-0.64	0.36/0.21-0.51	0.32/0.18-0.36
Мирнинское	1.0/0.74-1.24	0.79/0.59-0.98	0.71/0.45-0.88
Петробудское	0.72/0.64-0.80	0.57/0.51-0.64	0.51/0.45-0.57
Рудневоробьевское	0.66/0.42-0.89	0.52/0.33-0.71	0.47/0.30-0.50
Творшинское	0.53/0.36-0.69	0.42/0.29-0.55	0.37/0.25-0.49
Уношевское	0.54/0.39-0.68	0.43/0.31-0.54	0.38/0.28-0.46
Злынковский район			
Вышиковский	1.06/0.92-1.20	0.78/0.68-0.88	0.68/0.59-0.78
Денисовский	0.55/0.42-0.68	0.40/0.31-0.49	0.36/0.27-0.43
Злынковский	0.73/0.56-0.89	0.53/0.41-0.65	0.47/0.36-0.57
Роговский	0.50/0.40-0.59	0.36/0.29-0.43	0.32/0.25-0.38
Спиридоново-Будской	0.48/0.40-0.57	0.35/0.29-0.41	0.31/0.25-0.36
Щербиническое	0.63/0.34-0.92	0.46/0.25-0.68	0.40/0.22-0.59
Чуравичское	0.32	0.25	0.23

Подстановка численных значений в формулу 2 дает величину $H^* = 0.010$ мкЗв/час. Эта величина относится к пахотным почвам, в которых ¹³⁷Cs равномерно распределен по слою почвы в 20 см ($K_1 = 0.04$). Принято считать, что в непахотных сельскохозяйственных угодьях ¹³⁷Cs находится в 5 см слое почвы. В этом случае поглощение гамма-излучения ¹³⁷Cs почвой меньше в 2 раза ($K_2 = 0.08$). Соответственно, $H^* = 0.0020$ мкЗв/час. Результаты представлены в таблице 2

$$t = 1000(1 - H_1) / H^* \quad (2)$$

где H_1 – годовая эффективная доза облучения от ¹³⁷Cs, которую получает сельскохозяйственный рабочий, работая и проживая в данной местности (населенном пункте); H^* – мощность эффективной дозы на сельскохозяйственном угодье от ¹³⁷Cs.

В соответствии с данными таблиц 3 и 4 по формуле (2) мы оценили ориентировочно допустимое время (верхняя граница) пребывания сельскохозяйственных угодий с аномально высоким содержанием ¹³⁷Cs в почве.

Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 2

Мощности эффективных доз облучения (Н*) для сельскохозяйственных рабочих с аномально высокими уровнями загрязнения почвы ¹³⁷Cs.

Муниципалитет (м), село (с), поселок (п)	Мощность эффективной дозы**, мкЗв/час		
	2014 г.	2025 г.	2030 г.
Гордеевский район			
м. Мирнинский, п. Мирный	0.5/1.0	0.4/0.8	0.35/0.7
м. Творшинский, с. Творшинской	1.2/2.4	1.0/2.0	0.85/1.7
Злынковский район			
м. Вышиковский, п. Вышков	0.73/1.5	0.54/1.1	0.47/0.9
м. Вышиковский, с. Добродеевка	0.65/1.3	0.47/0.9	0.41/0.8
м. Щербинское, д. Савичка	0.77/1.5	0.56/1.1	0.49/1.0

Таблица 3

**Ориентировочно допустимое время пребывания сельскохозяйственных рабочих на полях, с аномально высокими уровнями загрязнения почвы ¹³⁷Cs.
(Ориентировочно допустимое время пребывания)**

Сельское поселение	Допустимое время пребывания, час/год	
	2025 г	2030 г
Гордеевский район		
п. Мирный	525/260	830/415
п. Торшинский	580/290	740/370
Злынковский район		
м. Вышиковский, п. Вышков	410/205	680/340
м. Вышиковский, с. Добродеевка	470/235	540/270
м. Щербинское, д. Савичка	960/480	1200/600

В настоящей работе мы оценили и спрогнозировали годовые эффективные дозы внешнего облучения сельскохозяйственных рабочих, проживающих и работающих в наиболее загрязненных муниципалитетах Гордеевского, Злынковского района Брянской области. Высокая вариабельность загрязнения почвы ¹³⁷Cs обуславливает значительный разброс результатов оценки. В соответствии с полученными результатами нам удалось оценить ориентировочно

допустимое время пребывания сельскохозяйственных рабочих на наиболее загрязненных полях муниципалитетов Гордеевского и Злынковского районов в 2025 и 2030 г.

Не превышение времени пребывания на сельскохозяйственных полях, прилегающих к поселку Мирному и селу Торшинскому, уменьшит риски негативных последствий для рабочих.

ASSESSMENT OF THE DOSES OF AGRICULTURAL WORKERS WHEN WORKING IN THE CONTAMINATED AREA

Orlov P.M., Akanova N.I., Ermakov A.A.

Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Pryanishnikova st. 31a, Moscow, Russian Federation, 127434

Estimates of soil contamination levels of ¹³⁷Cs in the Gordeevsky and Zlynkovsky districts of the Bryansk region in 2014, 2025 and 2030 were carried out. A high variability of maintenance at the level of municipalities and rural settlements was noted. In the Gordeevsky district, Mirninskoye municipality, the village of Mirny, the standard interval for the content of ¹³⁷Cs in the soil in 2025 was 0.7-40.3 Ci/km²; in the municipality of Tvorshinsky, the village of Tvorshinskoye 1.3-92.6 Ci/km². High levels of ¹³⁷Cs are also observed in municipalities and rural settlements of the Zlynkiv district. In 2025, the upper limits of additional effective annual doses of external exposure from ¹³⁷Cs in all municipalities of these districts will not exceed the requirements of radiation safety standards for the population of 1 mSv/year. In some rural settlements

with an abnormally high content of ^{137}Cs in the soil, the capacities of effective external irradiation for agricultural workers carrying out agricultural or rehabilitation work have been calculated. The approximate permissible annual time of their stay (200-1200 hours/year) in anomalously heavily contaminated fields was estimated.

Keywords: *soil, contamination level ^{137}Cs , additional annual effective dose, agricultural workers*

УДК 630

ВОЗМОЖНОСТИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В РАДИАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСА

Радин А.А.¹, Митрофанов Е.М.¹, Раздайводин А.Н.^{2,а}, Радин С.А.³

¹ Мытищинский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, Российская Федерация

² Федеральное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15, Российская Федерация

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 394087, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8, Российская Федерация

e-mail: ^а info@roslesrad.ru

Изучены возможности использования наземного лазерного сканирования применительно к задачам лесной радиоэкологии на примере ручного лазерного сканера FJD Trion P1. Выполнено пробное сканирование стационарного участка радиационного мониторинга леса (РМЛ) в зоне радиоактивного загрязнения на территории Брянской области. Проведена обработка полученных данных. Установлена возможность получения 3D-моделей древесной растительности и рельефа обследованных участков для изучения процессов миграции и накопления радионуклидов в лесных экосистемах. Использование сканера позволяет существенно сократить затраты времени на выполнение полевых работ по определению таксационных характеристик и пространственной структуры насаждений. Наибольшая эффективность работ может быть достигнута при использовании рассматриваемой технологии совместно с традиционными методами измерений.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, лазерный сканер, лидар, радиационная экология леса, радиоактивное загрязнение лесов, радиационный мониторинг лесов, цезий-137

Введение

Радиоактивное загрязнение лесов носит сложный характер и отличается высокой мозаичностью [1, 2]. Изучение процессов накопления и миграции радионуклидов в компонентах лесных экосистем требует информации о таксационных характеристиках исследуемых древостоев, их пространственной структуре, рельефе и т.д. Сбор точной пространственной информации традиционными методами отличается высокой трудоемкостью и длительностью полевых работ.

В настоящее время лазерное сканирование рассматривается как перспективное направление в лесотаксационных исследованиях [3] и может быть использовано для задач лесной радиоэкологии.

Цель работы: изучить возможности применения наземного лазерного сканирования в радиационном мониторинге леса.

Задачи:

– Провести тестовую съемку стационарного участка РМЛ с использованием ручного лазерного сканера FJD Trion P1.

– Оценить возможности лидарной съемки для анализа таксационных характеристик, пространственной структуры насаждения и рельефа стационарных участков РМЛ.

Материалы и методы

Ручной лазерный сканер (лидар) FJD Trion P1 оснащен лазером класса 1 и поддерживает технологии инерциальной навигации, а также одновременной локализации и картографирования – **SLAM (Simultaneous localization and mapping)**. Поле зрения сканера составляет $360^\circ/59^\circ$, скорость сканирования 200000 т/сек. Рабочая дальность 40 м. Заявляемая производителем погрешность измерения – 20 мм. Прибор весит существенно легче большинства аналогов (~1,1 кг), и может работать в диапазоне температур от -10 до $+45^\circ\text{C}$. Исполнение прибора соответствует классу пыли-влагозащищенности IP54.

С помощью сканера была выполнена съемка стационарного участка радиационного мониторинга леса в зоне радиоактивного загрязнения в ГКУ Брянской области «Злынковское лесничество». Стационарный участок площадью 0,25 га (50 x 50 м) представляет собой лесные культуры 1986 г. созданные на землях, выведенных из сельскохозяйственного оборота после аварии на Чернобыльской АЭС. На момент первичного обследования (1993 г.) данная территория относилась к зоне загрязнения свыше 40 Ки/км². В настоящее время плотность загрязнения почвы цезием-137 составляет ~ 740 кБк/м². Схема смещения культур Д-Д-Д-Е-Е-Е-С-С-С-Е-Е-Е-Д-Д-Д-Е-Е-Е, фактическое расстояние между рядами ~ 3 м. Участок является достаточно сложным для сканирования, т.к. здесь сочетаются участки как с хорошей, так и неудовлетворительной просматриваемостью.

Съемка проводилась по маршруту в виде сходящейся спирали от границ к центру участка.

Преобразование данных в проприетарном формате проводилась в программе FJD Trion Model, поставляемой с прибором. Далее полученный файл облака точек (*.las) обрабатывался в программе CloudCompare (распространяется по лицензии GNU General Public License version 3.0) с расширением 3DFin [4, 5].

Результаты и обсуждение

Деляночные столбы, ограничивающие участок, четко выделяются в облаке точек. Линейные размеры участка соответствуют измеренным классическим способом (с помощью мерной ленты).

Стволы деревьев в рядах дуба и сосны были идентифицированы полностью, для большинства из них в автоматическом режиме были определены диаметры на высоте 1,3 м. Идентификация стволов в рядах ели составила менее 50%, что может быть связано с низким уровнем начала крон (ветви живые и отмершие ветви опускаются до 1 м от уровня земли и ниже. Идентификацию крон и определение высот в автоматическом режиме выполнить не удалось. Была также построена модель рельефа участка.

Прибор может существенно повысить эффективность полевых работ (определение структуры насаждений и рельефа участков), однако не позволяет полностью отказаться от традиционных методик измерений. Дальнейшее повышение эффективности лазерного сканирования можно обеспечить следующими путями:

1. Оптимизация маршрута съемки с учетом особенностей конкретных участков
2. Использование прибора с интегрированным ГНСС-приемником в режиме RTK (real time kinematic).
3. Проведение работ в оптимальных условиях: в осенний период после опадения листвы и до появления устойчивого снегового покрова.
4. Использование сканера с рабочей дальностью до 70 м и более.

5. Подбор и оптимизация программного обеспечения для обработки результатов.

6. Проведение первичной обработки в полевых условиях, для проведения, при необходимости, повторной съемки.

Планом дальнейших работ предусматривается верификация полученной цифровой модели рельефа и пространственной структуры древостоя с использованием классических технологий.

Выводы

Лазерный сканер FJD Trion P1 позволяет проводить сканирование стационарных участков и временных пробных площадей в лесах, загрязненных радионуклидами. Используемое программное обеспечение дает возможность построения 3D-моделей обследованных участков, идентификации древесных растений и их пространственного размещения, а также определения диаметров стволов. Полевые работы с использованием сканера выполняются значительно быстрее, чем классическими методами.

Ограничениями использования прибора служат проходимость и просматриваемость лесных участков, погодные условия и небольшая дальность сканирования, ограничивающая возможности определения высот деревьев и размеров крон. Наземные ручные лазерные сканеры могут рассматриваться, как эффективный инструмент, дополняющим использование традиционных дендрометрических и геодезических приборов. Использование технологии наземного лазерного сканирования также поможет сокращению времени работы на участках с высокими уровнями загрязнения и обеспечению соблюдения норм радиационной безопасности (НРБ99/2009) при проведении исследований.

Наземное лазерное сканирование является перспективным методом исследований в области лесной радиэкологии, как источник качественных и подробных пространственных данных.

Список литературы

1. Радиозэкологические проблемы в лесах России / А.Н. Раздайковин, И.И. Марадудин, А.И. Радин, Д.Ю. Ромашкин // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3 С. 116-133.
2. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М.: Наука, 1999. 268 с.
3. Устинов С.М., Митрофанов Е.М., Устинов М.В. Исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высот и диаметров деревьев в сосновых насаждениях // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2023. № 1(70). С. 134-140. DOI 10.34655/bgsha.2023.70.1.016.

4. CloudCompare – 3D point cloud and mesh processing software. URL: <http://www.cloudcompare.org> (дата обращения: 09.09.2024).

5. 3DFin: a software for automated 3D forest inventories from terrestrial point clouds / D. Laino, C. Cabo, C. Prendes [et al.] // *International Journal of Forest Research*. 2024. V. 97. Issue 4. PP. 479-496. doi.org/10.1093/forestry/cpae020.

GROUND-BASED LASER SCANNING CAPABILITIES IN RADIATION MONITORING OF FORESTS

Radin A.A.¹, Mitrofanov E.M.¹, Razdaivodin A.N.², Radin S.A.³

¹Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University, 1 Institutskaya str. 1, Mytishchi, Moscow region, Russian Federation, 141005

²All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russian Federation, 141202

³Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Timiryazeva str. 8, Voronezh, Voronezh region, Russian Federation, 394087

The possibilities of using ground-based laser scanning in relation to the tasks of forest radioecology are studied using the example of a hand-held laser scanner FJD Trion P1. A trial scan of a stationary forest radiation monitoring site (RMS) in a radioactive contamination zone in the Bryansk region was performed. The received data has been processed. The possibility of obtaining 3D models of woody vegetation and the relief of the surveyed areas to study the processes of migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems has been established. The use of the scanner allows you to significantly reduce the time spent on field work to measure the taxation characteristics and spatial structure of forest stands. The greatest efficiency of work can be achieved by using the technology in question in conjunction with traditional measurement methods.

Keywords: ground-based laser scanning, laser scanner, Light Detection and Ranging, forest radiation ecology, radioactive contamination of forests, radiation monitoring of forests, caesium-137

УДК 574.2: 595.142.39

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПРИ РАДИЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЧВЫ НА БИОМАРКЕРЫ СТРЕССА У ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ *EISENIA FETIDA*

Рыбак А.В.^а, Майстренко Т.А.

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28, Российская Федерация

e-mail:^а canewa.anuta@yandex.ru

В настоящей работе изучали влияние субстратов, содержащих загрязненную тяжелыми металл(оид)ами и естественными радионуклидами почву, на дождевых червей *Eisenia fetida*. Выживаемость особей, их репродуктивную способность и жизнеспособность целомических клеток животных после воздействия токсикантов оценивали в течение 56 дней. Статистически значимое уменьшение выживаемости дождевых червей по сравнению с контролем отмечено после воздействия субстратов с содержанием загрязнённой почвы 10 % и более. Тогда как токсическое воздействие ТМ и РН во всех субстратах привело в 10-кратному снижению репродуктивного потенциала животных. Ответ клеточного биомаркера зависел от интенсивности и продолжительности воздействия. Анализ накопления красителя лизосомами *E. fetida* после 56 дней инкубирования в умеренно загрязненных субстратах показал более высокую чувствительность биомаркера к воздействию цитотоксичных компонентов, чем в 7-дневном эксперименте.

Ключевые слова: дождевые черви, целоциты, биологические эффекты, тяжёлые металлы, радионуклиды

Антропогенная деятельность и поступление в почву разнообразных химических веществ, в том числе радиоактивных, может приводить к негативным последствиям для организмов. Воздействие комплекса абиотических факторов разной природы, интенсивности и продолжительности затрудняет оценку экологического состояния природно-техногенных систем. Дождевые черви, составляющие значительную часть биомассы почвенной макрофауны, являются важнейшим компонентом сообществ многих наземных экосистем. Поэтому виды *Eisenia fetida* или *Eisenia andrei* используют как биоиндикаторы экологического состояния почв [1, 2], а также в лабораторных тест-системах для оценки токсичности химических веществ [3, 4]. Выявление нарушений в отдельных структурах и системах организмов при загрязнении почвы химическими веществами позволяет на раннем этапе воздействия оценить состояние среды и степень токсичности агентов.

В настоящей работе определяли выживаемость, репродуктивную способность, массу организмов и жизнеспособность целомочитов дождевых червей *Eisenia fetida* после воздействия искусственных субстратов, содержащих в составе загрязненную металлами/металлоидами (ТМ) и радионуклидами (РН) почвы. Эффект абиотического стресса на организменные и клеточные биомаркеры оценивали для животных после 56 дней воздействия.

Образцы загрязненной почвы собирали из верхнего 20-сантиметрового слоя на одном из участков техногенно нарушенной территории с повышенным содержанием в почве ТМ и РН. Почвенные субстраты К, С5, С10, С25 и С50 с содержанием загрязненной почвы в составе 0, 5, 10, 25 и 50 % готовили на основе искусственной OECD почвы. Химический анализ репрезентативных образцов загрязненной почвы и компонентов OECD почвы [3, 4] выполнен в испытательных лабораториях «Экоаналит» и миграции радионуклидов и радиохимии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Половозрелых дождевых червей *E. fetida* массой около 300 мг экспонировали 56 дней в загрязненных ТМ и РН субстратах при температуре 21 ± 2 °С, световом периоде день/ночь 16/8 ч и постоянной влажности почвенной среды. Для определения выживаемости и репродукции использовали по 10 животных на контейнер (по три повторности на вариант), жизнеспособности целомочитов – 6-8 особей на вариант.

В течение экспозиции ежедневно регистрировали количество живых особей и количество коконов в каждом контейнере. Для оценки жизнеспособности клеток целомочической жидкости червей, инкубированных в субстратах в течение 7 или 56 дней, промывали в воде, взвешивали, помещали в чашки Петри на влажную фильтровальную бумагу и выдерживали двое суток для очистки кишечника. Целомочиты собирали с использованием неинвазивного метода экстракции, описанного [5]. Для оценки жизнеспособности клеток *E. fetida* использовали анализ поглощения целомочитами нейтрального красного (НК). Накопление красителя целомочитами определяли спектрофотометрически согласно [6] (с небольшими модификациями). Оптическую плотность измеряли при длине волны 540 нм.

Статистическая обработка данных выполнена на основе методов описательной статистики, анализа выживаемости Каплана-Майера и непараметрических Н-критерия Краскела-Уоллиса и U-критерия Манна-Уитни для независимых выборок с использованием пакетов программ MS Excel 2016 и GraphPad Prism 8.

Результаты химического анализа образцов загрязненной почвы показали, что концентрации ^{226}Ra , ^{238}U , As и Pb в спектре изученных токсикантов (Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, As, Mn, ^{232}Th , ^{210}Po , ^{210}Pb) были наиболее высокими, превышая на два-три порядка фоновые значения для данного района. В наиболее загрязненном субстрате С50 удельная активность ^{226}Ra достигала 44.6 кБк/кг, содержание ^{238}U , As и Pb – 0.09, 0.53 и 1.88 г/кг, соответственно. Содержание органического вещества варьировало от 1.8 до 4.1 при pH почвенных субстратов 6.02-6.29, что при еженедельном кормлении позволяло инкубировать дождевых червей.

Кривые выживаемости за период наблюдения 56 дней представлены на рисунке 1. Гибель животных в контрольной почве и субстрате С5 не отмечали, тогда как в более загрязненных образцах С10, С25 и С50 регистрировали снижение выживаемости, начиная с 15, 12 и 3 дня, а уменьшение числа живых особей на 10 % происходило на 46, 25 и 15 день воздействия, соответственно. Различия между этими вариантами и контролем оказались статистически значимыми ($p < 0.0005$). Медианная выживаемость животных в наиболее загрязненной смеси С50 составила 24 ± 1 день.

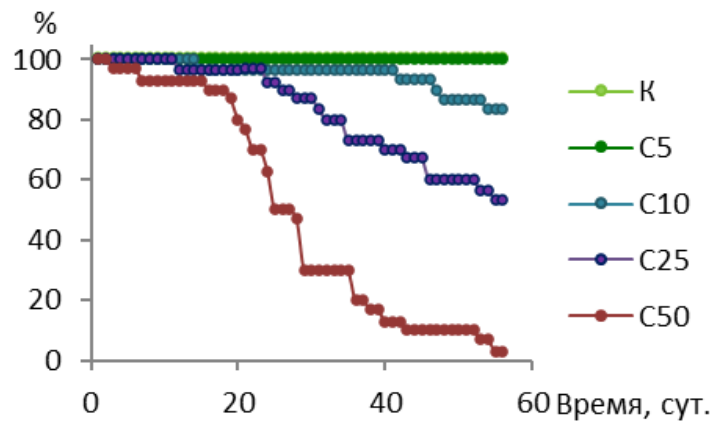


Рисунок 1. Кривые выживаемости дождевых червей *Eisenia fetida*, инкубированных в субстратах К, С5, С10, С25 и С50 с содержанием загрязненной почвы 0, 5, 10, 25 и 50 %

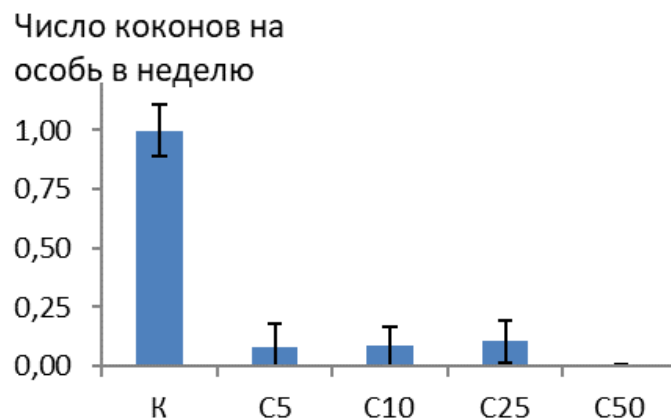


Рисунок 2. Среднее число коконов на особь в неделю при инкубировании *Eisenia fetida* в субстратах К, С5, С10, С25 и С50 с содержанием загрязненной почвы 0, 5, 10, 25 и 50 %, соответственно

Содержащиеся в составе субстратов ТМ и РН повлияли и на репродуктивный потенциал животных (рис. 2). По сравнению с искусственной OECD почвой количество произведенных коконов снизилось более чем в 10 раз.

Накопление НК в целомицитах, выделенных из дождевых червей после воздействия загрязненных субстратов, оценивали относительно значений оптической плотности, измеренных для животных из контрольной выборки. Не отмечено токсического

влияния на лизосомы целомицитов при инкубировании *E. fetida* в субстрате С5. Однако после воздействия субстратов С10 и С25 отмечено уменьшение накопления красителя в клетках червей в два раза ($p < 0.05$) по сравнению с контрольным вариантом (рис. 3). При этом для животных из двух наиболее загрязненных субстратов (С10 и С25) различий в поглощении НК целомическими клетками между группами не выявлено: средние значения определяемого параметра составили 43 и 49 %, соответственно.

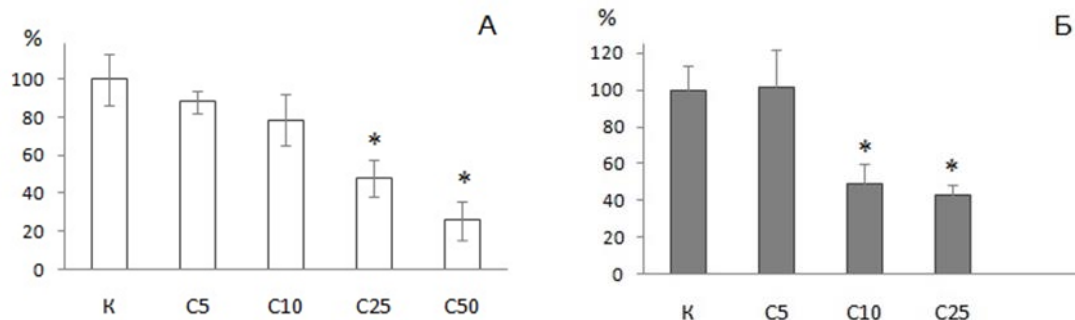


Рисунок 3. Накопление нейтрального красного в целомицитах дождевых червей *E. fetida* относительно контроля после экспонирования в течение 7 (**А**) и 56 (**Б**) дней в субстратах К, С5, С10 и С25, содержащих 0, 5, 10 и 25 % загрязненной почвы, соответственно.
* – отличие от контроля достоверно при $p < 0.05$

Оценка значений биомаркеров, отражающих влияние содержащихся в среде ТМ и РН на разные уровни организма, показала, что анализ накопления нейтрального красного целомическими клетками *E. fetida* является чувствительным инструментом при оценке цитотоксичности загрязненной почвы. Статистически значимое уменьшение выживаемости дождевых червей по сравнению с контролем отмечено после воздействия субстратов с содержанием загрязнённой почвы 10 % и более. Тогда как токсическое воздействие ТМ и РН во всех субстратах привело в 10-кратному снижению репродуктивного потенциала животных. Ответ клеточного биомаркера зависел от интенсивности и продолжительности воздействия. При увеличении концентраций токсикантов в среде до сублетальных наблюдали снижение стабильности лизосомальных мембран целомицитов. Анализ накопления красителя лизосомами *E. fetida* после 56 дней инкубирования в умеренно загрязнённых субстратах показал более высокую чувствительность биомаркера к воздействию цитотоксичных компонентов, чем в 7-дневном эксперименте.

Исследование проведено в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600024-5).

Список литературы

1. Biological assessment of contaminated shooting range soil using earthworm biomarkers / J. Česynaitė, M. Praspaliauskas, N. Pedišius, G. Sujetovienė // *Ecotoxicology*. 2021. V. 30. № 10. PP. 2024-2035. doi: 10.1007/s10646-021-02463-w.
2. Vullo A.I., Vullo D.L., Basack S.B. Assessment of intensive periurban agriculture soil quality applying biomarkers in earthworms // *J Environ Manage*. 2023. V. 344. Article number: 118535. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118535.
3. OECD. Guideline for testing of chemicals. Earthworm. Acute Toxicity Tests. V. 207 OECD. Paris. 1984.
4. OECD Guideline for the testing of chemicals. Earthworm Reproduction Test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*). V. 222 OECD. Paris. 2016.
5. A non-evasive technique for sequential collection of earthworm (*Lumbricus terrestris*) leukocytes during subchronic immunotoxic studies / G.S. Eyambe, A.J. Goven, L.C. Fitzpatrick [et al.] // *Lab Anim*. 1991. V. 25. PP. 61-67.
6. Effects of soil organic matter content on cadmium toxicity in *Eisenia fetida*: Implications for the use of biomarkers and standard toxicity tests / A. Irizar, M.P. Rodríguez, A. Izquierdo [et al.] // *Arch Environ Contam Toxicol*. 2015. V. 68. PP. 181-192. doi: 10.1007/s00244-014-0060-4.

THE EFFECT OF SOIL CONTAMINATED DURING RADIUM PRODUCTION ON STRESS BIOMARKERS IN THE EARTHWORMS *EISENIA FETIDA*

Rybak A.V., Maystrenko T.A.

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Kommunisticheskaya st. 28, Syktyvkar, Russian Federation, 167982

In this work, the effect of soil contaminated with heavy metal(oid)s and natural radionuclides on earthworms *Eisenia fetida* was studied. The survival, reproduction and viability of coelomic cells were evaluated after earthworms were

exposed to toxicants for 56 days. A statistically significant decrease in the survival of earthworms compared with the control was noted after exposure to substrates containing of 10 % or more. Whereas the toxic effects of heavy metals and radionuclides in all substrates led to a 10-fold decrease in the reproductive potential of animals. The response of the cellular biomarker depended on the intensity and duration of exposure. Analysis of dye accumulation by *E. fetida* lysosomes after 56 days of incubation in moderately contaminated substrates showed a higher sensitivity of the biomarker to the effects of cytotoxic components than in the 7-day experiment.

Keywords: earthworms, coelomocytes, biological effects, heavy metals, radionuclides

Anthropogenic activity and the entry of various chemicals into the soil can lead to negative consequences for organisms. Earthworms, which make up a significant part of the biomass of the soil macrofauna, are an essential component of the communities of many terrestrial ecosystems. In this work, the survival, reproductive ability, body mass and viability of coelomocytes of earthworms *Eisenia fetida* were determined after exposure to artificial substrates containing soil contaminated with metals/metalloids (HM) and radionuclides (RN). The effect of abiotic stress on organismal and cellular biomarkers was evaluated for animals after 56 days of exposure.

The results of chemical analysis of contaminated soil samples showed that the concentrations of ^{226}Ra , ^{238}U , As and Pb in the spectrum of the studied toxicants (Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, As, Mn, ^{232}Th , ^{210}Po , ^{210}Pb) were the highest, exceeding by two to three orders of magnitude the background values for the area. In the most polluted C50 substrate, the specific activity of ^{226}Ra reached 44.6 kBq/kg, the content of ^{238}U , As and Pb was 0.09, 0.53 and 1.88 g/kg, respectively. The content of organic matter varied from 1.8 to 4.1 at a pH of soil substrates of 6.02-6.29, which allowed incubation of earthworms with weekly feeding. Animal mortality in the control soil and substrate C5 were not noted, whereas in more contaminated samples C10, C25 and C50, a decrease in survival was recorded starting from 15, 12 and 3 days, and a 10 % decrease in the number of living individuals occurred at 46, 25 and the 15th day of exposure, respectively. The differences between these variants and the control were statistically significant ($p < 0.0005$). The median survival rate of animals in the most polluted C50 mixture was 24 ± 1 day.

Compared to the artificial OECD soil, the number of cocoons produced has decreased by more than 10 times. The accumulation of NK in coelomocytes isolated from earthworms after exposure to contaminated substrates was evaluated relative to the optical density values measured for animals from the control sample. There was no toxic effect on the lysosomes of coelomocytes during incubation of *E. fetida* in the C5 substrate. However, after exposure to C10 and C25 substrates, there was a two-fold decrease in the accumulation of dye in worm cells ($p < 0.05$) compared with the control variant. At the same time, for animals from the two most polluted substrates (C10 and C25), there were no differences in the absorption of NK by coelomic cells between the groups: the average values of the determined parameter were 43 and 49 %, respectively.

A statistically significant decrease in the survival rate of earthworms compared with the control was noted after exposure to substrates with a contaminated soil content of 10% or more. Whereas the toxic effects of HM and RN in all substrates led to a 10-fold decrease in the reproductive potential of animals. With an increase in the concentrations of toxicants in the medium to sublethal, a decrease in the stability of the lysosomal membranes of coelomocytes was observed. Analysis of dye accumulation by *E. fetida* lysosomes after 56 days of incubation in moderately contaminated substrates showed a higher sensitivity of the biomarker to the effects of cytotoxic components than in the 7-day experiment.

The study was conducted within the framework of the state task of the IB FSC Komi SC UB RAS (No. 122040600024-5).

УДК 631:895:633.13:631.45

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГУМИТОН ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОВСА НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОМ ЧЕРНОЗЕМЕ

Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Иванкин Н.Г., Петров К.В., Суслов А.А., 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 радиоактивно загрязненном черноземе обыкновенном показано, что внесение в почву комплексного удобрения ФосАгро NPK (8:20:30) способствовало повышению сырой биомассы овса на 37, зерна – на 22 % по сравнению с контролем и резко снижало накопление ^{137}Cs в сырой биомассе в 2.2 и в зерне в 2.0 раза, соответственно. Обработка органо-минеральным комплексом на основе торфа Гумитон растений овса в фазу выхода в трубку на почве с ФосАгро NPK повысила сырую биомассу на 5 % по сравнению с вариантом без использования препарата и уменьшило накопление ^{137}Cs в зеленой массе овса на удобренной почве в 1.4 раза и в 1.2 раза на почве, содержащей ФосАгро NPK, по сравнению с вариантами без использования препарата, соответственно. Применение Гумитона на удобренной почве достоверно не повлияло на урожай зерна, но вызвало повышение массы соломы на 31.5 %, а на удобренной ФосАгро NPK почве повысило массу соломы на 8 % по сравнению с вариантами без использования препарата, соответственно. Использование Гумитона на удобренной почве достоверно снизило активность ^{137}Cs в зерне овса на 6, а на почве, удобренной ФосАгро NPK, на 7 % по сравнению с вариантами без обработки.

Ключевые слова: почва, ФосАгро NPK, Гумитон, овес, сырая биомасса, зерно, накопление ^{137}Cs

Введение

В результате техногенной катастрофы на Чернобыльской АЭС наиболее высокие уровни загрязнения в РФ радиоактивными веществами (РВ) отмечены в Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областях [1, 2]. На основе данных о содержании радионуклидов (РН) в сельскохозяйственной продукции проводятся реабилитационные работы по восстановлению почв на техногенно загрязненных территориях [3]. Получение высококачественной сельскохозяйственной продукции, в частности овса, с высокой (до 5-6 т/га) урожайностью, в том числе на радиоактивно загрязненных почвах, является приоритетной задачей для достижения продовольственной безопасности РФ. 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. [4]; 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 %). Содержит микроэлементы (В, Мо, Мп), N – 12 %, P_2O_5 – 23 %, K_2O – 30 %.

Механизм действия Гумитона основывается на активировании физиологических и биохимических процессов в растениях под действием содержащихся в препарате биологически активных веществ. Применение Гумитона повышает иммунитет растений, увеличивает эффективность корневого питания растений, в результате повышается урожайность сельскохозяйственных культур и качество производимой продукции.

Гумитон используется для некорневой обработки вегетирующих растений методом опрыскивания; а также обработки посадочного материала. Он не имеет запаха, безвреден, хорошо растворим в воде, совместим с большинством используемых минеральных удобрений и средств защиты растений. По причине четко выраженного антистрессового действия

препарата обработку Гумитоном не следует совмещать с применением гербицидов. Оптимальный срок обработки посевов Гумитоном – 7 суток до или после применения гербицидов. При листовой обработке растений концентрат разводится водой в соотношении 1:300 л рабочего раствора на 1 га посевов; 1-2-кратная обработка Гумитоном вегетирующих растений (1 л/га) проводится в фазы наиболее активного роста и потребления питательных веществ [5, 6].

Материалы и методы

В вегетационном опыте на черноземе обыкновенном среднесуглинистом (Плавский район Тульской области) изучали действие ФосАгро NPK и Гумитона на продуктивность овса (*Avena sativa*) сорт Яков и поступление ^{137}Cs в зеленую массу из загрязненной почвы. Овес – одна из основных зональных кормовых и зерновых культур, выращиваемых в Нечерноземной зоне РФ.

Овес сорт Яков включен в Госреестр по Северо-Западному, Центральному и Центрально-Черноземному регионам. Рекомендован для возделывания в Калининградской, Калужской, Московской, Смоленской, Воронежской и Курской областях. Сорт среднеспелый, вегетационный период 82-95 дней. Масса 1000 зерен 34-42 г. Устойчивость к полеганию выше средней. Содержание белка 11.9-12.8 %. [7].

Комплексное удобрение ФосАгро NPK (8:20:30) – удобрение ценно для культур, требующих высокого содержания в почве доступного Р и К. Высокоэффективно на почвах с низким содержанием подвижного К, легких по гранулометрическому составу и с промывным водным режимом [8]. Применяется в дозе 0.3-0.5 т/га.

Агрохимические показатели почвы: pH_{KCl} 6.34; Нг – 3.96 смоль(экв)/кг почвы; содержание гумуса – 6.40 %; Са и Mg – 26.40 и 5.29 ммоль(экв)/100 г почвы; P_2O_5 и K_2O – 290 и 171 мг/кг почвы, соответственно.

Сосуд вмещал 5.5 кг почвы. ФосАгро NPK ($\text{N}_{60}\text{P}_{150}\text{K}_{230}$ мг/кг почвы) и ^{137}Cs (раствор $^{137}\text{CsCl}$ – 50 кБк/кг почвы) внесены в почву перед посевом. Овес сеяли по 25 шт. семян на сосуд. К моменту уборки оставили по 15 растений. Обработка Гумитоном (1 л/га) вегетирующих растений проводилась в фазу

выхода в трубку овса. Повторность опыта 6-кратная. Проведение вегетационного опыта, проводили по методике З.И. Журбицкого [9].

Схема опыта: 1. ^{137}Cs ; 2. ^{137}Cs + Гумитон; 3. ФосАгро NPK; 4. ФосАгро NPK + ^{137}Cs + Гумитон.

Растения половины сосудов каждого варианта убирали на зеленую массу в фазу цветения, второй половины сосудов – на зерно в фазу полной спелости овса. После уборки овса определяли биометрические показатели: высота растений, общая биомасса, масса зерна и соломы.

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 на полупроводниковом гамма-спектрометре (Canberra) с программным обеспечением Genie-2000.

Экспериментальные данные анализировали методами непараметрической статистики по программе MS Excel. Статистическую значимость различий оценивали по НСР (при 95 %-ном уровне значимости).

Результаты и их обсуждение

В вегетационном опыте на черноземе обыкновенном среднесуглинистом изучали действие ФосАгро NPK и Гумитона на продуктивность и биометрические показатели зеленой массы и урожая овса сорт Яков и поступление ^{137}Cs из почвы в растения.

Результаты проведенных ранее производственных испытаний эффективности Гумитона и ФосАгро NPK при выращивании ячменя на радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых супесчаных

почвах Новозыбковского района Брянской области показали, 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 (до 634.4 кБк/м² или 17.1 Ки/км²), содержание ^{137}Cs 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 по сравнению с контролем. Гумитон повышал урожай зерна ячменя на 24-29 % Снижение перехода ^{137}Cs в зерно при применении Гумитона составило 2.3 раза [10].

Результаты вегетационного опыта на дерново-подзолистой супесчаной радиоактивно загрязненной почве показали, что внесение ФосАгро NPK способствовало повышению массы 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 Гумитон на почве без удобрений достоверно повысила сырую биомассу на 6 % и снизила Кн ^{137}Cs на почве с ФосАгро NPK в 1.1 раза по сравнению с вариантами без использования препарата. Применение Гумитона на почве с ФосАгро NPK повысило массу соломы на 28 % и снизило Кн ^{137}Cs на неудобренной почве в 1.1 раза по сравнению с вариантом без обработки [11].

В опыте на черноземе показано, что внесение в почву ФосАгро NPK способствовало достоверному увеличению средней высоты растений овса на 5.4 % и сырой биомассы на 37 %. Обработка Гумитоном овса в фазу выхода в трубку достоверно не повлияла на высоту растений. Действие Гумитона на сырую биомассу овса проявилось лишь в варианте с ФосАгро NPK, повышение составило 5.0 % (табл. 1).

Таблица 1

Продуктивность, биометрические показатели зеленой массы овса и накопление ^{137}Cs растениями в фазу цветения

Вариант	Высота растений, см	Общая биомасса, г/сосуд	Активность ^{137}Cs , Бк/кг	Кн ^{137}Cs
^{137}Cs	98.9	117.5	3130	0.063
^{137}Cs + Гумитон	98.2	118	2307	0.046
ФосАгро NPK+ ^{137}Cs	104.2	161	1437	0.029
ФосАгро NPK+ ^{137}Cs +Гумитон	109.0	169	1203	0.024
НСР ₀₅	5.8	7.5	163	0.004

Внесение в почву ФосАгро NPK резко (в 2.2 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 уменьшило накопление ^{137}Cs в зеленой массе овса на неудобренной почве в 1.4 раза и в 1.2 раза на почве с ФосАгро NPK, по сравнению с вариантами без Гумитона, соответственно (табл. 1).

После уборки урожая в фазу полной спелости овса было показано, что внесение в почву ФосАгро NPK способствовало увеличению продуктивности:

зерна на 28.2 % и соломы – на 86.7 %. Средняя высота растений при этом повысилась на 8.2 % по сравнению с контролем (^{137}Cs). Некорневая обработка Гумитоном овса на неудобренной почве достоверно не повлияла на высоту растений, а также на урожай, но выявило повышение массы соломы на 31.5 % по сравнению с вариантом без Гумитона. На почве с ФосАгро NPK применение Гумитона не повлияло на высоту растений и урожай зерна, но отмечено увеличение массы соломы на 8.0 % по сравнению с вариантом без препарата, соответственно (табл. 2).

В вегетационном опыте на черноземе показано, что внесение в почву ФосАгро NPK резко (в 2.0 раза или на 51.1 %) снизило накопление ^{137}Cs зерном овса. Использование Гумитона на неудобренной почве

достоверно снизило активность ^{137}Cs в зерне на 5.8, а на почве с ФосАгро NPK – на 7.0 % по сравнению с вариантами без Гумитона, соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Продуктивность, биометрические показатели овса и накопление ^{137}Cs зерном в фазу полной спелости

Вариант	Высота растений, см	Масса г/сосуд		Масса 1000 зерен, г	Активность ^{137}Cs , Бк/кг	$\text{Кн}^{137}\text{Cs}$
		зерна	соломы			
^{137}Cs	98.4	22.7	40.6	35.2	1722	0.034
^{137}Cs +Гумитон	97.7	23.0	53.4	36.3	1622	0.032
ФосАгро NPK+ ^{137}Cs	106.5	29.1	75.8	41.4	842	0.017
ФосАгро NPK+ ^{137}Cs + Гумитон	109.2	29.8	81.9	39.7	783	0.016
НСР ₀₅	5.2	1.1	5.0	2.0	54	

Заключение

Применение комплексного удобрения ФосАгро NPK (8:20:30) на черноземе обыкновенном среднесуглинистом способствовало повышению сырой биомассы овса на 37 %, зерна – на 28 % по сравнению с контролем и резко снижало $\text{Кн}^{137}\text{Cs}$ – в 2.2 раза в сырой биомассе и в 2.0 в зерне, соответственно.

Обработка Гумитоном растений в фазу выхода в трубку на почве с ФосАгро NPK достоверно повысила сырую биомассу овса на 5 % по сравнению с вариантом без использования препарата. Применение Гумитона достоверно уменьшило накопление ^{137}Cs в зеленой массе овса на неудобренной почве в 1.4 раза и в 1.2 раза на почве с ФосАгро NPK, по сравнению с вариантами без Гумитона, соответственно.

После уборки овса в фазу полной спелости показано, что применение Гумитона на неудобренной почве не повлияло на урожай зерна, но вызвало повышение массы соломы на 31.5 %, а на почве с ФосАгро NPK повысило массу соломы на 8 % по сравнению с вариантами без Гумитона, соответственно.

Применение Гумитона на неудобренной почве достоверно снизило активность ^{137}Cs в зерне овса на 6, а на почве с ФосАгро NPK – на 7 % по сравнению с вариантами без применения препарата, соответственно.

Список литературы

1. Агроэкология / Под редакцией В.А. Черникова и А.И. Чекереса. М.: Колос, 2000. 536 с.
2. Алексахин Р.М. Научные основы ведения сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях, обеспечивающего получение продукции, соответствующей нормативам. Обнинск, 2004. 110 с.
3. 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.

4. Патент на изобретение № 2709737. Биологически активный органо-минеральный комплекс и способ его получения / Н.И. Санжарова, А.Н. Ратников, К.В. Петров, Д.Г. Свириденко, А.А. Суслов, И.А.Иванов, Н.Г. Иванкин. Описание изобретения к патенту. Бюл. № 35. 19.12.2019. 6 с.

5. Органо-минеральный комплекс Гумитон как элемент адаптивной технологии возделывании озимой пшеницы в Брянской области / А.А. Суслов, А.Н. Ратников, Д.Г. Свириденко [и др.] // Агротехнический вестник. 2020. № 4. С. 24-29. DOI:10.24411/1029-2551-2020-10051.

6. 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. V. 8 I. 4. PP. 3374-3381.

7. Яков – сорт растения Овес яровой. URL: <https://dacha-dacha.ru/sorta/oves-yarovoj/yakov> (дата обращения 09.09.2024).

8. ФОСАГРО. URL: <https://www.phosagro.ru/production/fertilizer/azotno-fosforno-kalijnye-udobreniya/169553> / (дата обращения: 03.02.2023).

9. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного опыта. М.: Наука, 1968. 243 с.

10. 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. DOI: 10.17238/issn 2587-666X.2023.2.57.

11. Эффективность комплекса Гумитон при выращивании овса в условиях радиоактивного загрязнения / Д.Г. Свириденко, С.П. Арышева, А.А. Суслов [и др.] // Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов II международной

THE EFFECTIVENESS OF ORGANO-MINERAL COMPLEX GUMITON IN GROWING OATS ON RADIOACTIVELY CONTAMINATED CHERNOZEM

Sviridenko D.G., Arysheva S.P., Ivankin N.G., Petrov K.V., Suslov A.A., Balanova O.Yu.

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

According to the results of the vegetation experiment on radioactively contaminated ordinary chernozem, it was shown that the introduction of PhosAgro NPK complex fertilizer into the soil (8:20:30) contributed to an increase in crude biomass of oats by 37, grain by 22 % compared with the control and sharply reduced the accumulation of ^{137}Cs in crude biomass by 2.2 and in grain by 2.0 times, accordingly. Treatment of vegetating plants with organo-mineral complex based on Gumiton peat in the phase of oat release into the tube on soil with PhosAgro NPK increased the crude biomass by 5% compared with option without using the drug and reduced the accumulation of ^{137}Cs in green mass of oats on non-ventilated soil by 1.4 times and by 1.2 times on soil containing PhosAgro NPK, compared with non-drug options, respectively. When harvesting oats in full ripeness phase, use of Gumiton on non-ventilated soil did not significantly affect grain yield, but caused an increase in straw weight by 31.5 %, and on PhosAgro NPK - fertilized soil increased the weight of straw is 8 % compared to the options without the use of the drug, respectively. The use of Gumiton on non-fertilized soil significantly reduced the activity of ^{137}Cs in oat grain by 6, and on soil fertilized with PhosAgro NPK - by 7 % compared with non-treated options.

Keywords: soil, PhosAgro NPK, Gumiton, oats, crude biomass, grain, accumulation ^{137}Cs

According to the results of vegetation experiment on the basis of RIRAE on radioactively contaminated ordinary chernozem, it was shown that the introduction of PhosAgro NPK complex fertilizer into the soil (8:20:30) at a dose of $\text{N}_{60}\text{P}_{150}\text{K}_{230}$ mg/kg of soil contributed to an increase in the crude biomass of oats of the Yakov variety in the flowering phase by 37, grain weight – by 22 %, in the phase of full ripeness of oats, plant height - by 8 % in the phase of full ripeness, compared to the control, respectively. PhosAgro NPK fertilizer sharply reduced the accumulation of ^{137}Cs : in raw oat biomass by 2.2 times, in grain – by 2.0 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). 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. Treatment of vegetating plants with Gumiton at a dose of 1 l/ha in phase of entering the tube on soil with PhosAgro NPK increased

the crude biomass by 5 % compared with option without using the drug and reduced Accumulation coefficient of ^{137}Cs (AC) in green mass of oats on non-ventilated soil by 1.4 times and by 1.2 times on soil containing PhosAgro NPK, compared with non-drug options, respectively.

When harvesting oats in full ripeness phase, use of Gumiton on non-ventilated soil did not significantly affect grain yield, but caused an increase in straw weight by 31.5 %, and on PhosAgro-fertilized NPK soil increased the weight of straw is 8% compared to the options without the use of the drug, respectively. The use of Gumiton on non-fertilized soil significantly reduced the activity of ^{137}Cs in oat grain by 6, and on soil fertilized with PhosAgro NPK - by 7 % compared with non-treated options

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 chernozems.

ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ РОДА *ALLIUM* L.

Середин Т.М.^а, Ушакова О.В., Баранова Е.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: atimofey-seredin@rambler.ru

Насчитываются тысячи видов и форм пищевых овощных растений, множество разнообразных сортов. К ним с полным правом можно отнести и ряд растений рода *Allium* L. – луки, отличающиеся большим многообразием и насчитывающиеся, по разным оценкам от 750 до 900 видов во всем мире, из которых около 200 произрастает на территории России. До недавнего времени многообразие луков использовалось слабо, культивировалось только 15 видов, используемых в пищу и для лекарственных целей. По итогам многолетних исследований были получены данные по накоплению ⁹⁰Sr в луковицах лука репчатого, луковицах чеснока (отечественные и зарубежные образцы), стрелках чеснока озимого и в ложном стебле лука порея. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях по накоплению радионуклидов в различных пищевых органах луковых растений.

Ключевые слова: род лук, радионуклиды, 90-стронций, луковица, стрелки, ложный стебель

Методика исследований

Для проведения работы в 2020-2024 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. Исследования по определению радионуклидов проводили в ООО «Центр сертификации и экологического мониторинга агрохимической

службы Московский» масс-спектрометрическим методом.

Результаты исследований

Лук репчатый. В условиях изучаемых лет накопление радионуклида, в частности ⁹⁰Sr в луковицах 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 90-стронцию – 11.26 Бк/кг.

Как показали результаты исследований коллекционного питомника, по уровню накопления 90-стронция 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 90-стронция (Бк/кг) в луковицах лука репчатого (2022-2023 годы)

Сортообразец	⁹⁰ Sr	Ранг
Стардаст (белая окраска сухих чешуй)	7.03 ±0.70	1
Ли лу (лимонная окраска сухих чешуй)	12.13±1.20	3
Селекционный образец (Корея) 47-21 (желтая окраска сухих чешуй)	11.97 ±1.10	2
Ред Барон (красная окраска сухих чешуй)	12.34±1.20	4
Новатор (озимая форма) (коричневая окраска сухих чешуй)	12.83±1.20	5
ПДК	50	-

С целью выделения исходного материала для селекции на стабильно низкий уровень накопления 90-стронция 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 90-стронция. Выяснено, что лук репчатый не является активным аккумулятором

накопления экотоксикантов в условиях Московской области. В среднем по пяти сортам накопление ^{90}Sr составило 12.13 Бк/кг, при ранге 3. Необходимо отметить, что анализ полученных результатов свидетельствует, что при высоком уровне накопления ^{90}Sr растения сформировали более крупный листовую аппарат и имели более продуктивные луковицы по сравнению с растениями с низким уровнем накопления элемента.

В связи с этим нами был определен биохимический состав луковиц сортов лука репчатого. Содержание основных биохимических показателей было определено классическими методами. Накопление нитратов было определено и показано в порядке убывания: Red Baron > Ли лу > Новатор > Стардаст > 47-21. В связи с этим по накоплению ^{90}Sr и содержанию нитратов нет совпадений по рангам.

По содержанию витамина С в среднем было отмечено наибольшее накопление в сортах лука репчатого Стардаст и Red Baron (7.92 мг % и 7.98 мг % соответственно). Наименьшее содержание было отмечено у сортообразца Ли лу (5.28 мг %). Взаимосвязи с содержанием ^{90}Sr и витамином С были обратными у сорта Стардаст, было отмечено наименьшее содержание. А у красноокрашенного сорта Red Baron также

было отмечено высокое содержание (4 ранг накопления).

Необходимо отметить также высокое содержание суммы сахаров (10.71 %), которое совпало с пятым рангом накопления ^{90}Sr у сорта Новатор. Среднее содержание (8.29-9.89 %) по сумме сахаров было отмечено у группы сортов (Стардаст и Red Baron). А низкое нами было получено у корейского сортообразца 47-21 и составляло 4.78 %. Накопление моносахаров в луковицах изученных форм в среднем составляло 3.1 %. Взаимосвязи были отмечены у сорта Новатор по высокому содержанию моносахаров (3.89 %) и накоплением ^{90}Sr .

Чеснок озимый. Также нами были получены данные по накоплению ^{90}Sr в стрелках чеснока озимого (табл. 2). Ранги по накоплению были показаны в порядке возрастания.

Так, необходимо отметить, что максимальное накопление было отмечено у сорта София (11.5 Бк/кг). Среднее содержание в наших исследованиях мы получили у сортов Людмила и Мелиоратор.

Для понимания различий отечественных сортов и зарубежных образцов по накоплению ^{90}Sr в луковицах нами были получены данные в иранском и китайском чеснока (табл. 3).

Таблица 2

Содержание ^{90}Sr (Бк/кг) в стрелках чеснока озимого (2022-2023 годы)

Сортообразец	^{90}Sr	Ранг
Алексинский	5.9 ± 0.6	2
Людмила	7.4 ± 0.8	3
Мелиоратор	9.1 ± 1.0	4
София	11.5 ± 1.5	5
Скорпион	4.7 ± 0.5	1
ПДК	50	-

Таблица 3

Содержание ^{90}Sr (Бк/кг) в стрелках чеснока озимого (2022-2023 годы)

Сортообразец	^{90}Sr	Ранг
Отечественный*	4.1 ± 0.5	1
Иранский	5.16 ± 0.67	2
Китайский	5.90 ± 0.59	3
ПДК	50	-

* – среднее содержание

Анализируя полученные результаты по накоплению ^{90}Sr в луковицах чеснока отечественных и зарубежных образцов, не наблюдалось сильных различий и содержание, в среднем, было отмечено 5.05 Бк/кг.

Лук порей. Также нами были получены результаты накопления ^{90}Sr по коллекционному питомнику лука порея (рис. 1). В исследованиях использовали четыре сорта лука порея отечественной селекции: Брунгильда, Пикколо, Премьер и Сегун.

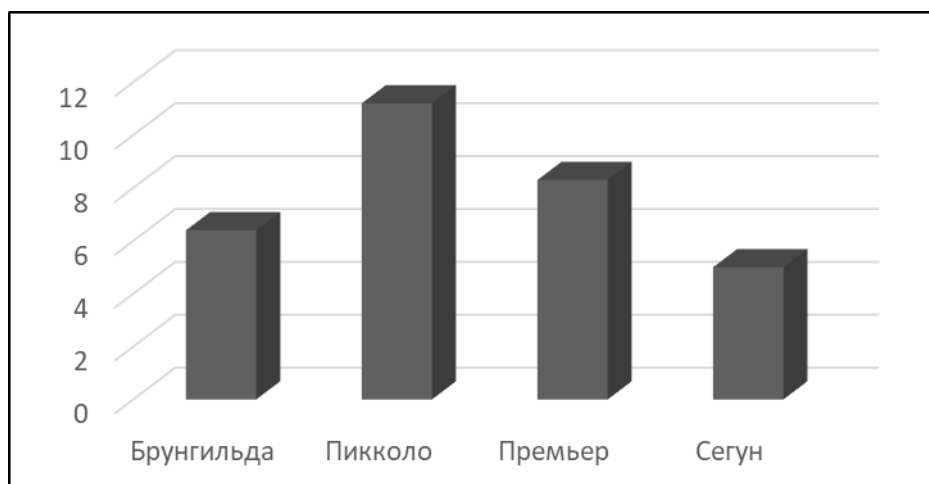


Рисунок 1. Накопление ⁹⁰-стронция в ложном стебле лука порея (2020-2021 годы), Бк/кг

Высокое накопление было отмечено в ложном стебле у сорта Пикколо (11.2 Бк/кг). Необходимо отметить и среднее накопление ⁹⁰-стронция у сортов: Брунгильда и Премьер (6.4 и 8.3 Бк/кг соответственно).

Т.М. Середин, А.В. Солдатенко, Е.В. Баранова [и др.] // Современные проблемы радиобиологии, радиозкологии и агроэкологии: сб. докл. международ. молодеж. конф. (Обнинск, 3-4 октября 2019 г.) Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. С.200-202.

Список литературы

1. Оценка коллекционного питомника лука порея (*Allium porrum* L.) для селекции на стабильно низкий уровень накопления радионуклидов / Т.М. Середин, А.В. Солдатенко, Е.В. Баранова, В.В. Шумилина // Овощи России. 2018. № 4. С.33-35.

2. Содержание радионуклидов в луке порее (*Allium porrum* L.) в условиях Московской области /

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. (9-12 августа 2016 г.). Большие Вяземы: Всероссийский НИИ фитопатологии, 2016. С. 531-536.

THE EFFECT OF THE ACCUMULATION OF RADIONUCLIDES ON THE QUALITATIVE COMPOSITION OF PLANTS OF THE *GENUS ALLIUM* L.

Seredin T.M., Ushakova O.V., Baranova E.V., Soldatenko A.V.

Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center»,
Selektsionnaya st. 14, VNISSOK, Moscow region, Odintsovo district, Russian Federation, 143072

There are thousands of species and forms of edible vegetable plants, many different varieties. They can rightfully include a number of plants of the *Genus Allium* L. – onions are very diverse and, according to various estimates, number from 750 to 900 -species worldwide, of which about 200 grow on the territory of Russia. Until recently, the variety of bows was poorly used, only 15 species were cultivated, used for food and medicinal purposes. However, recently interest in onions has increased due to the use of their nutritional and decorative qualities. Based on the results of long-term studies, data were obtained on the accumulation of ⁹⁰Sr in onion bulbs, garlic bulbs (domestic and foreign samples), winter garlic arrows and in the false stem of leeks. The results obtained will be used in further studies on the accumulation of radionuclides in various food organs of onion plants.

Keywords: onion genus, radionuclides, ⁹⁰-strontium, onion, arrows, false stem

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОСТИ АНТИОКСИДАНТНЫХ ФЕРМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ *PINUS SYLVESTRIS* L.

Смирнова А.С.^а, Ханова А.С., 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: ^аsas.smirnova@mail.ru

Оценена активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза, каталаза, аскорбатпероксидаза и глутатионпероксидаза) в хвое *Pinus sylvestris* L., произрастающей в Чернобыльской зоне отчуждения. Выявлены закономерности изменения активности супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидазы и глутатионпероксидазы при смене сезонов года в условиях хронического действия ионизирующего излучения. В зимний период на загрязненных участках обнаружено значимое снижение активности супероксиддисмутаза и глутатионпероксидазы по сравнению с контрольными участками. Изменений активности каталазы и аскорбатпероксидазы в хвое сосен чернобыльской зоны отчуждения, связанных с ответом на хроническое облучение, обнаружено не было.

Ключевые слова: хроническое облучение, ферменты, супероксиддисмутаза, каталаза, аскорбатпероксидаза, глутатионпероксидаза, сосна обыкновенная

Авария на Чернобыльской АЭС, произошедшая в 1986 г., стала причиной радиоактивного загрязнения части территории Европы. Изучение влияния хронического облучения растений на этих территориях может помочь в понимании механизмов адаптации растений к негативным факторам окружающей среды.

Данная работа посвящена анализу состояния антиоксидантной системы сосны обыкновенной, произрастающей в Чернобыльской зоне отчуждения. Как известно, облучение растений приводит к образованию активных форм кислорода (АФК) и, как следствие, активации систем антиоксидантной защиты. Был проведен анализ активности таких ферментов, как супероксиддисмутаза (SOD), каталаза (CAT), аскорбатпероксидаза (APX) и глутатионпероксидаза

(GPX), являющихся важной частью антиоксидантной системы.

Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны популяции сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Экспериментальные участки (Гнездинка, Масаны и Кулажин) расположены в белорусском секторе Чернобыльской зоны отчуждения и характеризуются разным уровнем и составом радиоактивного загрязнения. Контрольные участки Рудинка 1 и Рудинка 2 находятся в Козелужском лесничестве Хойникского лесхоза. Мощности поглощенной дозы в хвое приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1

Мощности поглощенной дозы в хвое на экспериментальных участках [1]

Участок	Рудинка 1	Рудинка 2	Гнездинка	Масаны	Кулажин
Мощность поглощенной дозы, мГр/год	0.8	0.7	3.3	38	87

Пробоотбор был проведен в мае и ноябре 2023 года. Для этого с 10-11 деревьев на каждом участке отбирали двухлетнюю хвою на высоте 12-16 метров от земли и сразу фиксировали в жидком азоте.

Активность антиоксидантных ферментов была определена спектрофотометрически на приборе NanoDrop-2000 (Thermo Fisher Scientific). Активность супероксиддисмутаза (SOD, КФ 1.15.1.1) была определена по ингибированию фоторедукции нитросинего тетразолия с помощью супероксидных

радикалов, которые образуются при автоокислении рибофлавина в присутствии метионина и ЭДТА [2]. Активность каталазы (CAT, КФ 1.11.1.6) была определена по динамике разложения перекиси водорода ферментом в течение 2 минут [3]. Активность аскорбатпероксидазы (APX, КФ 1.11.1.11) была определена по скорости разложения пероксида водорода ферментом с образованием воды и дегидроаскорбата [4]. Активность глутатионпероксидазы (GPX, КФ 1.11.1.9) была оценена по реакции

восстановления гидропероксидов глутатионом [5]. Показания спектрофотометра переводили в международные единицы ферментативной активности (МЕ). Анализ результатов был выполнен в MS Office Excel и Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение

В нашем исследовании было показано значимое снижение активности ферментов SOD и GPX в хвое, собранной в ноябре 2023 г, на загрязненных участках Гнездинка и Кулажин по сравнению с контрольным участком Рудинка 1. Не обнаружено устойчивого изменения активности антиоксидантных ферментов

CAT и APX в хвое сосен Чернобыльской зоны отчуждения в ответ на хроническое облучение. Однако у всех исследуемых ферментов можно проследить схожую тенденцию в снижении активности на загрязненных участках в ноябре. Не наблюдается изменений активности ферментов в хвое, собранной в мае 2023 г по сравнению с контрольными участками.

Показаны статистически значимые отличия активности ферментов в разные сезоны в хвое сосен на участках Рудинка 1 (для SOD и APX), Рудинка 2 (для CAT и APX) и Масаны (для CAT и APX) (Рис. 1). В хвое сосен, собранных на участках Гнездинка и Кулажин, были зафиксированы различия в уровнях активности GPX в хвое сосны, собранной в мае и ноябре 2023 г.

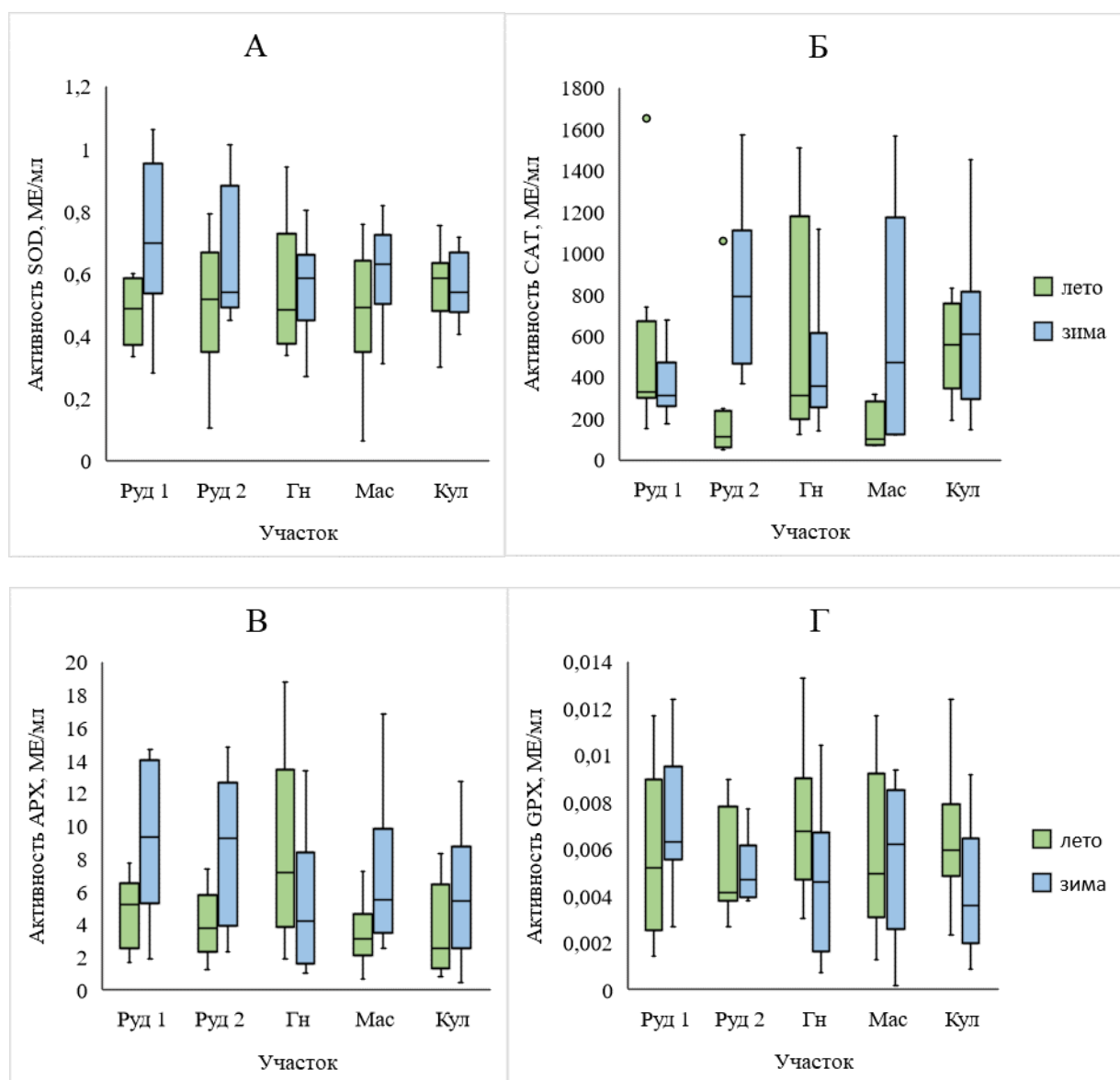


Рисунок 1. Активность антиоксидантных ферментов SOD (А), CAT (Б), APX (В), GPX (Г) в хвое, собранной в мае и ноябре 2023 г.

* – различия активности фермента в хвое, собранной в мае и ноябре 2023 г. статистически значимы, $p < 0.1$, U-тест

Техногенное воздействие может вызывать у природных популяций неспецифичный ответ на смену времен года. В исследовании сезонных изменений активности пероксидазы и каталазы в побегах можжевельника (*Juniperus sabina* L.) в рекреационной, сельской и промышленных зонах г. Йошкар-Олы активность САТ в мае, июле и ноябре демонстрировала схожую динамику сезонных колебаний, однако самые большие значения активности и вариабельность были в рекреационной зоне, тогда как самые низкие – в промышленной. Для POD наблюдалась противоположная картина: для рекреационной зоны были зарегистрированы самые низкие значения и вариабельность активности, а высокие значения и вариабельность – в промышленной зоне [6]. Влияние радиоактивного загрязнения на уровень антиоксидантных ферментов при смене сезонов в природных популяциях до этого не был исследован.

Наши результаты демонстрируют увеличение активности SOD и APX на контрольных участках и участке Мас в ноябре, в то время как на участках Гн и Кул значения активности близки к контрольным. Активности GPX на участках Руд 1, Руд 2 и Мас не имели отличий между двумя исследуемыми сезонами, а на участках Гн и Кул обнаружено значимое снижение активности. Для фермента САТ не было выявлено закономерностей в изменении активности для данных сезонов года.

Действие SOD заключается в дисмутации $O_2^{\cdot-}$ в кислород и пероксид водорода. Активация SOD при неблагоприятных воздействиях является ответом на увеличение продукции радикалов супероксида в этих условиях, что обеспечивает защиту клеток и тканей растений от окислительных повреждений. Отсутствие ответа SOD на действие избыточной энергии фотосинтетического аппарата в зимний период в популяциях сосны обыкновенной может свидетельствовать о замедлении физиологических процессов или модификации системы регуляции антиоксидантных ферментов на фоне действия ИИ.

САТ, APX и GPX растений участвуют в утилизации H_2O_2 . На холоде происходит избыточное образование АФК, вследствие затруднения реализации световой энергии [7]. Не было обнаружено закономерности в изменениях активности САТ при смене сезонов, что может быть связано с тем, что САТ локализована в основном в пероксисомах [8]. APX играет важную роль в удалении H_2O_2 непосредственно в хлоропластах [9]. Действие хронического низкодозового облучения приводит к отсутствию активации APX на двух исследуемых участках на фоне сезонного изменения условий окружающей среды. GPX участвует в детоксикации H_2O_2 и органических гидропероксидов липидов и других активных молекул, участвуя, таким образом, в регуляции клеточного окислительно-восстановительного гомеостаза, и выполнять сигнальные функции [10]. Данный фермент не демонстрирует увеличения активности при низких температурах в контрольных участках и участке Мас, а на других загрязненных участках наблюдается снижение

активности GPX. Снижение активности двух антиоксидантных ферментов, участвующих в утилизации пероксида водорода, на фоне отсутствия повышенной генерации фермента SOD может свидетельствовать об отсутствии окислительного стресса в популяциях *Pinus sylvestris* L., проявляющегося у контрольных растений при похолодании. Тем не менее, для получения более обоснованных выводов о влиянии хронического воздействия на состояние антиоксидантной системы сосны обыкновенной в разные сезоны года требуются дополнительные исследования.

Список литературы

1. *Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Гераськин С.А.* Дозы облучения сосновых насаждений в белорусском секторе 30-километровой зоны вокруг Чернобыльской АЭС на современном этапе // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 3. С. 300-310.
2. *Kajari D., Luna S., Gagan C.* A Modified Spectrophotometric Assay of Superoxide Dismutase Using Nitrite Formation by Superoxide Radicals // Indian journal of biochemistry & biophysics. 2000. V. 37. PP. 201-204.
3. *Биссвангер Х.* Практическая энзимология. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 328 с.
4. *Verma S., Dubey R.S.* Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants // Plant Sci. 2003. V, 164. PP. 645-655.
5. *Paglia D.E., Valentine W.N.* Studies on the quantitative and qualitative characterization of erythrocyte glutathione peroxidase // J. Lab. Clin. Med. 1967. V. 70. PP. 158-169.
6. *Сарбаева Е.В.* Сезонная динамика изменения активности пероксидазы и каталазы в побегах можжевельника казацкого в условиях урбанизированной среды // Современные проблемы естественных наук и фармации : сборник статей Всероссийской научной конференции : Сборник статей Всероссийской научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года). Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2023. С. 283-285.
7. *Miura K., Furumoto T.* Cold Signaling and Cold Response in Plants // *Int. J. Mol. Sci.* 2013. V. 14. PP. 5312-5337. <https://doi.org/10.3390/ijms14035312>.
8. *Sharma I., Ahmad P.* Catalase: a versatile antioxidant in plants // Oxidative damage to plants. Academic press, 2014. С. 131-148.
8. *Catalase and ascorbate peroxidase-representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants / N.A. Anjum [et al.] // Environmental science and pollution research. 2016. V. 23. PP. 19002-19029.*
9. *Plant glutathione peroxidases: emerging role of the antioxidant enzymes in plant development and*

SEASONAL DYNAMICS OF ANTIOXIDANT ENZYME ACTIVITY OF *PINUS SYLVESTRIS* L. UNDER CHRONIC RADIATION

Smirnova A.S., Khanova A.S., 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*

The activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase) in needles of *Pinus sylvestris* L. growing in the Chernobyl exclusion zone was evaluated. The patterns of changes in the levels of activity of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase during the change of seasons in conditions of chronic action of ionizing radiation have been revealed. In winter, a significant decrease in the activity of superoxide dismutase and glutathione peroxidase was found in the contaminated sites compared to the control sites. There were no changes in the activity of catalase and ascorbate peroxidase in the pine needles of the Chernobyl exclusion zone associated with the response to chronic radiation.

Keywords: *chronic exposure, enzymes, superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase, glutathione peroxidase, Pinus Sylvestris L.*

УДК 631.41:631.85:631.95

УДЕЛЬНЫЕ АКТИВНОСТИ ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th И ИХ ЗАПАСЫ В АГРОДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ И АГРОСЕРОЙ ПОЧВАХ ЛЕСНОЙ И ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОН ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Тамразова А.Р.

*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: anna.tamrazova2014@gmail.com*

В природе радиоактивные изотопы имеются везде. Так, они встречаются в воде, воздухе, почвах, а также в растениях и тем самым переходят в организм. Основную долю в радиационный фон тяжёлые естественные радионуклиды (ТЕРН), которые входят в состав минералов, и, следовательно, в состав почвообразующих пород и почв. Радий-226, уран-238 и торий-232 являются распространёнными радиоактивными элементами в природе и имеют длительные периоды полураспада, поэтому они способны создавать продукты распада, которые также являются радиоактивными и могут обогащать фоновое излучение. Эти радионуклиды могут переходить в воздух, воду и почву, что приводит к тому, что они могут быть для организма человека. Таким образом, они вносят значительный вклад в общий радиационный фон. Одним из основных источников поступления ТЕРН в биосферу и, особенно в сельскохозяйственное производство, является использование фосфорных удобрений. В зависимости от типа исходного фосфорсодержащего сырья и технологических особенностей его переработки в удобрение может переходить практически весь уран-238 и значительная часть радия-226, тория-232 и других ТЕРН.

Ключевые слова: *ТЕРН, радий-226, уран-238, торий-232, запас радионуклидов, удельные активности, фосфорные удобрения*

Целью данного исследования было изучение форм нахождения радия-226, урана-238 и тория-232 и их влияния на миграцию в агродерново-подзолистой и агросерой почвах и сравнение их с почвами под лесом.

Объектом исследования были взяты профили агродерново-подзолистой почвы на земельных участках и под лесом в Московской области и агросерой почвы на пашне и под лесом в Тульской области. Почвенные свойства определялись по стандартным методикам. В образцах исследуемых почв методом

фракционирования Ф.И. Павлоцкой были определены формы нахождения ТЕРН: радия-226, тория-232 и урана-238. Измерения концентраций урана-238 и тория-232 проводились на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой непосредственно в почвенной вытяжке. Активность радия-226 определяли трехкратным измерением суммарной альфа-активности препаратов $BaSO_4$ на альфа-радиометре с сцинтилляционным детектором $ZnS(Ag)$. Значение активности радия-226 рассчитывали с учетом распада и накопления дочерних продуктов распада радия-226, радия-223 и радия-224.

На рисунке 1 представлены распределения суммарных активностей исследуемых естественных радионуклидов в агродерново-подзолистой и в дерново-подзолистой лесной почвах. Радий-226 в дерново-подзолистой почве под пашней распределен по прогрессивно-аккумулятивному типу с большим накоплением в верхних горизонтах. В почве под лесом суммарная удельная активность радия-226 меньше, чем в под пашней. Значения удельной активности уменьшаются вниз по профилю. Максимальная

активность в верхних горизонтах обеих почв. Уран-238 в окультуренной почве распределен по равномерно-аккумулятивному типу. В лесной почве его активность распределяется по регрессивно-элювиально-иллювиальному типу. В почве под пашней суммарная удельная активность тория-232 также, как и остальных исследуемых радионуклидов выше в пахотном горизонте. В почве под лесом суммарная удельная активность тория-232 больше в средней части профиля. В нижних горизонтах активность радионуклидов минимальная. Если сравнивать удельные активности естественных радионуклидов, то суммарно значение больше в агродерново-подзолистой почве. Это связано с тем, что почва в течение длительного времени предназначалась для сельскохозяйственных нужд. Известно, что с 1950 по 1970-ые годы в нее вносили фосфорные удобрения в дозе 60 кг P_2O_5 на 1 га как на фоне внесения навоза и птичьего помета, так и без них. Начиная с 1990 года фосфорные удобрения в исследуемую дерново-подзолистую почву не вносились [2].

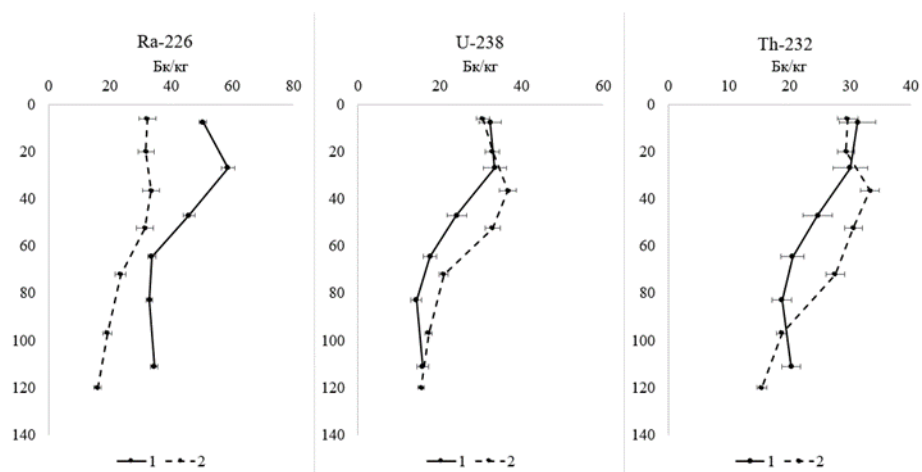


Рисунок 1. Распределение суммы фракций радия-226, урана-238 и тория-232 в агродерново-подзолистой (1) и дерново-подзолистой лесной почвах (2), в Бк/кг

На рисунке 2 представлены распределения суммарных активностей исследуемых естественных радионуклидов в агросерой и серой лесной почвах. Радий-226 в освоенной почве распределен по элювиально-иллювиальному типу с большим накоплением в субэлювиальном горизонте. В серой лесной почве суммарная удельная активность радия-226 практически не меняется во всем профиле. Уран-238 в агросерой и в серой лесной почвах распределяется по регрессивно-аккумулятивному типу. Для данного радионуклида наибольшее значение активности отмечается в пахотном и гумусовом горизонтах. Уран-238 и торий-232 слабо дифференцируются по горизонтам, но у тория-232 дифференциация более заметна.

Распределение тория-232 соответствует элювиально-иллювиальному типу, в обеих почвах суммарная удельная активность тория-232 больше в субэлювиальном горизонте. В нижних горизонтах активность радионуклидов минимальная. Удельная активность естественных радионуклидов больше в агросерой почве, чем в серой лесной, что может являться результатом внесения в почву минеральных удобрений с повышенным их содержанием. В последние тридцать лет в исследованную почву ежегодно вносили фосфорные удобрения производства Кирово-Чепецкого химического комбината, а именно нитроаммофоску или азофоску, в дозе 1.0-1.5 ц/га (15-24 кг P_2O_5 на 1 га) [1].

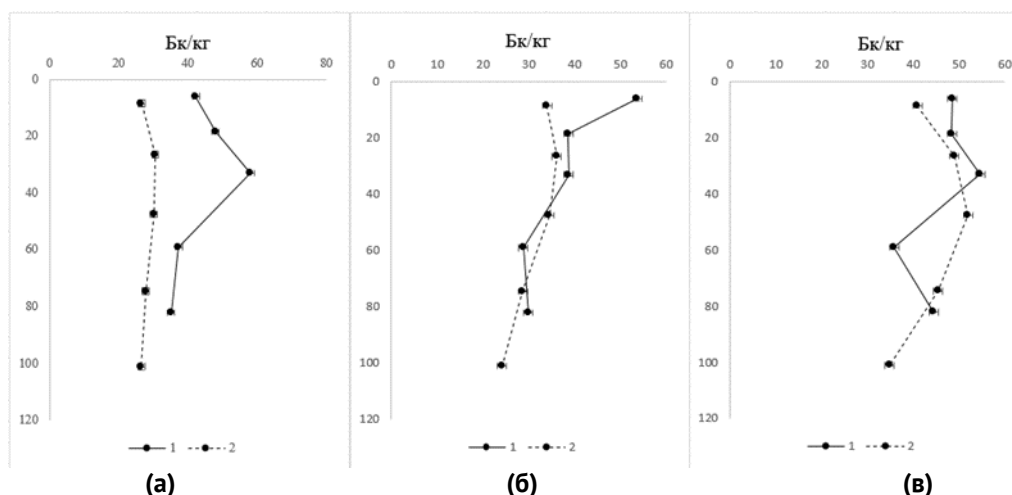


Рисунок 2. Распределение суммы фракций радия-226 (а), урана-238 (б) и тория-232 (в) в агросерой (1) и серой лесной почвах (2), в Бк/кг

Была проведена обработка данных для расчета запасов радия-226, урана-238 и тория-232 в пахотных горизонтах обеих почв и в корнеобитаемом слое почв под лесом. Практически во всех фракциях кроме остатка запас радионуклидов во много раз больше в почвах под пашней, что, по всей видимости, связано с поступлением дополнительного количества радионуклидов с минеральными удобрениями.

По расчетам запасов исследуемых радионуклидов в сумме подвижных фракций можно сказать, что загрязнение всеми радионуклидами, за исключением тория-232, выше в агродерново-подзолистой почве (рис. 3). За счет накопления тория-232 в подвижной, обменной и связанной с органическим веществом фракциях в верхних горизонтах в дерново-подзолистой лесной почве, его запаса выше в 3 раза под

лесом. В целом, видно, что запас радия-226, урана-238 и тория-232 больше в агродерново-подзолистой почве. Суммарный запас всех исследуемых радионуклидов в агродерново-подзолистой и дерново-подзолистой лесной почвах представлен на рисунке 4.

Если сравнивать суммы подвижных фракций в агросерых и серых лесных почвах, то запасы всех радионуклидов выше в почве под пашней (рис. 5). Причем для радия-226 это обусловлено большим запасом обменной фракции, а для урана-238 и тория-232 – запасами обменной и подвижной фракций. В целом, видно, что запас радия-226, урана-238 и тория-232 превышает в почве под пашней. Суммарный запас всех исследуемых радионуклидов в обеих почвах представлен на рисунке 6.

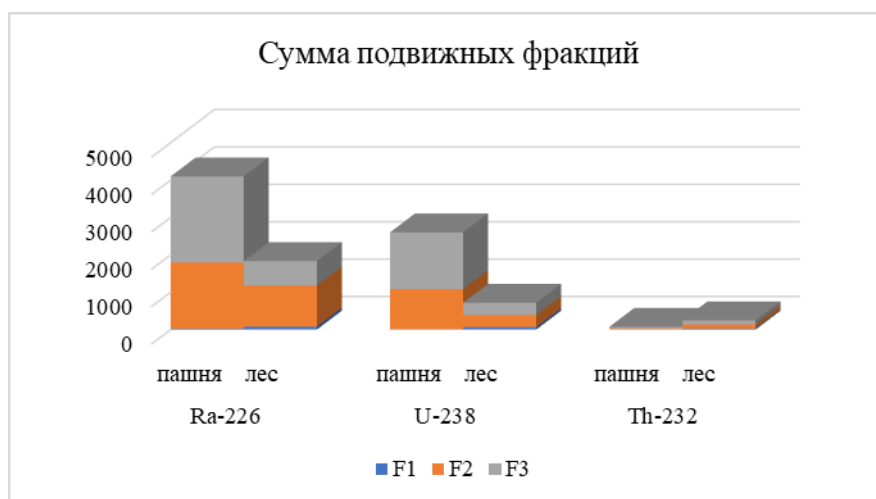


Рисунок 3. Суммарные запасы исследуемых радионуклидов во всех подвижных фракциях (водорастворимая, обменная, собственно подвижная) в агродерново-подзолистой и дерново-подзолистой лесной почвах, Бк/м²

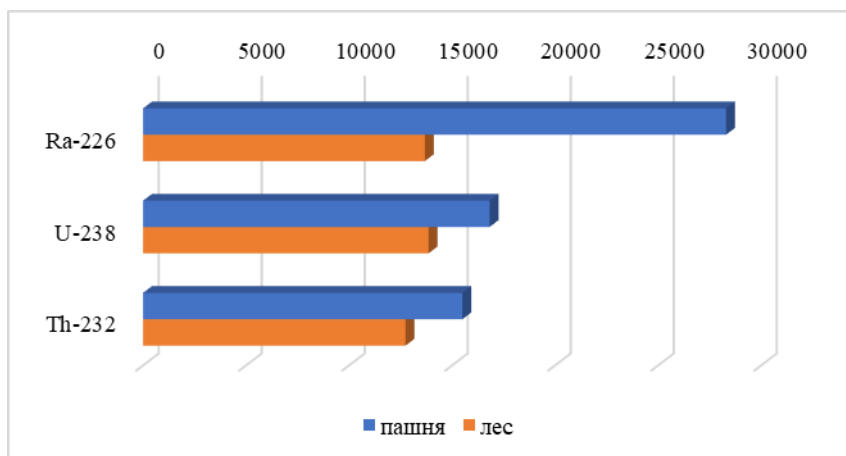


Рисунок 4. Суммарные запасы радия-226, урана-238 и тория-232 всех фракций в условиях агроценоза (синий) и дерново-подзолистой под лесом почвах (оранжевый), Бк/м²

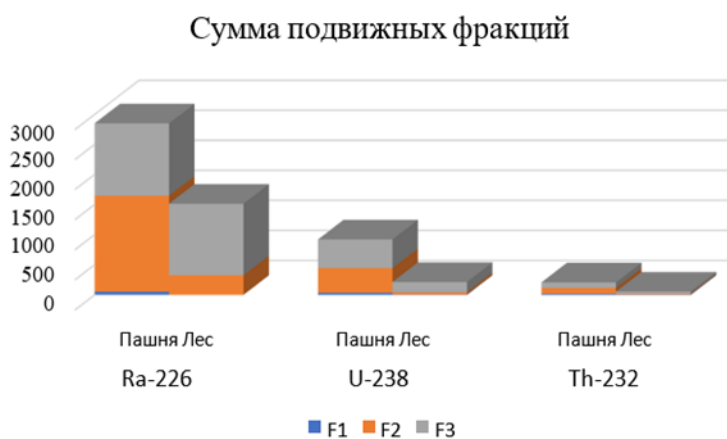


Рисунок 53. Суммарные запасы исследуемых радионуклидов во всех подвижных фракциях (водорастворимая, обменная, собственно подвижная) в агросерой и серой лесной почвах, Бк/м²

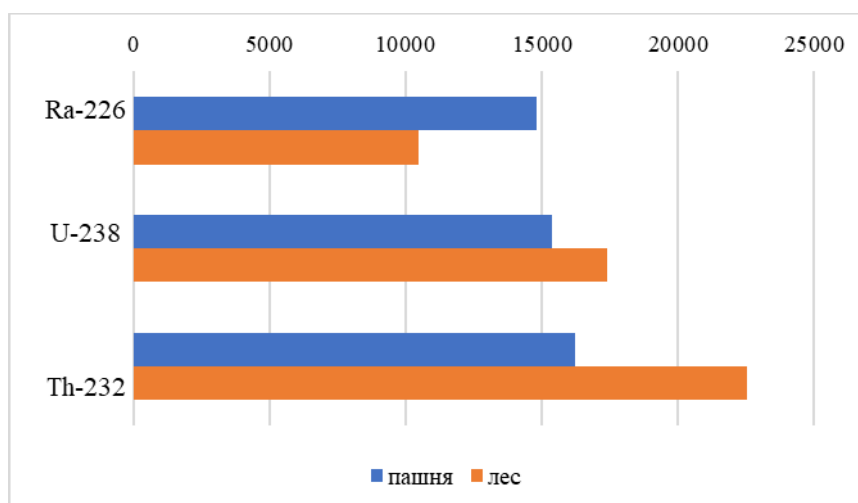


Рисунок 6. Суммарные запасы радия-226, урана-238 и тория-232 всех фракций в условиях агроценоза (синий) и серой лесной почвах (оранжевый), Бк/м²

Можно сделать вывод, что длительное и систематическое применение фосфорных удобрений приводит к увеличению в пахотном слое почв агроценозов запасов естественных радионуклидов.

Значительное количество их при этом остается в доступном для растений и потенциально подвижном состоянии за счет накопления их в составе обменной и подвижной фракций.

1. Шомин А.А. Личное сообщение. 2022.

2. Юрин П.В. Физиологическое обоснование совершенствования структуры агрофитоценозов: дис. ... д-ра биол. наук. М., 1974.

Список литературы

SPECIFIC ACTIVITIES OF ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th AND THEIR RESERVES IN AGRODERNOVO-PODZOLIC AND AGRO-GRAY SOILS OF FOREST AND FOREST-STEPPE ZONES OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

Tamrazova A.R.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Lomonosov Moscow State University (Faculty of Soil Science), Leninskie Gory 1, Moscow, Russian Federation, 119991

Radioactive isotopes are everywhere in nature. So, they are found in water, air, soils, as well as in plants and thus pass into the body. The main part of the radiation background is heavy natural radionuclides, which are part of minerals, and, consequently, part of soil-forming rocks and soils. Radium-226, uranium-238 and thorium-232 are common radioactive elements in nature and have long half-lives, so they are capable of creating decay products that are also radioactive and can enrich background radiation. These radionuclides can pass into the air, water and soil, which leads to the fact that they can be for the human body. Thus, they make a significant contribution to the overall radiation background. One of the main sources of heavy natural radionuclides entering the biosphere and, especially, into agricultural production, is the use of phosphorus fertilizers. Depending on the type of the initial phosphorus-containing raw material and the technological features of its processing, almost all uranium-238 and a significant part of radium-226, thorium-232 and other thorns can be converted into fertilizer.

Keywords: *heavy natural radionuclides, radium-226, uranium-238, thorium-232, stock of radionuclides, specific activity, phosphorus fertilizers*

The purpose of this study was to study the forms of radium-226, uranium-238 and thorium-232 and their effect on migration in agrodernum-podzolic and agro-gray soils and compare them with soils under the forest.

The object of the study was the profiles of agrodernum-podzolic soil on land and under forest in the Moscow region and agro-gray soil on arable land and under forest in the Tula region.

Figure 1 shows the distributions of the total activities of the studied natural radionuclides in agrodernum-podzolic and sod-podzolic forest soils. Figure 2 shows the distributions of the total activities of the studied natural radionuclides in agro-gray and gray forest soils. According to calculations of the reserves of the studied radionuclides in the sum of mobile fractions, it can be said that contamination with all

radionuclides, with the exception of thorium-232, is higher in the agrodernum-podzolic soil (Fig. 3). The total stock of all studied radionuclides in agrodernum-podzolic and sod-podzolic forest soils is shown in Figure 4. If we compare the amounts of mobile fractions in agro-gray and gray forest soils, the stocks of all radionuclides are higher in the soil under arable land (Fig. 5). The total stock of all studied radionuclides in both soils is shown in Figure 6.

It can be concluded that the long-term and systematic use of phosphorus fertilizers leads to an increase in the reserves of natural radionuclides in the arable soil layer of agrocenoses. At the same time, a significant number of them remain in an accessible and potentially mobile state for plants due to their accumulation in the composition of the exchange and mobile fractions.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОДЭК

Титов И.Е.^а, Кречетников В.В., Спиридонов С.И., Карпенко Е.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 titan13_08@mail.ru*

В ходе работ была собрана информация, характеризующая радиоактивные выбросы реактора БРЕСТ-ОД-300 при нормальном функционировании, а также для ряда различного рода аварийных сценариев. На основе этих данных были рассчитаны дозовые нагрузки на население от выбросов реактора при штатной работе, нарушении нормальной эксплуатации, проектных и запроектных авариях. На основе прогностических оценок, полученных с использованием исходной информации, были созданы векторные карты цифрового двойника для оценки и прогнозирования радиационного воздействия на человека в районе расположения ОДЭК.

Ключевые слова: *ОДЭК, радиоактивные выбросы, нормальная эксплуатация, сценарии аварий, цифровой двойник, доза облучения, ГИС-проект, электронная карта*

Для обеспечения экологической безопасности населения и окружающей среды при строительстве и планируемом вводе в эксплуатацию опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) с реактором на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 и предприятиями, обеспечивающими замыкание топливного цикла [1] с применением геоинформационных технологий (ArcGIS), была разработана современная цифровая система («цифровой двойник»). Цифровой двойник является виртуальной копией реального объекта, создаваемой на основе математических моделей и программных средств. Эта система предназначена для систематизации, визуализации и анализа информации для оценки и прогнозирования радиационного воздействия на человека при нормальной эксплуатации радиационно-опасных объектов и в случаях аварийных ситуаций.

Для оценки доз облучения населения и наполнения цифрового двойника слоями электронных карт, созданных на основе прогнозных расчетов для условий нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 и различных аварийных сценариев, был задействован расчетный модуль ГИС «Прогноз». Модуль содержит 4 блока: «Модуль ГИС Банк данных», «Модуль ГИС Дозовые нагрузки», «Модуль ГИС Прогноз (хроника)», «Модуль ГИС Прогноз (авария)» [2].

Электронные карты цифрового двойника для оценки и прогнозирования радиационного воздействия на человека в районе расположения ОДЭК создавались для 10-ти сценариев проектных аварий, 2-х сценариев запроектных аварий и 2-х сценариев нормальной эксплуатации реакторной установки. Для условий нормальной эксплуатации реакторной установки предусмотрено 2 сценария атмосферных выбросов радионуклидов: без использования и с

использованием фильтров. Эти данные рассматривались в качестве входных при расчете дозовых нагрузок на население, проживающее на прилегающей к ОДЭК территории. В сценариях нарушения нормальной эксплуатации предполагалось, что радионуклиды из негерметичных твэлов с дефектами будут попадать из активной области в окружающую среду в течение 5-ти суток. Для проектных аварий в случае разгерметизации газовой полости блока реакторного и выхода защитного газа первого контура в центральный зал расчет проводился с учетом и без учета работы фильтров для случая мгновенного выброса продолжительностью 23 секунды и суточного выброса. Для сценария «Разгерметизация ресивера выдержки защитного газа» время выброса составляло 1,5 часа, а в случае сценария «Разгерметизация всех твэлов одной ТВС при перегрузке» – 10 суток. Для запроектных аварий при выбросе газовой подушки при достижении ПБЭ по негерметичным твэлам время выброса составляло 1,5 часа, а в случае наиболее тяжелого аварийного сценария – 5 суток. Указанные характеристики выбросов были использованы в качестве исходных данных для расчета доз облучения населения и последующего создания векторных карт цифрового двойника.

Для расчета доз облучения населения от проектируемых выбросов при нормальной эксплуатации РУ БРЕСТ-ОД-300 применялся блок расчета «Модуль ГИС Прогноз (хроника)». Для сценариев нарушения нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий использовался блок расчета «Модуль ГИС Прогноз (авария)».

Собранные данные по радиоактивным выбросам были внесены в соответствующий раздел «Исходные данные». Для каждого сценария была добавлена

информация, характеризующая активности радионуклидов, выбрасываемых в атмосферу по всем временным фазам с заданной высотой выброса (рис. 1).

Для расчетов при условиях нормальной эксплуатации использовались средние годовые

метеоданные по направлению ветра для региона (табл. 1), которые вносились в расчетный блок во вкладку «Исходные данные по метеоусловиям».

Радионуклид	Скорость осаднения, м/с	Активность, Бк/год
Xe-131m	0,008	
I-131 (a)	0,008	
I-131 (m)	0,02	9,8E+08
I-131 (o)	0,001	
Te-132	0,008	
I-132 (a)	0,008	
I-132 (m)	0,02	
I-132 (o)	0,001	
I-133 (a)	0,008	
I-133 (m)	0,02	1,9E+08
I-133 (o)	0,001	
Xe-133	0	1,2E+12
Cs-134	0,008	3,9E+07
Xe-135	0	6,9E+10
Cs-135	0,008	
Cs-136	0,008	

Рисунок 1. Ввод исходных данных по выбросам радионуклидов

Таблица 1

Повторяемость направлений ветра

	С	ССВ	СВ	ВСВ	В	ВЮВ	ЮВ	ЮЮВ	Ю	ЮЮЗ	ЮЗ	ЗЮЗ	З	ЗСЗ	СЗ	ССЗ
Частота встречаемости, %	3	3	3	5	5	3	4	5	9	15	16	9	6	5	5	4

Расчет доз облучения для аварийных выбросов и нарушении нормальной эксплуатации проводился при неизменных заданных погодных условиях. Для этого выбирался расчетный модуль «Прогноз дозы облучения при однократном аварийном выбросе и неизменных метеорологических условиях».

Полученные в ходе расчетов данные были сохранены в таблице формата .xls в выбранную рабочую область, затем добавлены в виде слоев электронных векторных карт в цифровой двойник для оценки и прогнозирования радиационного воздействия на человека в районе расположения ОДЭК (рис. 2, 3).

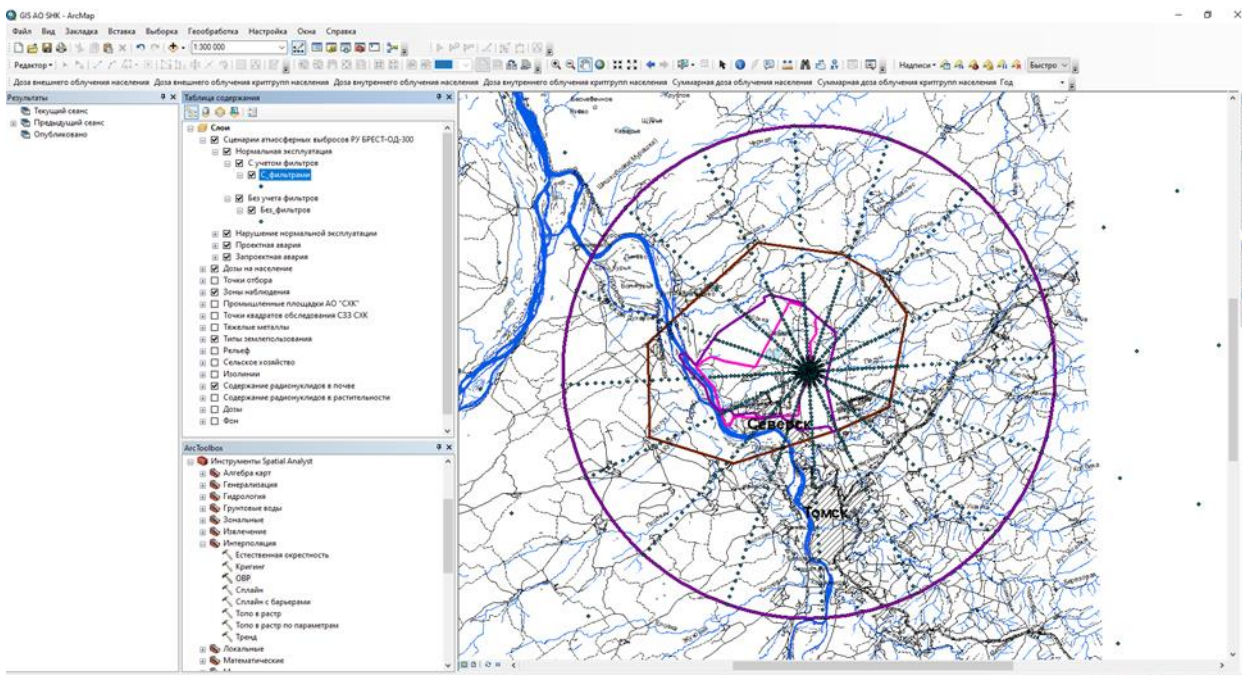


Рисунок 2. Добавление полученных результатов как точечные объекты на карту

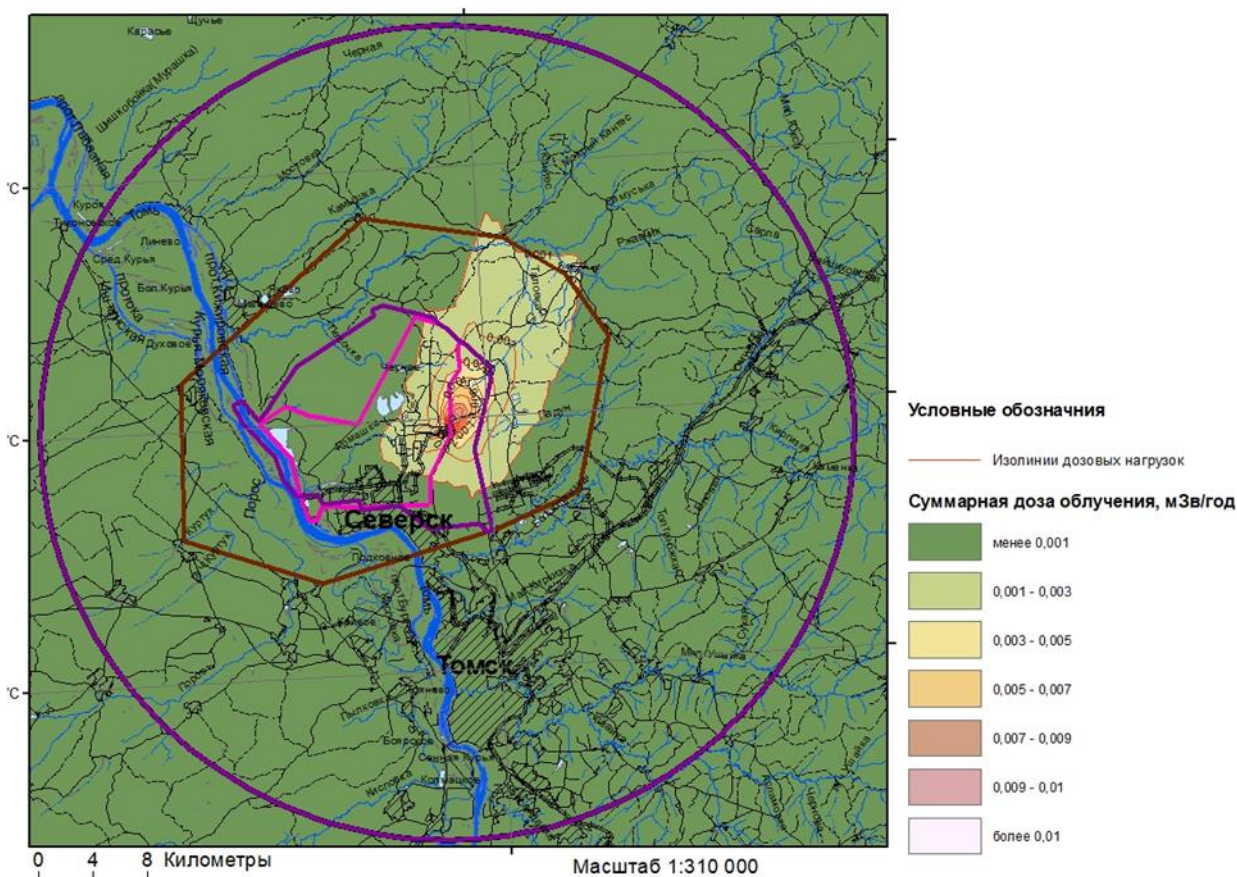


Рисунок 3. Электронная карта «Суммарная годовая доза, мЗв/год» при нормальной эксплуатации с учетом фильтра

Помимо 130 базовых слоев, характеризующих объект исследования (электронные карты типов землепользования;

сельскохозяйственных предприятий, расположенных в районе размещения ОДЭК; локализации зон наблюдения и рельефа и т.д.), в цифровой двойник

было добавлено 90 слоев, включающих точечные слои, содержащие атрибутивную информацию о дозах облучения в расчетных точках, линейные слои изолиний распределения доз облучения и растровые слои пространственного распределения доз облучения. Всего в состав проекта входит 220 слоев, находящихся в 5 подкаталогах (группах), содержащих различную атрибутивную информацию.

Результаты, полученные в ходе работ, будут в дальнейшем дополнены оценками доз облучения населения в результате эксплуатации «модуля фабрикациии-рефабрикациии ядерного топлива» (МФР), что позволит сформировать полную картину воздействия радиационного фактора на население при функционировании ОДЭК. С практической точки зрения, результаты расчетных оценок и создания

электронных карт цифрового двойника внесут вклад в обоснование экологической безопасности предприятий ОДЭК с учетом современных подходов к оценке радиационного воздействия на население в районах расположения ядерно-энергетических предприятий.

Список литературы

1. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики / *Е.О. Адамов, Р.М. Алексахин, Л.А. Большов [и др.] //Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 1. С. 5-12.*

2. Программный модуль ГИС «Прогноз»: а.с. № RU 2023619583 / *Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В.; зарег. 28.04.2023; опубл. 12.05.2023.*

UPDATING THE DIGITAL TWIN FOR ASSESSING AND PREDICTING RADIATION EXPOSURE TO HUMANS AND BIOTA IN THE AREA OF THE ODEC

Titov I.E., Krechetnikov V.V., Spiridonov S.I., Karpenko E.I.

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

During the work, information was updated that characterizes radioactive emissions from the BREST-OD-300 reactor during normal operation, as well as for a number of different types of emergency scenarios. Based on this data, dose loads on the population from emissions from the BREST-OD-300 reactor were calculated during normal operation, disruption of normal operation, design basis and beyond-design basis accidents. Based on the prognostic estimates obtained using the updated initial information, vector maps of the digital twin were created for assessing and predicting radiation exposure to humans and biota in the ODEC area.

Keywords: *ODEC, radioactive emissions, normal operation, accident scenarios, digital twin, radiation dose, GIS project, electronic map*

УДК 631.86.022.3(477.6)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЕПАРАТА ГЕОТОН В УСЛОВИЯХ ДОНБАССА

Чижова М.С.^а, Денисенко А.И., Кадурин А.А., Миличенко А.А.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова»,
291008, Артемовский р-он, г. Луганск, тер. ЛНАУ, д. 1, Луганская Народная Республика, Российская Федерация
e-mail: masha_011950@mail.ru*

В статье приведены данные проведения исследований за 2021–2023 г по изучению эффективности Геотона на фоне Биогумуса на урожайность и качество семян подсолнечника. В среднем за годы проведения исследований внесение только Биогумуса повышало урожайность до 19.5 ц/га, а прибавка урожая составила 2.5 ц/га. Проведение опрыскивания растений по листьям Геотоном повышало урожайность до 18.8 ц/га, прибавка – 1.8 ц/га. При совместном внесении Биогумуса и Геотона урожайность повысилась до 20.6 ц/га, что на 3.6 ц/га или на 20.0 % выше, чем в контрольном варианте. Содержание жира в семенах подсолнечника увеличилось на 1.2 % при применении Геотона, Биогумуса – на 1.9 % и при совместном внесении удобрений – на 2.1 %.

Ключевые слова: урожайность, удобрения, биогумус, органоминеральный комплекс Геотон, жир, масса 1000 семян

Введение

В XX столетии для получения высоких урожаев сельскохозяйственных культур использовали в больших количествах минеральные удобрения, которые изменили содержание элементов питания, гумуса, физико-химические свойства. Это привело к значительной деградации почв. Поэтому ситуация, которая сложилась сегодня, требует кардинальных изменений по практике ведения сельского хозяйства [1].

В настоящее время необходимо уменьшить применение минеральных удобрений и перейти на современные органические удобрения или биоудобрения [2].

При применении биоудобрений растения хорошо усваивают полезные элементы питания, повышают урожайность и являются безопасными для окружающей среды [3].

В ФГБНУ ВНИИРАЭ на основе торфа был получен органоминеральный комплекс Геотон. При применении его усиливается иммунитет растений, увеличивает эффективность корневого питания и повышает урожайность культур [4]. Это комплексный универсальный жидкий концентрат темного цвета с содержанием азота (N) – 9-14 %, фосфора (P_2O_5) – 23-25 %, калия (K_2O) – 23-29 %. Содержание органического вещества 32-45 %, в том числе гуматов калия – 9-12 % [5].

Цель и задачи

Установить действие органоминерального комплекса Геотон на фоне Биогумуса на урожайность и качество семян подсолнечника на черноземах обыкновенных в условиях Луганской Народной Республике.

Методика исследований

На опытном поле ФБОУ ВО Луганский ГАУ им. К.Е. Ворошилова проводили изучение эффективности органоминерального комплекса Геотон на фоне Биогумуса на продуктивность и качество семян подсолнечника. Исследования были проведены в посевах подсолнечника в 2021-2023 годах.

Схема опыта:

1. Контроль без удобрений.
2. Биогумус 1 т/га при посеве.
3. Геотон – обработка 1 л/га в фазу 2-3 и 6-7 листьев.
4. Биогумус 1 т/га при посеве + Геотон 1 л/га в фазу 2-3 и 6-7 листьев.

Почва на опытном участке – чернозем обыкновенный малогумусный слабоэродированный тяжело-суглинистый образованный на лессовидном суглинке. В пахотном слое содержание гумуса 3.2 %, рН

водное 7.7, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) 16.2 и 20.5 мг/100 г почвы. Площадь делянок 25 м². Биогумус вносили при посеве подсолнечника в дозе 1 т/га. Обработку подсолнечника комплексом Геотон проводили дважды путем опрыскивания по листьям: 1-ая – в фазу 2-3 листьев, 2-ая – в фазу 6-7 листьев. Повторность делянок трехкратная. Полученные результаты урожайности подсолнечника обрабатывали методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову.

Результаты и обсуждение

В период роста и развития подсолнечника была отобрана почва на глубине 0-30 см до посева, в фазу цветения и созревания семян подсолнечника. В результате определения было установлено, что количество питательных веществ увеличивается в почве только при применении Биогумуса. Опрыскивание органоминеральным комплексом Геотон не влияло на питательный режим подсолнечника, но повышалась урожайность.

На протяжении роста и развития подсолнечника условия были разными. В начальный период условия были оптимальными, а в период образования шляпки цветение и созревание резко ухудшались. Это резко повлияло на величину урожая. В среднем за 2021-2023 годы проведения исследований наименьший урожай получен в контрольном варианте 17.0 ц/га. Проведение опрыскивания растений по листьям Геотоном повышало урожайность до 18.8 ц/га, что на 1.8 ц/га, чем в контрольном варианте. Внесение Биогумуса повышало урожайность до 19.5 ц/га, а прибавка урожая составила 2.5 ц/га. При опрыскивании Геотоном на фоне Биогумуса получена урожайность 20.6 ц/га, а прибавка составила 3.6 ц/га. Таким образом, в засушливых условиях ЛНР только Биогумус повышает плодородие почвы, а органоминеральный комплекс Геотон – урожайность подсолнечника (табл. 1).

Масса 1000 семян подсолнечника повышалась при применении удобрений, как по годам проведения исследований, так и в среднем за 2021-2023 г по сравнению с контрольным вариантом (табл. 2). Внесение Биогумуса повышало массу 1000 семян подсолнечника на 3.7 г, а опрыскивание Геотоном – на 3.3 г. При применении опрыскивания растений Геотоном на фоне Биогумуса повышало массу семян подсолнечника до 38.1 г, что на 4.7 г больше в сравнении с контрольным вариантом. Применение Биогумуса и органоминерального комплекса Геотон повышали содержание жира в семенах подсолнечника во все годы исследования. В среднем наибольшее содержание жира в семенах отмечалось при применении органоминерального комплекса Геотон на фоне Биогумуса 45.4 %. По отношению к контролю содержание жира в этом варианте было выше на 2.1 %.

Таблица 1

Влияние органических удобрений Геотон и Биогумус на урожайность семян подсолнечника

Варианты опыта	Урожайность семян, ц/га				Прибавка урожая	
	2021 г.	2022 г.	2023 г.	среднее	ц/га	%
1. Контроль	16.3	16.8	17.9	17.0	-	-
2. Биогумус 1 т/га	18.6	19.4	20.5	19.5	2.5	13.8
3. Геотон 1 л/га	17.8	18.8	19.9	18.8	1.8	10.0
4. Биогумус 1т/га + Геотон 1 л/га	19.3	21.4	21.2	20.6	3.6	20.0
НСР 005	1.31	1.33	1.35			

Таблица 2

Влияние органоминерального комплекса Геотон на фоне Биогумуса на качественные показатели семян подсолнечника

Варианты опыта	Содержание жира в семенах, %	Прибавка жира, %	Сбор жира с 1 га, кг	Прибавка жира		Масса 1000 семян, г
				кг/га	%	
1. Контроль	43.3	-	779.4	-	-	33.4
2. Биогумус 1 т/га	45.2	1.9	926.6	147.2	18.9	37.1
3. Геотон 1 л/га	44.5	1.2	881.1	101.7	13.0	36.1
4. Биогумус 1т/га + Геотон 1 л/га	45.4	2.1	980.6	201.2	25.8	38.1

Опрыскивание только органоминеральным комплексом Геотон повышало не только величину урожая, но и содержание жира в семенах подсолнечника. Его увеличилось при обработке Геотоном на 1.2 %.

Сбор жира в контрольном варианте составил 779.4 кг/га. Внесение Биогумуса повышало сбор жира до 926.6 кг, что на 147.2 кг или на 18.9 % больше, чем на контрольном варианте. Применение опрыскивания по листьям органоминеральным комплексом Геотон повышало сбор жира на 13.0 %. При применении органоминерального комплекса Геотон на фоне Биогумуса сбор жира с 1 га увеличился на 25.8 %.

Выводы и рекомендации

1. Применение Геотона на фоне Биогумуса повышает урожайность подсолнечника на 3.6 ц/га, содержание жира – на 2.1 %, сбор жира с 1 га на 201.2 кг/га.

Список литературы

1. Совершенствование системы удобрения зерновых культур и подсолнечника / В.Н. Рыбина, А.И. Денисенко, М.С. Чижова, Н.Н. Румянцева //

Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2022. № 4(17). С. 60-64.

2. Применение биоудобрений и регуляторов роста в посевах кукурузы / В.Н. Рыбина, А.И. Денисенко, А.А. Кадурина, А.А. Миличенко // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2021. № 3(12). С. 74-78.

3. Чижова М.С., Гузенко Н.Н. Применение препарата Геотон и минеральных удобрений в посевах ярового ячменя // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: XIII Международная научно-практической конференции, посвященной 105-летию факультета агрономии, агрохимии и экологии (Россия, Воронеж, 4-5 декабря 2018 г.): в 2 кн. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. Ч. 1. С. 238-240.

4. Эффективность использования препарата Геотон в условиях центрального региона российской федерации / А.Н. Ратников, Н.И. Санжарова, Т.Л. Жигарева [и др.] // Достижение науки и техники в АПК. 2015. Т. 29. № 5. С. 36-39.

5. Эффективность применения нового органоминерального комплекса Геотон при возделывании зерновых культур и кукурузы / А.Н. Ратников, Г.И. Попова, Д.Г. Свириденко [и др.] // Вестник аграрной науки. 2018. № 3 (72). С. 74-82.

THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF THE DRUG GEOTON IN THE CONDITIONS OF DONBASS

Chizhova M.S., Denisenko A.I., Kadurina A.A., Milichenko A.A.

*Federal State Budget Education Institution for Higher Education «Luhansk Voroshilov State Agricultural University»,
ter. LNAU 1, Artemovsky district, Lugansk, Luhansk People's Republic, Russian Federation, 291008*

The article presents research data for 2021-2023 to study the effectiveness of Geoton against the background of Biohumus on the yield and quality of sunflower seeds. On average, over the years of research, the application of only Biohumus increased the yield to 19.5 c/ha, and the increase in yield – 2.5 c/ha. Spraying plants on Geoton leaves increased the yield to 18.8 c/ha, an increase of 1.8 c/ha. With the combined application of Biohumus and Geoton, the yield increased to 20.6 c/ha, which is 3.6 c/ha or 20.0 % higher than in the control variant. The fat content in sunflower seeds increased by 1.2 % when using Geoton, Biohumus by 1.9 % and when applying fertilizers together – by 2.1 %.

Keywords: *productivity, fertilizers, biohumus, organomineral complex Geoton, fat, weight of 1000 seeds*

УДК 582.933-148:57.017.3:[504.5:539.16(470.5)]

«ПАМЯТЬ О СТРЕССЕ» У ПОДОРОЖНИКА БОЛЬШОГО ИЗ ЗОНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ПОСЛЕ СНЯТИЯ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Шималина Н.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, 620144, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202, Российская Федерация
e-mail: nadia_malina@mail.ru*

Анализ трансгенерационных эффектов на примере *Plantago major* показал, что некоторые особенности, выявленные у семенного потомства, сформировавшегося в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), сохранились в трех последующих поколениях после снятия радиационного воздействия. В выборке проростков подорожника с наиболее загрязненного участка (мощность дозы 157 мкГр/ч) во всех изученных поколениях выявлена максимальная длина корней проростков. Повышенное содержание малонового диальдегида также было отмечено у первого и второго поколения потомков растений в этом варианте, а также в объединенной импактной выборке третьего поколения. Повышение активности супероксиддисмутазы сохранилось только в первом поколении проростков после снятия радиационной нагрузки, а во втором и третьем значимых различий не выявлено. Содержание низкомолекулярных антиоксидантов после прекращения радиационного воздействия не отличалось от фоновых значений.

Ключевые слова: *Восточно-Уральский радиоактивный след, ионизирующая радиация, Plantago major, семенное потомство, трансгенерационные эффекты, антиоксидантный статус, окислительный стресс, жизнеспособность*

В ряде исследований показано, что некоторые особенности растений, возникшие в ответ на действие абиотических стрессоров, способны проявляться в последующих поколениях после прекращения неблагоприятного воздействия [1-3]. Влияние ионизирующих излучений на растения изучено достаточно хорошо [4-6], но работ, в которых рассматриваются трансгенерационные эффекты после прекращения радиационного воздействия в природных популяциях растений, недостаточно.

Цель работы – изучение изменений про-/антиоксидантного статуса и жизнеспособности семенного потомства в трех поколениях подорожника большого (*Plantago major* L.) после прекращения хронического низкодозового облучения.

Смесь семян подорожника большого F0-поколения собирали в двух природных популяциях *P. major*, длительное время произрастающего в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и на двух фоновых участках. ВУРС сформировался в результате взрыва емкости с радиоактивными отходами на ПО «Маяк» в 1957 г. Реперный радионуклид – Sr-90. Дополнительное загрязнение территории ¹³⁷Cs произошло в 1967 г. в результате переноса ила и песка с берегов обмелевшего озера Карачай – открытого хранилища радиоактивных отходов [7, 8]. Мощности поглощенных доз материнских растений, растущих на участках ВУРС-10 и ВУРС-5, составляли 73.1 и 157.1 мкГр/ч соответственно (среднефоновая дозовая нагрузка 0.1086 мкГр/ч) [9]. Семена F1-поколения были собраны с растений, выращенных из

семян F0-поколения на экспериментальных участках с «чистым» выровненным агрофоном на Биофизической станции ИЭРиЖ в г. Заречный. Семена F2- и F3-поколений были получены аналогичным способом с растений F1- и F2-поколений, культивируемых на тех же экспериментальных участках. Семена проращивали методом рулонной культуры на дистиллированной воде при температуре +24 °С и 12-дневном фотопериоде в течение 21 суток. Жизнеспособность семенного потомства оценивали по выживаемости проростков и длине корней. Полученные проростки без корней замораживали в жидком азоте и использовали для спектрофотометрического анализа содержания маркера окислительного стресса – малонового диальдегида (МДА) [10] и активности фермента антиоксидантной защиты супероксиддисмутазы (СОД) [11]. В высушенных проростках определяли суммарное содержание низкомолекулярных

антиоксидантов (НМАО) [12]. Для проверки статистических гипотез использовали U-тест Манна-Уитни. Расчеты проводили в программе STATISTICA 10.0 (StatSoft Inc., 2011).

Выживаемость семенного потомства F0-поколения, сформировавшегося непосредственно в зоне ВУРСа, не отличалась от фонового значения ($p=0.064$). В следующих поколениях по этому показателю наблюдалось разнообразие реакций, устойчивого сохранения эффектов не выявлено. По длине корней отличия стабильно сохранялись – у потомков растений из наиболее загрязненного участка ВУРС-5 во всех исследованных поколениях отмечена наибольшая длина корней, значимые различия выявлены при сравнении с выборкой Фон-2 в F1-поколении и с объединенной фоновой выборкой в F2- и F3-поколениях ($p<0.001$) (рис. 1).

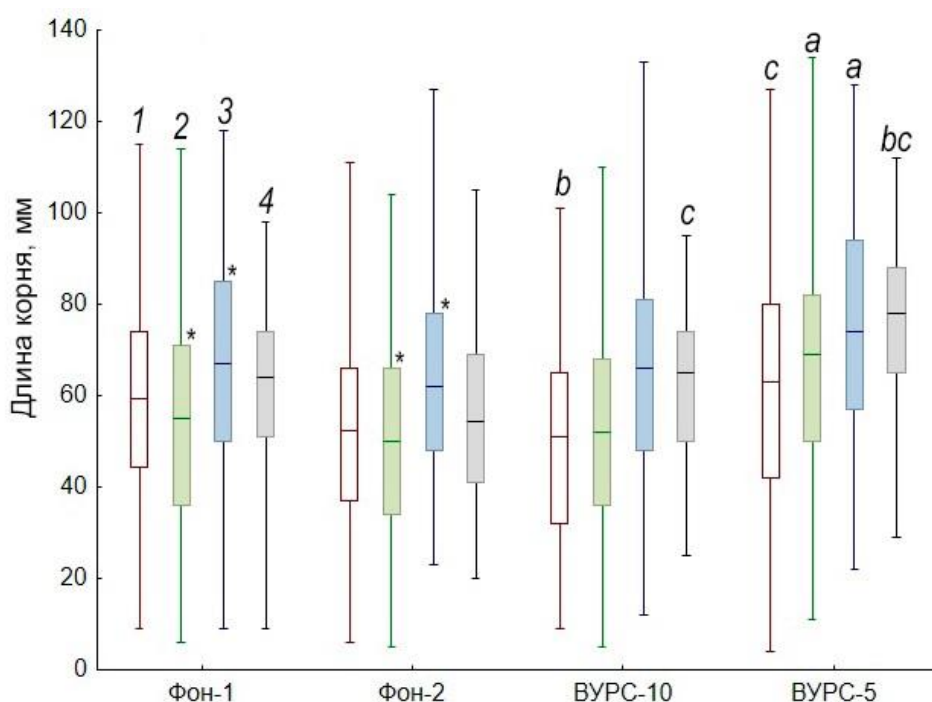


Рисунок 1. Длина корней проростков *P. major* из импактных и фоновых выборок.

1 – F0-поколение, 2 – F1-поколение, 3 – F2-поколение, 4 – F3-поколение.

Приведены медианы, Q1-Q3 и min-max.

* – отсутствие значимых различий внутри зон (U-тест, $p>0.05$); **a** – значимые различия по сравнению с объединенной фоновой выборкой; **b** – значимые различия с Фон-1, **c** – значимые различия с Фон-2 (U-тест, $p<0.05$). Сравнение показателей проводилось в пределах каждого поколения

Согласно таблице 1, у проростков F0-поколения в объединенной выборке ВУРСа по сравнению с объединенной фоновой были значимо повышены содержание маркера окислительного стресса – МДА (U-тест, $p=0.004$) и активность СОД ($p=0.045$). В выборке ВУРС-10 F0-поколения также выявлено значимое повышение содержания НМАО относительно объединенной фоновой выборки ($p=0.017$).

В проростках F1-поколения в выборке ВУРС-5 (потомки растений с наибольшим уровнем радиационной нагрузки) сохранилось повышение содержания МДА ($p=0.004$) и активности СОД ($p=0.006$). В F2-поколении, как и в предыдущем, в выборке ВУРС-5 было отмечено значимое повышение содержания МДА относительно фоновой выборки ($p=0.004$). Наибольшая активность СОД в F2-поколении сохранилась в выборке ВУРС-5 на уровне тенденции

($p=0.058$). В F3-поколении сохранение эффекта наблюдалось только по содержанию МДА, в выборках ВУРСа показатель был выше, чем в фоновых выборках ($p=0.038$). Содержание НМАО в последующих

поколениях после снятия радиационного воздействия значимо не отличалось от фоновых значений.

Таблица 1

Биохимические характеристики проростков *P. major* в трех поколениях после прекращения воздействия

Выборка (вариант) / мощность поглощенной дозы, мкГр/ч	МДА, мкмоль/мг белка	СОД, усл.ед./мг белка	Суммарное содержание НМАО, мг-экв. кверцетина/г сух. массы
<i>F0</i>			
Фон-1 / 0.108	58.7 (49.4-75.7)	96.7 (88.7-104.7)	18.1 (13.9-19.6)
Фон-2 / 0.108	67.4 (52.2-77.3)	101.5 (77.7-115.4)	15.2 (12.8-20.6)
ВУРС-10 / 73.1	134.9 (120.0-154.5) ^a	122.6 (105.7-139.5) ^a	23.2 (19.2-25.2) ^a
ВУРС-5 / 157.1	95.0 (77.7-105.5) ^a	135.9 (123.8-210.4) ^a	17.8 (16.7-18.4)
<i>F1</i>			
Фон-1	44.7 (33.4-60.0)	90.9 (89.9-91.3)	15.8 (14.3-17)
Фон-2	57.0 (37.6-65.9)	87.4 (84.9-89.8)	16.0 (13.7-21)
ВУРС-10	55.4 (42.6-60.4)	93.9 (90.6-97.1)	18.3 (13.9-22.7)
ВУРС-5	83.6 (80.3-84.7) ^a	106.1 (105.1-107.1) ^a	15.9 (13.5-16.5)
<i>F2</i>			
Фон-1	71.6 (63.2-78.1)	107.9 (94.4-121.5)	18.2 (17.6-20.4)
Фон-2	76.4 (72.9-76.5)	113.7 (109-118.4)	18.4 (15.6-19.9)
ВУРС-10	55.6 (50.9-61.8)	97.6 (93.8-103.7)	18.0 (16.3-19.4)
ВУРС-5	103.2 (102.1-104.3) ^a	153.2 (118.2-217.9)	16.1 (12.8-18.5)
<i>F3</i>			
Фон-1	35.7 (31.3-42.0)	45.8 (39.1-51.9)	-
Фон-2	30.1 (23.3-34.6)	40.1 (35.1-43.1)	16.0 (13.8-17.2)
ВУРС-10	45.3 (43.1-46.0) ^a	54.9 (49.5-57.0)	16.9 (16.4-16.9)
ВУРС-5	40.8 (39.8-48.5) ^a	56.2 (48.2-56.4)	15.9 (15.8-16.5)

Примечание: представлены медианы и интерквартильные размахи, $n=4-5$. При отсутствии значимых различий выборки внутри зон (отмечены жирным шрифтом) они были объединены для дальнейшего статистического анализа; ^a значимые различия по сравнению с объединенной фоновой выборкой, (U -тест, $p<0.05$)

Таким образом, на примере *P. major* из зоны ВУРСа показано, что признаки стимуляции роста корней и окислительного стресса могут сохраняться как минимум в трех последующих поколениях после прекращения радиационного воздействия.

Сбор семян в природных ценопопуляциях и получение первого поколения после снятия стресса проведены в рамках продолжающейся темы госзадания ИЭРЖ УрО РАН (№ 122021000077-6), получение

семян F2- и F3-поколений, проведение экспериментов по проращиванию семян и биохимический анализ проростков были поддержаны Российским научным фондом (грант № 21-74-00038).

Список литературы

1. Stressful «memories» of plants: Evidence and possible mechanisms / T.J.A. Bruce [et al.] // Plant Sci. 2007. V. 173. № 6. P.P 603-608.
2. Boyko A., Kovalchuk I. Genome instability and epigenetic modification—heritable responses to environmental stress? // Curr. Opin. Plant Biol. Elsevier. 2011. V. 14. № 3. PP. 260-266.
3. Pozolotina V.N., Antonova E.V, Bezel V.S. Comparison of remote consequences in *Taraxacum officinale* seed progeny collected in radioactively or chemically contaminated areas // Ecotoxicology. Springer. 2012. V. 21. № 7. PP. 1979-1988.
4. Geras'kin S. Plant adaptation to ionizing radiation: Mechanisms and patterns // Sci. Total Environ. 2024. V. 916. P. 170201.
5. Esnault M.-A., Legue F., Chenal C. Ionizing radiation: advances in plant response // Environ. Exp. Bot. Elsevier. 2010. V. 68. № 3. PP. 231-237.
6. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: from acute high doses to chronic low doses // Front. Plant Sci. Frontiers Media SA. 2018. V. 9. P. 847.
7. Radioactive inventories from the Kyshtym and Karachay accidents: estimates based on soil samples collected in the South Urals (1990–1995) / A. Aarkrog [et al.] // Sci. Total Environ. 1997. V. 201. № 2. PP. 137-154.
8. The radiation accident in the Southern Urals in 1957 and the cleanup measures implemented / B. Nikipelov [et al.] // Proceedings of International Symposium. Vienna, 1990. PP. 373–403.
9. Radionuclide uptake and dose assessment of 14 herbaceous species from the east-Ural radioactive trace area using the ERICA Tool / E.M. Karimullina [et al.] // Environ. Sci. Pollut. Res. 2018. V. 25. № 14. PP. 13975-13987.
10. Buege J.A., Aust S.D. Microsomal lipid peroxidation // Methods Enzymol. 1978. V. 52. PP. 302-310.
11. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants // Plant Physiol. American Society of Plant Biologists. 1977. V. 59. № 2. PP. 309-314.
12. Методы биохимического исследования растений / А.И. Ермаков [и др.]. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.

«STRESS MEMORY» IN GREATER PLANTAIN FROM THE RADIOACTIVELY CONTAMINATED AREA: THREE GENERATIONS AFTER THE CESSATION OF RADIATION EXPOSURE

Shimalina N.S.

*Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
8 Marta str. 202, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, Russian Federation, 620144*

The analysis of transgenerational effects in *Plantago major* showed that some features revealed in seed progeny formed in the zone of the East Ural radioactive trace (EURT) were maintained in three subsequent generations after the cessation of radiation exposure. The maximum length of seedling roots was found in all studied generations in the sample of plantain seedlings from the most contaminated site (absorbed dose rate 157 µGy/h). The increased content of oxidative stress marker malondialdehyde was also persistent in progeny of plants with the highest level of radiation exposure. The increase in superoxide dismutase activity was only maintained in the first generation of seedlings after the radiation load removal; no significant differences were found in the second and third generations. The content of low-molecular weight antioxidants in a succession of generations after the cessation of radiation exposure did not differ from background values.

Keywords: *East Ural radioactive trace, ionizing radiation, Plantago major, seed progeny, transgenerational effects, antioxidant status, oxidative stress, viability*

The purpose of this work was to examine the persistence of changes in pro-/antioxidant status and viability of seed progeny in three generations of greater plantain (*Plantago major* L.) after cessation of chronic low-dose irradiation.

Survival rate of F0-generation seed progeny, formed directly in the EURT zone, did not differ from the background value (p=0.064). In the following

generations, a diversity of responses was observed in this indicator, no stable persistence of effects was observed. For root length, the differences were persistent, the progeny of plants from the most contaminated site of EURT had the highest root length in all generations studied. The content of the oxidative stress marker malondialdehyde (MDA) (U-test, p=0.004) and (superoxide dismutase) SOD activity (p=0.045) were

significantly elevated in the pooled EURT sample in the F0-generation. The increased MDA content ($p=0.004$) and SOD activity ($p=0.006$) were maintained in the F1-generation progeny of plants with the highest level of radiation exposure. The same sample showed a significant increase in MDA content relative to the background ($p=0.004$) in the F2-generation, as in the previous one. The highest SOD activity in the F2-generation was also maintained in the sample from the most

polluted site, but the differences were not significant ($p=0.058$). In the F3-generation, the persistence of the effect was observed for MDA content ($p=0.038$). A significant increase in content of low molecular weight antioxidants was revealed in one EURT sample of F0-generation relative to the pooled background sample ($p=0.017$), but significant differences were not found after removal of radiation exposure.

УДК 633:522

ВЛИЯНИЕ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ КОНОПЛИ ПОСЕВНОЙ

Шиманская Н.С.^а, Иванова С.В., Серков В.А., Ущаповский И.В.

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

e-mail: ^а n.shimanskaya@fncl.ru

В статье представлены результаты сравнительной оценки влияния агроэкологических условий на формирование хозяйственно-ценных признаков и семенной продуктивности сортов конопли в условиях Среднего Поволжья и Западной части Центрального региона Нечерноземной зоны РФ. Установлено, что в условиях изменения климата генотипы конопли посевной демонстрируют максимально высокие фенотипические показатели для нового региона возделывания: высота растений – 223 см у сорта Надежда, 315 см у сорта Людмила; длина метелки – 65 и 148 см соответственно. Урожайность культуры в годы исследований в Пензенской области изменялась в пределах 0.77-2.97 т/га, в Смоленской области – от 0.53 до 1.18 т/га. Увеличение тепло и влагообеспеченности растений позволяет в условиях Смоленской области существенно повысить семенную продуктивность растений до 1.18 т/га у сорта Надежда и до 1.05 т/га у сорта Людмила. На основе выполненного анализа сделан обоснованный вывод, что для расширения посевных площадей в более северных регионах нужно вести целенаправленную селекционную работу. Необходимо создавать сорта с комплексной устойчивостью к неблагоприятным факторам среды, способных к реализации потенциальных возможностей сортового генотипа в различных погодных условиях.

Ключевые слова: селекция, семеноводство, конопля посевная, безнаркотический сорт, хозяйственно-ценные признаки, урожайность семян

Конопля (*Cannabis sativa* L.) – однолетнее растение семейства коноплевые (*Cannabinaceae*), которое широко применяется в текстильной, строительной, автомобильной, целлюлозно-бумажной, пищевой и фармацевтической промышленности. Сегодня конопля рассматривается в первую очередь, как многоцелевая культура, при производстве которой можно получать волокно, семена и КБД.

Величина семенной продуктивности растений, урожайность волокна зависят от совместимости генотипа растения с условиями района возделывания культуры. Несоответствия между генотипом и агроэкологическими условиями не позволяют растениям полностью реализовать свой биологический потенциал. Исходя из этого, основные усилия селекционеров направлены на создание высокопродуктивных, стабильных сортов конопли с высокой адаптационной способностью. Известно, что конопля посевная быстро адаптируется к климатическим и почвенным условиям среды обитания, однако резкие изменения

климата и неоднородность агроэкологических условий может привести к морфологическим и физиологическим изменениям самого растения и отразиться на величине получаемого урожая [1].

В связи с этим, была поставлена цель исследований – установить сравнительное влияние агроэкологических условий на формирование хозяйственно-ценных признаков и семенной продуктивности сортов конопли в условиях Среднего Поволжья и Западной части Центрального региона Нечерноземной зоны РФ.

Исследования проводили на посевах конопли посевной в Пензенской (Среднее Поволжье) и Смоленской (Западная часть Центрального региона) областях. Объектом исследований являлись сорта конопли посевной двустороннего направления использования: «Надежда» (преимущественно масличного, 2009 год включения в Государственный реестр) и «Людмила» (преимущественно для получения

зеленцово́й продукции, 2024 год включения в Государственный реестр).

Данные сорта технической конопли среднерусского экотипа получены методом кроссбридинга инцухт-линий поколения I6 с многократным непрерывным семейственно-групповым отбором по комплексу необходимых признаков и свойств.

Почва опытного участка в Смоленской области – дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая, содержание гумуса от 2.0-2.65 % (по Тюрину), обменного фосфора – от 160 до 178 мг/кг почвы, обменного калия – от 104 до 119 мг/кг почвы (по Кирсанову), реакция среды – слабокислая (рН 5.5-5.7). В Пензенской области почвы были представлены черноземом выщелоченным, среднесильным, тяжелосуглинистым с содержанием гумуса 6.18-8.00 % (по Тюрину), подвижного фосфора – 197.2 мг/кг почвы (по Чирикову), реакция среды – близкая к нейтральной (рН 6.0-6.5). Способ посева – широкорядный с междурядьями 70 см. Посев проведен в 1-2-й декадах мая.

Для борьбы с однолетними и многолетними двудольными сорными растениями провели двукратную междурядную обработку (КРН-4,2) с интервалом в 14 суток. Фенологические наблюдения осуществляли согласно методическим указаниям ВНИИР [2]. Урожайность семян определяли в период созревания культуры, приведенный урожай рассчитывали на стандартную влажность (13 %).

Метеорологические условия в период исследований различались по годам и регионам возделывания

[3]. В Пензенской области сумма активных температур в период вегетации составила 2121-2470°C, сумма осадков – 179.2-112.3 мм (ГТК 1.2-0.5). Недостаток влаги особенно был отмечен в оба года исследований и наиболее сильно проявился в период от посева до фазы трех пар листьев (ГТК 0-0.2) и от цветения до массового созревания семян (ГТК 0.1-0.51).

В Смоленской области в период вегетации конопли распределение тепла и влаги имело свои особенности. Сумма активных температур в период вегетации составила 2299-2385°C, сумма осадков – 236.5-305.9 мм (ГТК 1.1-1.3).

Метеорологические условия 2023 года отличались неравномерным распределением как тепла, так и влаги на протяжении всего периода вегетации, что послужило причиной увеличения длительности вегетации культуры до 134 суток. Острый дефицит влаги был отмечен в период от бутонизации до фазы массового цветения (ГТК 0.2).

Климатические условия 2024 года были наиболее благоприятны для растений конопли посевной на протяжении всего периода вегетации. Сравнительно высокие среднесуточные температуры воздуха (до 21°C) и обилие влаги способствовали получению максимально возможных показателей основных хозяйственно ценных признаков. Следует отметить, что в условиях 2024 года температурный режим не различался по регионам возделывания и растения практически одновременно завершили свой цикл развития: сорт Надежда на 105-109 сутки, сорт Людмила на 114-115 сутки (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика вегетационного периода конопли посевной в годы исследований (2023-2024 гг.)

Показатели	Пензенская область		Смоленская область	
	2023	2024	2023	2024
Продолжительность вегетационного периода, сут	124	105-115	134-139	109-114
Сумма среднесуточных температур, °С	2121	2270-2470	2272-2332	2299-2385
Сумма осадков, мм	179.2	112.3	236.5	305.9
Средняя температура воздуха, °С	17.1	21.6	16.9	21.09
ГТК	1.2	0.5	1.1	1.3

Таким образом, основным лимитирующим фактором при формировании хозяйственно-ценных признаков в Пензенской области может является недостаток влаги, в Смоленской области – недостаточный уровень теплообеспеченности.

Растения конопли в полевых условиях демонстрирует сильное взаимодействие между генотипом и окружающей средой, что проявляется в формировании разнообразных фенотипов в зависимости от года и от условий возделывания.

В Смоленской области высота растений у сорта Надежда в 2023 году изменялась от 55 до 116 см, в

2024 году – от 94 до 223 см; Пензенской области – от 231 до 244 см и от 157 до 187 см соответственно. Данная тенденция характерна для всех хозяйственно-ценных признаков обоих сортов, что в свою очередь показывает наличие пространственно-временной изменчивости, являющейся неотъемлемой характеристикой полевых исследований.

Варьирование основных хозяйственно полезных признаков конопли посевной в зависимости от периода исследований и региона возделывания представлено в таблице 2.

Влияние региона возделывания на основные хозяйственно-ценные признаки конопли посевной

Показатели		Пензенская область			Смоленская область		
		2023	2024	Среднее	2023	2024	Среднее
Сорт Надежда							
Высота, см	min-max	231-244	157-187		55-116	94-223	
	Среднее	239	181	210	89	155	122
Техническая длина, см	min-max	191-206	130-151		48-96	92-185	
	Среднее	200	142	171	74	144	109
Длина метелка, см	min-max	33-49	27-42		4-37	4-65	
	Среднее	40	34	37	15	24	19.5
Диаметр стебля, мм	min-max	8.0-10.1	6.2-7.8		3.1-6.4	4-11	
	Среднее	9.2	6.9	8,0	4.3	6.8	5.55
Кол-во междоузлий	min-max	10-12	11-12		8-10	9-11	
	Среднее	11	11	11	9	10	9
Сорт Людмила							
Высота, см	min-max	260-281	199-213		56-145	120-315	
	Среднее	276	205	240	112	179	146
Техническая длина, см	min-max	221-262	150-180		50-100	100-173	
	Среднее	237	165	201	80	146	113
Длина метелка, см	min-max	24-43	31-53		4-52	12-148	
	Среднее	37	40	38	32	33	32
Диаметр стебля, мм	min-max	9.9-11.5	6.7-9.0		3.1-8.0	4.8-11.2	
	Среднее	10.9	7.7	9,3	4.7	7.2	5.9
Кол-во междоузлий	min-max	12-14	12-13		9-11	10-12	
	Среднее	13	13	13	10	11	10

О степени реализации генетического потенциала сорта в различных агроклиматических условиях можно судить по средним показателям продуктивности культуры [4]. В среднем за годы исследований в условиях Пензенской области формируются более высокие показатели основных хозяйственно-ценных признаков обоих сортов. Однако в 2024 году в условиях Смоленской области изучаемые генотипы сортов конопли показали высокую способность к адаптации в изменяющихся агроклиматических условиях.

Если в 2023 году величина хозяйственно-ценных признаков была существенно ниже аналогичных показателей, полученных в Пензенской области, то в 2024 году данные показатели были сопоставимы или превосходили их. Максимальная длина метелки сорта Людмила в 2024 году достигала 148 см в Смоленской области и 53 см – в Пензенской области. Установлено, что диапазон варьирования всех хозяйственно ценных признаков при возделывании в Смоленской области несколько выше.

Таким образом, в условиях изменения климата генотипы конопли демонстрируют максимально высокие фенотипические показатели для нового региона возделывания: высота растений – 223 см у сорта Надежда, 315 см у сорта Людмила; длина метелки – 65 и 148 см соответственно.

Пространственно-временная изменчивость хозяйственно-ценных признаков конопли посевной отразилась на семенной продуктивности растений. Урожайность культуры в годы исследований в Пензенской области изменялась в пределах 0.77-2.97 т/га, в Смоленской области – от 0.53 до 1.18 т/га. Сравнительно низкие показатели продуктивности растений конопли в Пензенской области в 2024 году обусловлены неблагоприятным режимом влагообеспеченности. В то же время увеличение среднесуточных температур и обилие влаги в Смоленской области существенно повысили семенную продуктивность растений: урожайность семян сорта Надежда – 1.18 т/га; у сорта Людмила – 1.05 т/га (табл. 3).

Таблица 3

Продуктивность различных сортов конопли посевной сорта, т/га

Сорта	Пензенская область			Смоленская область		
	2023	2024	Среднее	2023	2024	Среднее
Надежда	2.97	1.37	2.17	0.65	1.18	0.91
Людмила	2.55	0.77	1.66	0.53	1.05	0.79

Результаты исследований показывают, что изучаемые генотипы сортов конопли обладают высокой

способностью к адаптации в изменяющихся агроклиматических условиях Западной части Центрального

региона и демонстрируют максимально высокие показатели хозяйственно-ценных признаков для данного региона возделывания: высота растений у сорта Надежда 223 см, у сорта Людмила – 315 см; длина метелки – 65 и 148 см соответственно.

Изменение режима тепло- и влагообеспеченности растений в условиях Западной части Центрального региона обеспечивает получение семян конопли посевной от 1.05 до 1.18 т/га.

В результате исследований выявлено, что для расширения посевных площадей в более северных регионах нужно вести целенаправленную селекционную работу. Необходимо создавать сорта с комплексной устойчивостью к неблагоприятным факторам среды, способных к реализации потенциальных возможностей сортового генотипа в различных погодных условиях.

Список литературы

1. Spatiotemporal variability and sensitivity of industrial hemp cultivars under variable field conditions / Hammami Nada [et al.] // European Journal of Agronomy. 2022. V. 138. P. 126549. doi.org/10.1016/j.eja.2022.126549.

2. Методические указания по проведению полевых и вегетационных опытов с коноплей / Г.П. Бедак [и др.]. М.: ВАСХНИЛ, 1980. 34 с.

3. Климатический монитор – мониторинг погоды в России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26882> (дата обращения 12.09.2023).

4. Амунова О.С. Влияние метеоусловий при вегетации на урожайность и урожайные качества семян мягкой яровой пшеницы // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. № 20(5). С. 437-446.

INFLUENCE OF AGROECOLOGICAL CONDITIONS ON THE FORMATION OF ECONOMICALLY VALUABLE TRAITS OF HEMP

Shimanskaya N. S., Ivanova S.V., Serkov V.A., Uschapovsky I.V.

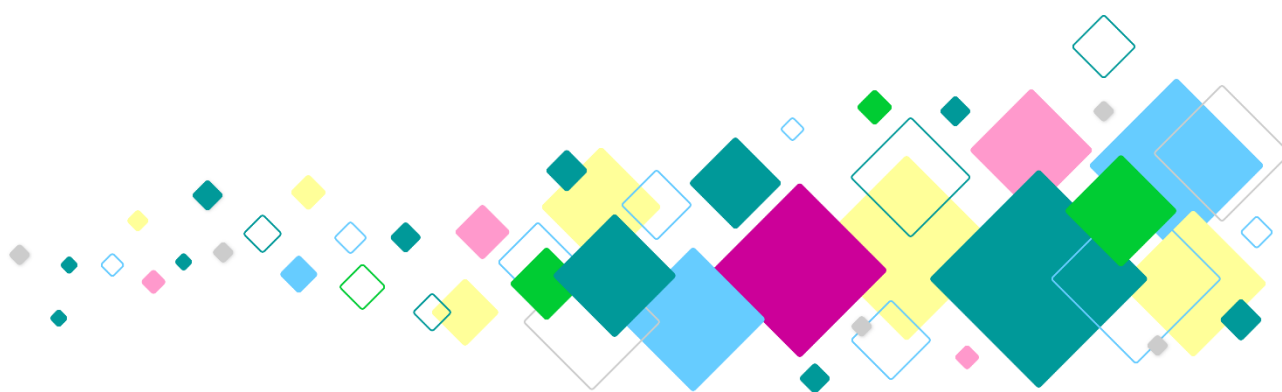
Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Center of Bast Crops»,
Komsomolsky prospect 17/56, Tver, Russian Federation, 170041

The article presents the results of a comparative assessment of the influence of agroecological conditions on the formation of economically valuable traits and seed productivity of hemp varieties in the conditions of the Middle Volga region and the Western part of the Central region of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation. It was found that under climate change, hemp genotypes demonstrate the highest phenotypic indicators for the new cultivation region: plant height is 223 cm for the Nadezhda variety, 315 cm for the Lyudmila variety; panicle length is 65 and 148 cm, respectively. The crop yield during the years of research in the Penza region varied within 0.77-2.97 t/ha, in the Smolensk region - from 0.53 to 1.18 t/ha. An increase in heat and moisture supply of plants makes it possible to significantly increase the seed productivity of plants in the Smolensk region to 1.18 t/ha for the Nadezhda variety and up to 1.05 t/ha for the Lyudmila variety. Based on the analysis, a reasonable conclusion was made that in order to expand the cultivated areas in more northern regions, it is necessary to conduct targeted breeding work. It is necessary to create varieties with complex resistance to unfavorable environmental factors, capable of realizing the potential of the varietal genotype in various weather conditions.

Keywords: *breeding, seed production, hemp, non-narcotic variety, economically valuable traits, seed yield*

ДОКЛАДЫ УЧАСТНИКОВ КОНКУРСА

«BIOSKILLS 2024: НАУКА КАК ОБРАЗ ЖИЗНИ»



ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГУБНЫХ ПОМАДАХ ИЗВЕСТНЫХ БРЕНДОВ

Братухина М.О.^{1,а}, Андрейчикова О.Н.¹, Шаврина К.Е.², Маркова М.В.², Эдомская М.А.²

¹ Наро-Фоминская средняя общеобразовательная школа №9. имени дважды Героя Советского Союза, лётчика-космонавта В.В. Лебедева, 143301, Московская область, г. Наро-Фоминск, ул. Шибанкова, д. 28, 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 bratuhina400@gmail.com

В рамках исследования были проанализированы 31 губная помада разных производителей на содержание 11 элементов. Среднее содержание Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As и Pb составило 2.2±1.7 мг/кг; 19.0±1.0 мг/кг; 61.7±2.6 мг/кг; 18386±472 мг/кг; 8.1±1.3 мг/кг; 56.7±1.9 мг/кг; 5.2±0.7 мг/кг; 39.2±1.4 мг/кг; 6.1±3.8 мг/кг; 2.3±1.2 мг/кг; 7.6±2.4 мг/кг, соответственно.

Ключевые слова: тяжелые металлы, губная помада, декоративная косметика, канцерогенный риск, неканцерогенный риск

Тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий, ртуть и хром, могут накапливаться в организме человека и вызывать серьезные проблемы со здоровьем, включая нарушения нервной системы, репродуктивные проблемы, раковые заболевания и повреждение органов [1]. Учитывая, что губные помады являются продуктом, который часто используется и может попадать в организм через контакт с губами, оценка их безопасности становится критически важной.

Цель работы – определить содержание тяжелых металлов в губных помадах популярных брендов и определение потенциальных рисков для здоровья.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования 31 образец помады различных брендов (таблица 1), охватывающих три ценовые категории (люкс – свыше 1000 руб., средний сегмент – от 200 до 1000 руб., бюджетный – менее 200 руб.), две текстуры (жидкие и твердые) и 7 оттенков.

В работе проведен анализ содержания тяжелых металлов Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As и Pb методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой ICP-MS SUPEC 7000. 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 [2].

Таблица 1

Исследуемые помады

№	Помада	Ценовой сегмент	Текстура	Цвет
1	Alobon Lip Gloss	Средние	Жидкая	Розовый
2	Armani No6	Люкс	Жидкая	Красный
3	Avon 3D Объем 16	Средние	Твердая	Розовый
4	Beauty Bomb Queen Moriarty 03 Brooke	Средние	Жидкая	Розовый
5	Beauty Bomb 34	Средние	Твердая	Синий
6	Bourjeis 18 Rouge Velvet	Люкс	Твердая	Коричневый
7	Dior Metallic 999	Люкс	Твердая	Красный
8	Dior Vibrant Tourmaline 671	Люкс	Твердая	Розовый
9	Divage Velvet Matt Liquid Color 10	Средние	Жидкая	Бордовый
10	Elian Crème Stick 52	Средние	Твердая	Бордовый
11	Faberlic 4581	Бюджетные	Твердая	Розовый
12	Feministe 01	Средние	Твердая	Коричневый
13	Fennel 13	Бюджетные	Твердая	Розовый

№	Помада	Ценовой сегмент	Текстура	Цвет
14	Influence Beauty 05 Inert Flame	Средние	Твердая	Бордовый
15	Kari AC390-3 №003	Средние	Жидкая	Красный
16	KLOG 01	Средние	Жидкая	Красный
17	KLOG 02	Средние	Жидкая	Красный
18	Lipstick Matte Ushas 01	Бюджетные	Твердая	Красный
19	Maybelline New York 445 MD	Люкс	Твердая	Красный
20	Nars Lipstick Rouge A Levres Orgasm	Люкс	Твердая	Красный
21	Oriflame Cherry Cocoa	Средние	Твердая	Коричневый
22	Oriflame Colour 1328	Средние	Твердая	Розовый
23	Oriflame 2023	Средние	Твердая	Черный
24	Oriflame 2022	Бюджетные	Жидкая	Фиолетовый
25	Punk Style 10	Бюджетные	Жидкая	Синий
26	Punk Style 11	Бюджетные	Жидкая	Черный
27	Punk Style 12	Бюджетные	Твердая	Черный
28	Teason Lip Smackind Fun Color 07	Средние	Твердая	Розовый
29	Triumph Colour Rich Lipstick CZ06 56	Средние	Твердая	Розовый
30	Triumph Cr06-18	Средние	Твердая	Розовый
31	Vivienne Sabo 611	Бюджетные	Твердая	Черный

Таблица 2

Содержание элементов в помадах

№	Помада	Содержание элементов, мг/кг										
		Be	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
1	Alobon Lip Gloss	<1	8.6±2.5	17.6±0.7	9332±216	<1	29.1±2.4	3.2±0.9	14.1±0.4	<1	<1	3.3±2.2
2	Armani №6	<1	1.7±0.3	23.1±0.8	9873±287	<1	29.2±0.9	<1	33.4±1	<1	<1	<1
3	Avon 3D Объем 16	<1	4.1±0.4	<1	5940±67	<1	19.8±0.8	<1	21.3±0.2	<1	<1	<1
4	Beauty Bomb Queen Moriarty 03 Brooke	<1	<1	11.9±0.3	3766±48	<1	12.9±0.4	<1	25.3±0.5	<1	<1	<1
5	Beauty Bomb 34	<1	4.9±1.7	2.2±1.6	261±63	<1	8.5±1.9	1.5±1.6	12.1±1.1	<1	<1	1.9±1.4
6	Bourjeis 18 Rouge Velvet	<1	1.9±0.3	7.8±0.4	38847±1047	<1	99.0±1.6	<1	6.2±0.6	<1	<1	<1
7	Dior Metallic 999	<1	<1	<1	3257±77	<1	3.4±0.3	<1	54.3±1.5	<1	<1	<1
8	Dior Vibrant Tourmaline 671	<1	4.4±0.2	7.8±0.3	657±13	<1	11.6±0.5	1.7±0.1	20.4±0.5	<1	<1	<1
9	Divage Velvet Matt Liquid Color 10	<1	2.7±0.3	45.9±2.4	30020±1009	<1	78.1±2.3	<1	9.5±0.7	<1	<1	<1
10	Elian Crème Stick 52	<1	1.7±0.2	13.8±0.5	54376±877	<1	136.2±2.2	<1	21.8±0.5	<1	<1	<1
11	Faberlic 4581	<1	187.7±3.1	18.3±1.0	723±28	<1	162.3±5.7	3.9±0.3	15.9±0.9	<1	<1	<1
12	Feministe 01	<1	4.4±0.3	51.5±0.8	9110±201	<1	24.0±0.9	<1	12.9±0.7	<1	<1	<1
13	Fennel 13	<1	3.6±0.3	4.2±0.3	7082±133	<1	20.2±0.9	1.4±0.3	9.9±0.5	<1	<1	<1
14	Influence Beauty 05 Inert Flame	<1	<1	2.5±0.6	406±58	<1	6.4±0.5	<1	18.1±1.0	<1	<1	<1
15	Kari AC390-3 №003	<1	11.2±0.5	7.1±0.4	10961±436	<1	31.2±1.5	2.8±0.3	21.0±1.0	<1	<1	<1
16	KLOG 01	<1	7.1±0.4	6.1±1.3	25601±1696	<1	64.9±1.4	2.6±0.1	17.4±1.1	<1	<1	<1
17	KLOG 02	<1	2.4±0.1	8.4±0.4	21968±556	<1	54.3±1.6	3.1±0.1	16.8±1.6	<1	<1	<1
18	Lipstick Matte Ushas 01	<1	<1	<1	265±35	<1	4.8±0.2	<1	27.2±0.8	<1	<1	<1
19	Maybelline New York 445 MD	<1	6.0±1.0	11.7±0.2	179±14	<1	6.9±0.9	4.8±0.2	24.9±0.6	<1	<1	<1
20	Nars Lipstick Rouge A Levres Orgasm	<1	<1	5.5±0.7	1760±32	<1	8.8±0.5	5.7±0.9	25.8±1.1	<1	<1	<1
21	Oriflame Cherry Cocoa	<1	2.8±0.3	49.8±1.7	30236±755	<1	74.2±1.9	1.9±0.1	9.9±0.4	<1	<1	<1
22	Oriflame Colour 1328	<1	<1	4.7±0.7	6082±103	<1	19.9±0.5	<1	25.8±0.9	<1	<1	<1

№	Помада	Содержание элементов, мг/кг										
		Be	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
23	Oriflame 2023 34360	<1	5.7±0.1	101.7±2.7	41471±595	<1	96.2±2.7	1.3±0.1	5.5±0.4	<1	<1	<1
24	Oriflame 2022 34360	<1	16.8±5.6	95.7±4.0	35524±1152	9±5.1	103.1±5.7	10.3±5.3	22.4±4.8	<1	9.4±5.9	10.5±5.1
25	Punk Style 10	<1	4.8±0.4	9.5±0.1	531±27	1.4±0.2	6.1±0.5	15.7±0.4	10.8±0.6	<1	<1	<1
26	Punk Style 11	<1	29.3±0.8	16.0±1.6	2240±370	2.4±0.3	23.8±1.6	3.7±0.5	22.1±2.5	<1	<1	<1
27	Punk Style 12	<1	47.7±1.8	406.5±22.7	92386±1886	11.7±0.5	245.1±7.6	23.7±0.9	591.2±13.9	<1	<1	18.6±1.4
28	Teason Lip Smackind Fun Color 07	<1	8.6±0.4	756.0±24.9	94377±1532	16.1±0.5	243.4±5.0	6.9±0.2	66.0±1.5	<1	<1	<1
29	Triumph Colour Rich Lipstick CZ06 56	<1	2.5±1.0	3.7±1.0	253±20	<1	7.6±1.0	5.2±1.5	19.1±1	<1	<1	<1
30	Triumph Cr06-18	2.2±1.7	103.3±3.3	33.7±1.3	30306±1224	<1	119.2±5.4	3.4±0.9	15.4±0.9	2.3±1.2	2.8±1.7	3.7±1.8
31	Vivienne Sabo 611	<1	1.6±0.3	6.1±0.4	2181±61	<1	8.1±0.5	1.3±0.1	19.4±0.8	<1	<1	<1

Pb обнаружен в 5 образцах, содержание Pb в 2-х из них превышает норму. As обнаружен в 1 образце и его содержание не превышает норматива. Be был обнаружен в 1 образце, Cr в 25 образцах, Ni во всех образцах, Cd в 2 образцах, однако эти элементы не должны содержаться в парфюмерно-косметических продуктах. Наивысшее содержание тяжелых металлов зафиксировано в помадах темных оттенков, особенно в черных. По ценовым сегментам наибольшее содержание тяжелых металлов наблюдается в

помадах бюджетного сегмента, что, вероятно, связано с цветом помад.

В зависимости от типа помад содержание элементов распределяется по-разному. Содержание Fe, Zn, Cu и Pb выше в жидких помадах, а содержание Mn, Cr и Co – в твердых. Содержание Ni в твердых и жидких помадах одинаковое. Be, Cd и As были обнаружены только в твердых помадах.

По содержанию тяжелых металлов были рассчитаны коэффициенты опасности для канцерогенных и неканцерогенных рисков (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты опасности для неканцерогенных (NI) и канцерогенных (TCR) рисков

Неканцерогенный риск						
№ помады	1	2	3	4	5	
NI	7.02·10 ⁻³	6.91·10 ⁻³	4.28·10 ⁻³	2.64·10 ⁻³	5.82·10 ⁻⁴	
№ помады	6	7	8	A9	10	
NI	2.66·10 ⁻²	2.21·10 ⁻³	7.62·10 ⁻⁴	2.07·10 ⁻²	3.72·10 ⁻²	
№ помады	11	12	13	14	15	
NI	9.57·10 ⁻³	6.49·10 ⁻³	5.03·10 ⁻³	3.46·10 ⁻⁴	8.02·10 ⁻³	
№ помады	16	17	18	19	20	
NI	1.78·10 ⁻²	1.51·10 ⁻²	2.40·10 ⁻⁴	5.06·10 ⁻⁴	1.33·10 ⁻³	
№ помады	21	22	23	24	25	
NI	2.08·10 ⁻²	4.22·10 ⁻³	2.86·10 ⁻²	7.96·10 ⁻⁴	2.96·10 ⁻³	
№ помады	26	27	28	29	30	31
NI	6.75·10 ⁻²	6.62·10 ⁻²	4.10·10 ⁻⁴	2.83·10 ⁻²	1.61·10 ⁻³	2.97·10 ⁻²
Канцерогенный риск						
№ помады	1	5	26	29	31	
TCR	1.32·10 ⁻⁸	7.42·10 ⁻⁹	7.37·10 ⁻⁸	1.00·10 ⁻⁶	3.43·10 ⁻⁷	

Коэффициенты опасности неканцерогенных и канцерогенных рисков для всех исследуемых помад ниже приемлемого уровня риска, равного 1 и 1·10⁻⁶ [2], соответственно. Следовательно, использование исследуемых помад является безопасным и не приводит к образованию злокачественных опухолей.

По результатам расчета был выявлен следующий порядок неканцерогенного риска у помад разных

цветов: черный > коричневый и бордовый > красный > розовый > синий и фиолетовый. Что касается ценового сегмента, то в нем также наблюдается определенная тенденция: бюджетные помады имеют более высокий неканцерогенный риск, чем средние и люксовые. Кроме того, было установлено, что жидкие помады обладают более высоким уровнем неканцерогенного риска.

Суммарный канцерогенный риск у помад различных цветов распределяется следующим образом, розовая помада имеет самый высокий риск, за ней следуют черная и синяя. Канцерогенный риск был выявлен у помад как среднего, так и бюджетного ценового сегмента, при этом помады среднего сегмента имели более высокий уровень риска. Кроме того, канцерогенный риск был выше у твердых помад по сравнению с жидкими.

Выводы

В рамках исследования было проанализировано содержание 11 элементов (Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd и Pb) в 31 губной помаде от разных производителей. Среднее содержание каждого элемента составило: Be – 2.2 ± 1.7 мг/кг, Cr – 19.0 ± 1.0 мг/кг, Mn – 61.7 ± 2.6 мг/кг, Fe – 18386 ± 472 мг/кг, Co – 8.1 ± 1.3

мг/кг, Ni – 56.7 ± 1.9 мг/кг, Cu – 5.2 ± 0.7 мг/кг, Zn – 39.2 ± 1.4 мг/кг, Cd – 6.1 ± 3.8 мг/кг, As – 2.3 ± 1.2 мг/кг, Pb – 7.6 ± 2.4 мг/кг. Коэффициенты опасности канцерогенных и неканцерогенных рисков для всех исследуемых помад находятся на приемлемом уровне риска.

Список литературы

1. Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия: учебник. М.: Издательство Московского Университета, 2013. 304 с.

2. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

ASSESSMENT OF HEAVY METAL CONTENT IN LIPSTICKS OF FAMOUS BRANDS

Bratukhina M.O.^{1,a}, Andreichikova O.N.¹, Shavrina K.E.², Markova M.V.², Edomsкая M.A.²

¹ Naro-Fominsk secondary school No. 9. named after twice Hero of the Soviet Union, cosmonaut V.V. Lebedev, Naro-fominsk, Russia

² Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre «Kurchatov Institute», Kievskoe shosse 1, bld. 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249035

The study analyzed 31 lipsticks from different manufacturers for the content of 11 elements. The average content of Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, As and Pb was 2.2 ± 1.7 mg/kg; 19.0 ± 1.0 mg/kg; 61.7 ± 2.6 mg/kg; 18386 ± 472 mg/kg; 8.1 ± 1.3 mg/kg; 56.7 ± 1.9 mg/kg; 5.2 ± 0.7 mg/kg; 39.2 ± 1.4 mg/kg; 6.1 ± 3.8 mg/kg; 2.3 ± 1.2 mg/kg; 7.6 ± 2.4 mg/kg, respectively.

Keywords: heavy metals, lipstick, decorative cosmetics, carcinogenic risk, non-carcinogenic risk

УДК 577.34

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ РАДИОПРОТЕКТОРНЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИИ

Купцова П.С.^a, Ольховая Е.Р., Лапенко А.К., Комарова Л.Н.

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: ^a kuptsova_apollinaria@mail.ru

В работе исследованы радиопротекторные свойства фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и деанола ацеглумата при действии гамма-излучения, излучения ионов ^{12}C и протонного излучения на нормальных и опухолевых клетках человека. Показан радиозащитный эффект исследуемых соединений, степень выраженности которого зависит от качества излучения (ОБЭ).

Ключевые слова: радиопротекторы, гамма-излучение, ионы ^{12}C , протонное излучение, фибробласты, нейробластома, фумаровая кислота, фумарат 3-гидроксипиридина, деанола ацеглумат

Введение

Широкое использование источников ионизирующего излучения в медицине, энергетике, промышленности и других сферах жизни создает риски неконтролируемых аварийных ситуаций и, следовательно, опасность лучевого поражения людей [1].

По данным статистики в 2020 году в стране лучевая терапия проведена 192,3 тыс. пациентам, т.е. 60.1 % нуждающихся в этом виде лечения [2]. Лучевую терапию проводят как в монорежиме, так и в сочетании с радиосенсибилизирующими препаратами (химиотерапия) и/или с хирургическим методом. При проведении лучевой терапии, несмотря на совершенствование радиологических установок и методов лучевой терапии, повреждающему действию ионизирующего излучения подвергаются не только опухолевые клетки, но и здоровые ткани, окружающие опухоль и находящиеся в зоне лучевого воздействия [3]. От объема здоровой ткани напрямую зависит количество побочных эффектов, а именно развитие лучевых повреждений, лучевых поражений слизистых, кожных покровов, сосудистой системы, а также более глубокорасположенных тканей [4, 5].

Следовательно, одной из важнейших задач в радиобиологии и клинической онкологии является поиск и разработка радиопротекторов, которые используются для защиты нормальных тканей от повреждающего действия ионизирующего излучения [6]. К тому же использование радиопротекторов может улучшить терапевтический индекс лучевой терапии (то есть отношение гибели опухолевых клеток к гибели нормальных тканей, вызванной данной дозой) [3, 7]. Большинство существующих радиопротекторов обладают рядом недостатков: для части радиопротекторов характерна острая и хроническая токсичность, которая в процессе многократного применения накапливается. Используемые радиозащитные средства не обеспечивают защиту здоровых тканей организма при пролонгированном или фракционированном облучении низкой интенсивности.

Перспективным направлением является поиск возможных радиозащитных средств среди антиоксидантных соединений. Защитный эффект антиоксидантов при действии ионизирующего излучения на организм связан, прежде всего, с их способностью подавлять процессы свободно-радикального окисления и повышать активность антиоксидантных систем организма. К таким соединениям относятся деанола ацеглумат, фумаровая кислота и производное фумаровой кислоты – фумарат 3-гидроксипиридина. Они обладают антиоксидантными, антиокислительными и антирадикальными свойствами, что может послужить основой их перспективного применения в качестве радиопротекторов [8-11].

Следовательно, **цель** работы состоит в исследовании потенциальных радиопротекторов для защиты биологических объектов от действия ионизирующего излучения: определение эффективности защиты фумаровой кислоты, фумарата 3-гидроксипиридина и

деанола ацеглумата при действии гамма-излучения, протонного излучения и облучения тяжелыми ионами углерода 12 на клетки человека.

Материалы и методы

Объект исследования – клеточные линии: фибробласты hTERT (нормальные клетки соединительной ткани) и нейробластома SK-N-BE (эмбриональная опухоль стволовых нервных клеток нейробластов). Клетки культивировали по стандартной методике [12].

Исследуемые соединения – фумаровая кислота (0.05 М), фумарат 3-гидроксипиридина (0.01 М), деанола ацеглумат (0.01 М). Клетки инкубировали с исследуемыми веществами в течение 24-х часов.

Облучение на гамма-установке «ГУР-120». Облучение гамма-квантами проводили на Уникальной научной установке НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ (г. Обнинск) «ГУР-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{\text{ср}}=1.25$ МэВ). Мощность дозы составила 0.9 Гр/мин.

Облучение на комплексе протонной терапии «Прометеус» (АО «Протом») Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба (г. Обнинск). Облучение осуществлялось со средней энергией 100 МэВ.

Облучение на ускорителе ионов У-70. Облучение ионами ^{12}C проводили на ускорителе У-70 Института физики высоких энергий (ИФВЭ) ФГБУ ГНЦ РФ «Курчатовский институт» (г. Протвино). Облучение осуществлялось в водном фантоме со средней энергией 455.8 МэВ/нуклон.

Эффекты действия ионизирующего излучения на клетки оценивали с помощью расчета времени удвоения и анализа клоногенной активности. Радиозащитный эффект оценен с помощью показателя ФИД (фактор изменения дозы). Контролем служили интактные клетки.

Результаты и обсуждения

Показано, что применение фумаровой кислоты, деанола ацеглумата и фумарата 3-оксипиридина оказывает радиозащитное действие на нормальные и опухолевые клетки при облучении их гамма-квантами в дозах 2, 6, 8 и 12 Гр. Проявление радиопротекторных свойств по отношению к действию γ -излучения на опухолевые клетки человека объясняется тем, что исследуемые препараты не обладают селективностью по отношению к нормальным клеткам человека.

Показано, что применение фумаровой кислоты, деанола ацеглумата и фумарата 3-оксипиридина не оказывает радиозащитного действия на клетки при облучении их ионами ^{12}C и протонами. Это объясняется высокой ОБЭ данных видов излучения. Полученные данные представляют большой интерес, так как нормальные ткани, находящиеся за пиком Брэгга, могут быть защищены от вторичных продуктов ионно-

углеродной и протонной терапии (например, гамма-квантов), в то время как опухолевые клетки не будут подвергаться радиозащитному действию препаратов.

Сравнительный анализ результатов действия препаратов с гамма-квантами, ионами ^{12}C и протонами показал существенную зависимость проявления модифицирующих свойств от качества излучения. Причиной радиопротекторного эффекта исследуемых соединений являются их антиоксидантная и антирадикальная активность. В частности, данные свойства направлены на снижение косвенного влияния ионизирующего излучения, то есть на снижение активности свободных радикалов. Это хорошо коррелирует с полученными результатами, так как ингибирующее действие гамма-квантов обусловлено возникновением АФК и свободных радикалов. Напротив, облучение ионами ^{12}C и протонами характеризуется прямым действием, вызывающим нерепарируемые повреждения ДНК.

Заключение

Представляет интерес дальнейшие исследования соединений с целью более глубокого изучения их радиопротекторных свойств. Такие исследования обусловлены необходимостью поиска перспективных препаратов, которые будут использоваться в качестве модификаторов действия ионизирующего излучения на живые организмы. Радиопротекторы особенно актуальны в онкологии для снижения лучевой нагрузки на здоровые ткани, окружающие опухоль, а также в космической медицине, гражданской обороне и военном деле в качестве противорадиационных препаратов.

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. Хмелевский Е.В. Отчет главного внештатного специалиста – радиолога (радиотерапевта) МЗ РФ за 2020 г. / Министерство здравоохранения Российской

Федерации, 2020. URL: <https://static-0.minzdrav.gov.ru/> (дата обращения: 13.07.2024).

3. Decreasing the Toxicity of Radiation Therapy: Radioprotectors and Radiomitigators Being Developed by the National Cancer Institute Through Small Business Innovation Research Contracts / K. Zakeri [et al.] // International Journal of Radiation Oncology. Biology. Physics. 2019. V. 104. PP. 188-196.

4. Васин М.В., Ушаков И.Б. Радиопротекторы как средства защиты здоровых тканей при радиохимиотерапии // Радиобиологические основы лучевой терапии: сборник докладов 3-й Российской конференции с международным участием (г. Дубна, 17-18 октября 2019 г.). Дубна: ОИЯИ, 2019. С. 25-28.

5. Gardner S.J., Kim J., Chetty I.J. Modern Radiation Therapy Planning and Delivery // Hematology/Oncology Clinics of North America. 2019. V. 33. PP. 947-962.

6. Radioprotectors.org: an open database of known and predicted radioprotectors / A.M. Aliper [et al.] // Aging. 2020. V. 12(15). PP. 15741-15755.

7. Greenberger J.S. Radioprotection // In vivo. 2009. V. 23. № 2. PP. 323-336.

8. Защитные свойства нооклерина при цитостатических повреждениях / Н.И. Микуляк [и др.] // Образовательный вестник «Сознание». 2012. № 9. С. 247-248.

9. Fumaric acid: production and separation / R.A. Illica [et al.] // Biotechnology letters. 2019. V. 41. PP. 47-57.

10. Different Fumaric Acid Esters Elicit Distinct Pharmacologic Responses / B.T. Wipke [et al.] // Neurology: Neuroimmunology & Neuroinflammation. 2021. V. 8. PP. 1-11.

11. Купцова П.С., Комарова Л.Н., Выпова Е.Р. Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16. № 1. С. 32-39.

12. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов / А.Ю. Прилепский, А.С. Дроздов, В.А. Богатырев, С.А. Староверов. СПб: Университет ИТМО, 2019. 43 с.

RESEARCH OF NEW RADIOPROTECTIVE DRUGS TO PROTECT HUMAN FROM THE EFFECTS OF RADIATION

Kuptsova P.S., Olkhovaya E.R., Lapenko A.K., Komarova L.N.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, ter. Studgorodok 1, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation, 249039

The study examined the radioprotective properties of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol aceglumate when exposed to gamma radiation, ^{12}C ion radiation and proton radiation on normal and tumor human cells. The radioprotective effect of the studied compounds was shown, the severity of which depends on the quality of radiation (RBE).

Keywords: radioprotectors, gamma radiation, ^{12}C ions, proton radiation, fibroblasts, neuroblastoma, fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate, deanol aceglumate

One of the most important tasks in radiobiology and clinical oncology is the search and development of radioprotectors that are used to protect normal tissues from the damaging effects of ionizing radiation. A promising direction is the search for possible radioprotective agents among antioxidant compounds. The protective effect of antioxidants under the influence of ionizing radiation on the body is associated with their ability to suppress the processes of free radical oxidation and increase the activity of the body's antioxidant systems. These compounds include deanol aceglumate, fumaric acid and a fumaric acid derivative – 3-hydroxypyridine fumarate.

The aim of this work is to study potential radioprotectors for the protection of biological objects from the effects of ionizing radiation: determining the effectiveness of the protection of fumaric acid, 3-hydroxypyridine fumarate and deanol aceglumate under the influence of gamma radiation, proton radiation and irradiation with heavy carbon ions ^{12}C on human cells.

It has been shown that the use of fumaric acid, deanol aceglumate and 3-hydroxypyridine fumarate has a radioprotective effect on normal and tumor cells when irradiated with gamma rays at doses of 2, 6, 8 and 12 Gy. The manifestation of radioprotective properties in relation to the effect of gamma radiation on human tumor cells is explained by the fact that the studied drugs do not have selectivity with respect to normal human cells.

It has been shown that the use of fumaric acid, deanol aceglumate and 3-hydroxypyridine fumarate does not have a radioprotective effect on cells when

irradiated with ^{12}C ions and protons. This is due to the high EE of these types of radiation. The data obtained are of great interest, since normal tissues located beyond the Bragg peak can be protected from secondary products of ion-carbon and proton therapy (for example, gamma rays), while tumor cells will not be exposed to the radioprotective effect of drugs.

A comparative analysis of the results of the action of drugs with gamma quanta, ^{12}C ions and protons showed a significant dependence of the manifestation of modifying properties on the quality of radiation. The reason for the radioprotective effect of the studied compounds is their antioxidant and antiradical activity. In particular, these properties are aimed at reducing the indirect effect of ionizing radiation, that is, reducing the activity of free radicals. This correlates well with the results obtained, since the inhibitory effect of gamma rays is due to the appearance of ROS and free radicals. On the contrary, irradiation with ^{12}C ions and protons is characterized by a direct effect that causes unrepaired DNA damage.

Further studies of compounds with a view to a deeper study of their radioprotective properties are of interest. 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. Radioprotectors are especially relevant in oncology to reduce radiation exposure to healthy tissues surrounding the tumor, as well as in space medicine, civil defense and military affairs as anti-radiation drugs.

УДК 546.11.027*3:581.5

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ ПО ВЕГЕТАТИВНЫМ ОРГАНАМ ДИКОРАСТУЩИХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ С ПОДЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТРИТИЯ

Михайлов А.В.^а, Лукашенко С.Н., Эдомская М.А., Томсон А.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 mikhajlovav@oiate.ru*

Исследование распределения трития по вегетативным органам растений проводилось на природном объекте вблизи ФЭИ. Установлено, что распределение ТСВ по вегетативным органам растений неоднородно. Распределение ТСВ по вегетативным органам растений зависит от пути поступления трития в растение. Соотношение концентраций ТСВ в листьях и стеблях является хорошим индикатором механизма поступления трития в растительность. Обнаружена существенная разница в содержании ТСВ в вегетативных органах дикорастущих растений разных видов. Выявлено изменение содержания ТСВ в вегетативных органах растений одного вида в разные фазы вегетации.

Ключевые слова: *распределение трития, дикорастущие растения, вегетативные органы растений, аэральный механизм поступления, корневой механизм поступления*

В рамках данной работы представлены результаты масштабных исследований содержания трития свободной воды (ТСВ) в дикорастущих растениях, произрастающих на территории с подземным источником трития. Исследование проводилось на природном участке, на котором доказано наличие подземного источника трития [1]. Исследовались различные виды растений: травянистые, кустарниковые, древесные. Отдельно анализировалась концентрация ТСВ в различных вегетативных органах одних и тех же растений. Отбор проб проводился в течение всего вегетационного периода от прорастания до увядания растений. Дополнительно изучались растения с аэральным поступлением трития. Активность трития определялась методом ЖСС.

Концентрация ТСВ в листьях растений при корневом пути поступления трития в растения в среднем составляет 0.71 от концентрации ТСВ в стеблях этих же растений. Эта величина варьирует от 0.30 ± 0.06 до 1.1 ± 0.3 для растений разных видов, но никогда достоверно не превышает 1. Концентрация ТСВ в листьях растений с аэральным поступлением трития в среднем в 1.5 раза превышает концентрацию ТСВ в стеблях этих же растений. Эта величина варьирует от 0.86 ± 0.59 до 2.9 ± 1.9 , но никогда не бывает существенно ниже 1.

Концентрация ТСВ в одних и тех же вегетативных органах травянистых растений разных видов, произрастающих на одном участке, существенно различается – до 2.6 раз. Концентрация ТСВ в вегетативных органах травянистых и древесных растений также существенно различается – до 2.3 раз.

Концентрация ТСВ в одних и тех же вегетативных органах растений разных видов может различаться до 3.5 раз. В то же время концентрация ТСВ в

кустарниковых и древесных растениях различается не столь существенно – среднее различие составляет 1.2 раза, при этом наибольшее выявленное различие составило 1.4 раза. Практически нет существенной разницы между содержанием ТСВ в разных видах древесных и кустарниковых растений.

Обнаружена зависимость концентрации ТСВ в вегетативных органах растений одного вида на разных стадиях вегетации. Концентрация ТСВ в одном и том же вегетативном органе растения одного вида варьирует до 14 раз и, как правило, существенно снижается к концу вегетационного периода.

Таким образом, доказано, что распределение трития по вегетативным органам дикорастущих растений неравномерно. Оно зависит от механизма поступления трития в растение, вида растения, фазы его вегетации. Предложен инновационный метод определения механизма поступления трития в растение по коэффициенту М – отношению ТСВ в листьях к ТСВ в стеблях растений. При значении коэффициента М ниже 1 поступление трития в растительность преимущественно корневое, при значении выше 1 – аэральное.

Исследование проведено за счет гранта РФФИ N23-24-00165.

Список литературы

1. Development of methodology for identification and assessment of ecosystems with an underground source of tritium / S.N. Lukashenko, D.N. Kurbakov, A.V. Tomson [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. 2024. V. 274. P. 107399.

DISTRIBUTION OF TRITIUM IN VEGETATIVE ORGANS OF WILD PLANTS GROWING IN TERRITORIES WITH AN UNDERGROUND SOURCE OF TRITIUM

Mikhailov A.V., Lukashenko S.N., Edomskaya M.A., Tomson A.V.

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

The study of tritium distribution in vegetative organs of plants was conducted at a natural site. It was found that the distribution of tritium in vegetative organs of plants is non-uniform. The distribution of tritium in vegetative organs of plants depends on the mechanism of tritium entry into vegetation. The ratio of tritium concentrations in leaves and stems is a good indicator of the mechanism of tritium entry into vegetation.

Keywords: *tritium distribution, wild plants, vegetative organs of plants, aerial mechanism of entry into vegetation, root mechanism of entry into vegetation*

The presented work presents the results of large-scale studies of the content of tissue free water tritium (TFWT) in wild plants growing in an area with an underground tritium source. The study was conducted in a natural area where the presence of an underground tritium source has been proven. Various plant species were studied: herbaceous, shrubby, and woody. The TFWT concentration in various vegetative organs of the same plants was analyzed separately. Sampling was carried out throughout the growing season from germination to wilting of plants. In addition, plants with aerial tritium intake were studied.

The TFWT concentration in plant leaves with root tritium intake into plants averages 0.71 of the TFWT concentration in the stems of the same plants. This value varies from 0.30 ± 0.06 to 1.1 ± 0.3 for plants of different species. The concentration of TFWT in the leaves of plants with aerial tritium supply is on average 1.5

times higher than the concentration of TFWT in the stems of the same plants. This value varies from 0.86 ± 0.59 to 2.9 ± 1.9 .

Distribution of TFWT by vegetative organs of plants depends on the mechanism of tritium entry into the plant. The ratio of TFWT concentrations in leaves and stems is a good indicator of the mechanism of tritium entry into vegetation. A significant difference in the content of tritium-containing compounds in vegetative organs of wild plants of different species has been found. Changes in the TFWT concentration in vegetative organs of plants of the same species in different phases of vegetation have been revealed.

This work was carried out with the support of the Russian Science Foundation, grant No. 23-24-00165 <https://rscf.ru/project/23-24-00165/>

УДК 577.34

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МЕЛАТОНИНА

Тендитник Е.А.^а, Ольховая Е.Р., Купцова П.С., Лапенко А.К., Чудновец Т.А., Комарова Л.Н., Ляпунова Е.Р.

*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: ^аlizatenditnik@gmail.com*

Исследованы радиозащитные свойства мелатонина при действии гамма-излучения на нормальные клетки человека. Проведенные тесты на определение клоногенной активности клеток и времени удвоения показали наличие у вещества радиопротекторного эффекта различной степени. В дополнение был выполнен сравнительный анализ радиопротекторного эффекта мелатонина и цистамина.

Ключевые слова: мелатонин, радиопротектор, гамма-излучение, hTERT, цистамин, клоногенная активность, время удвоения

Введение

Частота применения ионизирующего излучения в различных областях, таких как атомная энергетика, медицина и космические исследования, возрастает. Однако, несмотря на развитие технологий, сохраняется риск облучения населения и персонала, превышающего значения естественного фона радиации. Радиация, в частности гамма-излучение, косвенно воздействует на организм человека, а также беспрепятственно проникает вглубь тела. При взаимодействии гамма-квантов с молекулами воды происходит образование активных форм кислорода. Эти высоко-реактивные соединения обладают сильной способностью к окислению, могут вступать в реакции с молекулами организма и вызывать радиобиологическое повреждение. Итогом косвенного влияния

гамма-излучения являются нарушения клеточной структуры: разрушение липидных мембран, мутации ДНК, изменение структуры белка и другие [1].

Исходя из косвенного механизма действия гамма-излучения, основополагающей для защиты от этого типа излучения является антиоксидантная способность веществ. Эффективные радиопротекторы участвуют в поглощении образующихся при действии излучения радикалов, тем самым снижая окислительное повреждение клеток. Перспективным и актуальным является поиск безопасных и эффективных протекторов среди природных соединений.

Одним из таких веществ является мелатонин. Хотя мелатонин наиболее известен как препарат от бессонницы, его радиопротекторная способность обеспечивается благодаря другим функциям в организме. В основе его радиозащитного эффекта лежат антиоксидантные свойства. Мелатонин может как

самостоятельно поглощать свободные радикалы, так и образовывать каскад антиоксидантных метаболитов [2]. По сравнению с химическими радиопротекторами, такими как цистамин, амифостин, токсичность мелатонина низка [3].

Таким образом, целью является исследование радиозащитных свойств мелатонина при действии гамма-квантов на фибробласты человека.

Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны фибробласты человека hTERT. Культивирование производилось с использованием стандартной методики [4].

Исследуемым соединением послужил мелатонин в концентрациях 0.2 мг/мл и 0.5 мг/мл. Время предварительного инкубирования клеток с мелатонином составило 24 часа. Для определения эффективности радиозащитных свойств мелатонина было проведено сравнение вещества с цистамином, известным радиопротектором. Концентрация цистамина составила 1.52 мг/мл, а время инкубирования – 30 минут.

Условия облучения: часть клеток подвергалась действию только ионизирующего излучения, часть клеток облучалась с препаратом, добавленным за определенное время до облучения. Контролем служили интактные клетки (необлученные и не обработанные препаратами).

Облучение гамма-квантами проводилось на Уникальной научной установке НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ «Гур-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{\text{cp}} = 1.25$ МэВ). Мощность дозы составила 0.9 Гр/мин. Дозы облучения: 1, 4, 6, 10 Гр.

Для определения влияния гамма-квантов на клетки были проведены такие тесты, как определение клоногенной активности и времени удвоения клеток. Радиозащитное действие вещества оценивалось по показателю фактора изменения дозы (ФИД).

Результаты

В ходе работы было показано, что мелатонин оказывает радиопротекторное действие на фибробласты человека при облучении гамма-квантами во всех исследуемых концентрациях. ФИД для мелатонина в концентрации 0.2 мг/мл составил 1.83 ± 0.03 , а в концентрации 0.5 мг/мл – 2.00 ± 0.06 . В основе радиозащитного эффекта мелатонина лежит антиоксидантная способность, позволяющая

мелатонину поглощать свободные радикалы, образующиеся при косвенном влиянии гамма-излучения. При повышении концентрации вещества наблюдается увеличение протекторной способности мелатонина.

В дополнение был проведен сравнительный анализ мелатонина и цистамина в концентрации 1.52 мг/мл. Показано, что мелатонин в концентрациях 0.2 мг/мл и 0.5 мг/мл оказывает больший радиопротекторный эффект по сравнению с цистамином. Это может быть связано с тем, что не было обнаружено токсического действия мелатонина на клетки, в отличие от цистамина.

Заключение

В процессе исследования была проведена оценка радиопротекторных свойств мелатонина при действии гамма-излучения на нормальные клетки человека. Также представляет интерес поиск той концентрации вещества, при которой значение фактора изменения дозы было еще больше. К тому же, актуальным является исследование радиозащитных свойств мелатонина при действии, например, протонов. Применение радиопротекторов актуально в таких областях, как атомная энергетика, лечение онкологических заболеваний, а также защита персонала при освоении космоса.

Список литературы

1. Пузан Н.Д., Чешик И.А. Молекулярные механизмы действия ионизирующего излучения. Влияние облучения на белок (обзор литературы) // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 14-26.
2. Melatonin: Pharmacology, Functions and Therapeutic Benefits / S. Tordjman, S. Chokron, R. Delorme [et al.] // Current Neuropharmacology. 2017. V. 15(3). PP. 434-443.
3. The Safety of Melatonin in Humans. Clinical Drug Investigation / L. Andersen, I. Gögenur, J. Rosenberg, R. Reiter // Clinical Drug Investigation. 2016. V. 36(3). PP. 169-175.
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 THE RADIOPROTECTIVE PROPERTIES OF MELATONIN

Tenditnik E.A, Olkhovaya E.R, Kuptsova P.S, Lapenko A.K, Chudnovets T.A, Komarova L.N, Lyapunova E.R.

The radioprotective properties of melatonin under action of gamma radiation have been studied on normal human cells. Performed tests, such as clonogenic assay and cells doubling time showed that substance has a radioprotective effect in varying degrees. In addition, a comparative analysis of the radioprotective effects of melatonin and cystamine was performed.

Ключевые слова: *melatonin, radioprotector, gamma radiation, hTERT, cystamine, clonogenic assay, doubling time*

Ionizing radiation is being used in such fields as nuclear power, medicine and space research more frequently. However, despite the technology development, there is still a risk of population exceeding exposure to radiation. The search for substances with radioprotective properties is considered promising. Based on indirect effect of gamma radiation, substances antioxidant capacity is essential for protection against this radiation type.

One of the well-known chemical agents, which in the long term can have the radioprotective properties, is melatonin. Melatonin has an ability to scavenge free radicals itself and produce metabolites, that have the same ability.

Therefore, the goal is to study radioprotective properties of melatonin in various concentrations *in vitro* under exposure to gamma radiation.

As a study object, human fibroblast (hTERT) cell line was chosen. Cells were cultivated using standard methods. Melatonin was prepared in several concentrations, such as 0.2 mg/mL and 0.5 mg/mL. Time for cells incubation with melatonin is 24 hours.

Intact cells were a control group. Doses of gamma irradiation were 1, 4, 6, 10 Gy. Melatonin radioprotective effects were compared to cystamine, which concentration was 1.52 mg/mL. Cells survival was measured by clonogenic assay. Substances effectiveness was estimated using dose-modifying factor.

It has been shown that melatonin has radioprotective properties on human fibroblasts when being exposed to gamma radiation. Dose modifying factor for melatonin 0.2 mg/mL is 1.83 ± 0.03 , for 0.5 mg/mL is 2.00 ± 0.06 . Cystamin also has the ability to protect against radiation, so dose-modifying factor for it is 1.35 ± 0.07 .

Comparing research substances can lead to the conclusion, that melatonin protects normal human cells more effectively than cystamine. This may be due to the fact that melatonin does not have a toxic effect on cells, unlike cystamine. These circumstances indicate the prospects for further research on melatonin as a radioprotector.

ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО К ИМИДАЗОЛИНОНАМ РАПСА С ПОМОЩЬЮ ГЕНОМНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ

Терентьева У.А.^{1,2,а}, Лебедева М.В.¹, Ражина О.Л.¹, Таранов В.В.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 бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», 119454, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78, Российская Федерация

e-mail: ^а terenttueva@gmail.com

В данном исследовании изучается проблема неустойчивости рапса (*Brassica napus* L.) к гербицидам, в частности к имидазолинонам (IMI). Ранее было установлено, что устойчивость к IMI обусловлена генетическими изменениями в гене ацетолактатсинтазы (ALS или AHAS), кодирующем фермент, катализирующий первую стадию синтеза разветвленных аминокислот (валин, лейцин и изолейцин).

Цель нашего исследования – применение методов геномного редактирования для внесения целевых замен в ген ALS рапса с целью получения линий, устойчивых к IMI. Это позволит повысить эффективность производства рапса, снижая зависимость от других методов борьбы с сорняками и увеличивая урожайность.

Ключевые слова: *Brassica napus, имидазолиноны, ацетолактатсинтаза, редактирование генома, методы трансформации*

Рапс (*Brassica napus* L.) – масличная культура, востребованная во всем мире. Рапс является

аллотетраплоидом, обладающим двумя геномами: геномом А (донор – *B. campestris*) с 10 хромосомами и

геномом *C* (донор – *B. oleracea*) с 9 хромосомами. Рапсовое масло широко используется в пищевой промышленности, производстве биотоплива и кормов. В 2020 году мировая урожайность рапса достигла 72.37 млн тонн, из них в России произвели около 4 млн тонн. Продуктивность рапса зависит от устойчивости к факторам стресса, например, биотическим (вредители, сорняки, болезни) [1, 2] и абиотическим (влажность, температура, pH). В связи с этим необходимо изменять хозяйственно-ценные признаки рапса так, чтобы обеспечить его лучший рост и развитие.

Одним из направлений является получение рапса, устойчивого к различным типам гербицидов, в частности к имидазолинонам (IMI). Проблема неустойчивости полезных человеку культур к гербицидам всегда была актуальной, поскольку их использование предоставляет ряд преимуществ, например, упрощенная борьба с сорняками, снижение количества обработок вследствие использования больших концентраций гербицида за один раз. В итоге это приводит к росту урожайности, экономическим выгодам.

Исследования показали, что устойчивость к некоторым гербицидам (в том числе к IMI) связана с геном ацетолактатсинтазы (ALS), также известной как ацетогидроксикислотная синтаза (AHAS). Экспрессия этого гена приводит к синтезу фермента ацетолактатсинтазы, который катализирует первую стадию биосинтеза аминокислот с разветвленной цепью (валина, лейцина и изолейцина). В 1990-х годах показано, что у арабидопсиса с помощью химического мутагенеза была получена аллель гена ALS с мутацией, приводящей к аминокислотной замене Ser653Asn в ацетолактатсинтазе, что сделало его устойчивым к IMI [3]. Было показано, что есть и другие замены, приводящие к тому же результату [4]. Для рапса была выведена линия M9, полученная из природного мутантного растения. В этой линии произошла замена нуклеотидов в локусе AHAS1, что привело к аминокислотной замене Ser653Asn и, как следствие, к устойчивости к IMI [5].

Мы взяли несколько линий рапса, не обладающих устойчивостью к гербицидам. Зная, какие

замены приводят к устойчивости, мы можем воспроизвести уже существующие мутации с помощью геномного редактирования. Классический вариант системы геномного редактирования CRISPR/Cas9 вносит индел-мутации, что может привести к нокауту гена ALS. Разновидность системы CRISPR/Cas9, редакторы оснований (base editing), позволяют вносить точечные однонуклеотидные замены в целевой ген, однако, это менее эффективно, чем использование классического CRISPR/Cas9. Эффективность доставки компонентов системы редактирования в растение у капустных сильно зависит от генотипа. Поэтому нашей текущей задачей является разработать наиболее оптимальный и эффективный протокол трансформации для выбранных линий рапса.

Список литературы

1. The Global Assessment of Oilseed Brassica Crop Species Yield, Yield Stability and the Underlying Genetics / J.D. Zandberg, C.T. Fernandez, M.F. Danilevicz [et al.] // *Plants*. 2022. V. 11.
2. Kozar E., Domblides E. Imidazolinone Resistance in Oilseed Rape (*Brassica napus* L.): Current Status, Breeding, Molecular Markers and Prospects for Application in Hybrid Seed Purity Improvement // *Horticulturae*. 2024. V. 10(6). P. 553.
3. Molecular basis of imidazolinone herbicide resistance in *Arabidopsis thaliana* var Columbia / K. Sathasivan, G.W. Haughn, N. Murai // *Plant Physiol*. 1991. V. 97. PP. 1044-1050.
4. A new amino acid substitution (Ala-205-Phe) in acetolactate synthase (ALS) confers broad spectrum resistance to ALS-inhibiting herbicides / J. Brosnan, J.J. Vargas, G.K. Breeden [et al.] // *Planta*. 2016. V. 243. PP. 149-159.
5. Molecular characterization and detection of a spontaneous mutation conferring imidazolinone resistance in rapeseed and its application in hybrid rapeseed production / M. Hu, H. Pu, L. Kong [et al.] // *Molecular Breeding*. 2015. V. 35(1).

OBTAINING OF RAPESEED RESISTANT TO IMIDAZOLINONES USING GENOMIC EDITING

Terentyeva U.A.^{1,2}, Lebedeva M.V.¹, Razhina O.L.¹, Taranov V.V.¹

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

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA – Russian Technological University», Vernadsky ave. 78, Moscow, Russian Federation, 119454

This study examines the problem of instability of rapeseed (*Brassica napus* L.) to herbicides, in particular to imidazolinone (IMI). Previously, it was found that resistance to IMI is due to genetic changes in the acetolactate synthase (ALS or AHAS) gene, which encodes an enzyme that catalyzes the first stage of the synthesis of branched amino acids (valine, leucine

and isoleucine). The purpose of our study is to use genomic editing methods to make targeted substitutions in the ALS gene of rapeseed in order to obtain lines resistant to IMI. This will increase the efficiency of rapeseed production, reducing dependence on other methods of weed control and increasing yields.

Keywords: *Brassica napus, imidazolinones, acetolactate synthase, genome editing, transformation methods*

УДК 543-4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПОЛЯРНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ ДЛЯ ЖИДКОСТНО-СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КОКТЕЙЛЕЙ МАРКИ «ЛИРА»

Федунова Е.В.^а, Михайлов А.В., Томсон А.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 fedunovak7@gmail.com*

В рамках данной работы выполнен выбор оптимального полярного растворителя для жидкостно-сцинтилляционных коктейлей марки «Ли́ра» производился для коктейля «Ли́ра-1М». Вещества, которые рассматривались в качестве полярного растворителя, выбирались по свойствам и химическому строению. В данной работе было рассмотрено 4 состава, которые отличаются только полярным растворителем. В качестве полярного растворителя использовались: метоксипропанол, этоксиэтанол, метоксиэтанол и бутилгликоль. В качестве полярного растворителя в коктейле «Ли́ра-1М» лучше всего использовать 1-метокси-2-пропанол. У состава, в котором был использован данный полярный растворитель, показатель трансформированного спектрального индекса внешнего стандарта (tSIE), являющийся показателем гашения, выше, чем у «Лиры 1» на 28 % при одинаковом соотношении. При использовании этоксиэтанола в качестве полярного растворителя предел растворимости пробы – 0.6 и tSIE выше, чем у «Лиры 1» на 7 %. Метоксиэтанол не подходит в качестве полярного растворителя для коктейля «Ли́ра-1М», добавление минимального количества водной пробы вызывает негативное изменение физических свойств, что делает невозможным измерение. Для измерения низкоактивных образцов подходит состав, в котором был использован бутилгликоль, с пределом растворимости пробы – 0.8.

Ключевые слова: *полярный растворитель, жидкостно-сцинтилляционный коктейль, жидкостно-сцинтилляционная спектрометрия, тритий, tSIE*

До определенного времени использовались жидкостно-сцинтилляционные коктейли фирмы PerkinElmer, но на данный момент их импорт затруднен. В СССР ранее производились ЖСК марки «ЖС», которые на данный момент уже не выпускаются. Вышеописанное говорит о необходимости разработки и модернизации отечественной версии жидкостно-сцинтилляционного коктейля из реагентов, доступных на российском рынке.

На данный момент используется жидкостно-сцинтилляционный коктейль под названием «ЛИРА-1». В состав «Лиры» входят ксилол, бутилгликоль, нафталин, неолон, РРО. Так же был экспериментально разработан коктейль «Ли́ра-1М», где вместо ксилола и нафталина используется 1-метилнафталин. В рамках данной работы экспериментально был выбран оптимальный полярный растворитель для состава «Ли́ра-1М». Было определено максимальное количество воды, которое можно добавить к каждой серии ЖСК, при этом не вызвав негативных изменений его физических свойств. Оценено физическое состояние при различных температурах.

В данном исследовании эксперименты проводились с составом «Ли́ра-1М». Бутилгликоль в данном коктейле добавлен в качестве полярного растворителя. Для достоверной оценки влияния полярного растворителя на свойства ЖСК в различных составах был заменен только бутилгликоль, остальные компоненты были добавлены без изменений.

Вещества, на которые был заменен бутилгликоль, выбирались с похожей химической структурой. Были выбраны: 1-метокси-2-пропанол, 2-этоксиэтанол, 2-метоксиэтанол, бутилгликоль. Все эти вещества по своим свойствам являются полярными растворителями. По химическому составу все вышеперечисленные вещества в своем составе имеют группу –ОН, а также являются простыми эфирами.

Для определения свойств коктейля и растворимости пробы в нем, необходимо смешать рассматриваемые составы в различных соотношениях с водой. Оценка физического состояния исследуемых образцов при различных температурах проводилась путем помещения их в термостат при температуре 10

градусов, а также оценивалось их физическое состояние при температуре 25 градусов.

Основной критерий выбора наиболее подходящего полярного растворителя – наибольший показатель трансформированного спектрального индекса внешнего стандарта (tSIE), являющийся показателем гашения аналитических образцов, приготовленных на основе ЖСК с выбранным растворителем в составе. Исследуемые образцы измерялись на жидкостно-сцинтилляционном спектрометре Tri-Carb, каждый образец измерялся в течение 15 минут.

У жидкостно-сцинтилляционных коктейлей, в составе которых в качестве полярного растворителя использовались метоксипропанол, этоксиэтанол и бутилдигликоль при соотношении 0,33 tSIE выше, чем у «Лиры». Следовательно, при данном соотношении лучше использовать эти составы. Показатель tSIE выше всего у состава с метоксипропанолом, однако у данного состава достаточно низкий предел растворения в нем пробы – 0.4. Для измерения низкоактивных образцов можно использовать состав с

этоксиэтанолом с пределом растворимости пробы – 0.6 и состав с бутилдигликолем с пределом растворимости – 0.8.

В качестве полярного растворителя в коктейле «Лира-1М» лучше всего использовать 1-метокси-2-пропанол. У состава, в котором был использован данный полярный растворитель показатель tSIE выше, чем у «Лиры 1» на 28 % при одинаковом соотношении.

Оптимальная температура измерений с использованием исследуемых ЖСК – 25 градусов. При более низких температурах падает максимально возможное количество пробы, которое не приведет к расслоению образца. При температуре 10 градусов лучше всего себя проявляет состав, в котором в качестве полярного растворителя бутилдигликоль, предел растворения пробы в коктейле не изменяется – 0.8. Однако стоит заметить, что при соотношении 0.4 – коктейль непригоден.

EXPERIMENTAL SELECTION OF THE OPTIMAL POLAR SOLVENT FOR LIQUID-SCINTILLATION COCKTAILS OF THE LIRA BRAND

Fedunova E.V., Mikhailov A.V., Lukashenko S. N., Tomson A.V.

*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 this work, the optimal polar solvent for liquid-scintillation cocktails of the Lira brand was selected for the Lira-1M cocktail. The substances that were considered as a polar solvent were selected according to their properties and chemical structure. In this work, four compositions were considered, which differ only in the polar solvent. Methoxypropanol, ethoxyethanol, methoxyethanol and butyldiglycol were used as polar solvents. It is best to use 1-methoxy-2-propanol as a polar solvent in the Lira-1M cocktail. In the composition in which this polar solvent was used, the index of the transformed spectral index of the external standard (tSIE), which is an indicator of quenching, is higher than that of Lira 1 by 28 % with the same ratio. When using ethoxyethanol as a polar solvent, the solubility limit of the sample is 0.6 and the tSIE is 7 % higher than that of Lira 1. Methoxyethanol is not suitable as a polar solvent for the Lira-1M cocktail, the addition of a minimum amount of an aqueous sample causes a negative change in physical properties, which makes measurement impossible. For measuring low-level samples, the composition in which butyldiglycol was used is suitable, with a sample solubility limit of 0.8.

Keywords: *polar solvent, liquid-scintillation cocktail, liquid-scintillation spectrometry, tritium, tSIE*

Within the framework of this work, four compositions with various polar solvents based on the liquid-scintillation cocktail "Lira-1M" were considered. A polar solvent for the Lira-1M cocktail has been determined, when using which the tSIE value will be the highest. The maximum amount of water that can be added to each series of LSC without causing negative changes in its physical properties and the physical properties of the samples under consideration at different temperatures has also been established.

Four compositions based on the Lira-1M cocktail were studied, in which methoxypropanol, ethoxyethanol, methoxyethanol and butyldiglycol were used as a polar solvent.

Based on the results of the measurements, it can be said that 1-methoxy-2-propanol is best used as a polar solvent in the Lira-1M cocktail. The composition in which this polar solvent was used has a tSIE index higher than that of Lira 1 by 28 % with the same ratio. Formulations with ethoxyethanol and butyldiglycol at this ratio have a tSIE higher than "Lira 1" by 7 % and 9 %.

The optimal temperature of measurements using the studied LSC is 25 degrees. At lower temperatures, the maximum possible amount of sample drops, which will not lead to delamination of the sample.

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА ПОГЛОЩЕНИЕ ПЛУТОНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ КУЛЬТУРАМИ

Шаврина К.Е.^а, Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Шаповалов С.Г.

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: ^аshavrina2000@gmail.com

В условиях вегетационных опытов установлено существенное различие влияния влажности почвы на разные части рассматриваемых сельскохозяйственных культур. Для корневой системы исследуемых культур влияние влажности почвы на коэффициенты накопления не обнаружено. Для надземной части всех рассмотренных сельскохозяйственных культур выявлено существенное влияние влажности почвы на накопление плутония, при этом выявленные зависимости отличаются от вида сельскохозяйственной культуры.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, сельскохозяйственные культуры, альфа-спектрометрия, миграция в системе «почва-растение», Pu , вегетационный опыт

Приведенные в литературных данных коэффициенты накопления плутония отличаются высокой вариативностью значений. Такой большой разброс значений может быть объяснен рядом факторов, включая физические и химические формы радионуклида в почве, свойства почвы, виды растений и методы ведения сельского хозяйства (вспашка, мелиорация, известкование и внесение удобрений). Однако, эти факторы практически не изучены в отношении изотопов плутония.

Цель работы – выявить зависимость влияния влажности почвы на накопление плутония сельскохозяйственными культурами.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются дерново-подзолистая почва, китайская листовая капуста Пак-чой сорта Холодок (*Brassica rapa*), овес сорта Яков (*Avena sativa*), горох сорта Немчиновский-50 (*Pisum sativum*), кабачок цуккини сорта Сальвадор F₁ (*Cucurbita pepo*).

Выращивание сельскохозяйственных культур проводилось в лабораторных условиях на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ. Для эксперимента была выбрана дерново-подзолистая супесчаная окультуренная почва с внесенными удобрениями, предварительно зараженная ²³⁹Pu. Удельная активность плутония в подготовленной почве составила 375 Бк/кг.

В течение всего периода вегетации для поддержания необходимой влажности почвы ежедневно проводился контроль массы сосудов с растениями и их дополнительный полив до достижения соответствующей массы в каждом сосуде.

Для определения содержания ²³⁹⁺²⁴⁰Pu использовался метод альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением [1].

Результаты исследования

Зависимость коэффициентов накопления (Кн) ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в исследуемых культурах от влажности почвы представлены на рисунке 1.

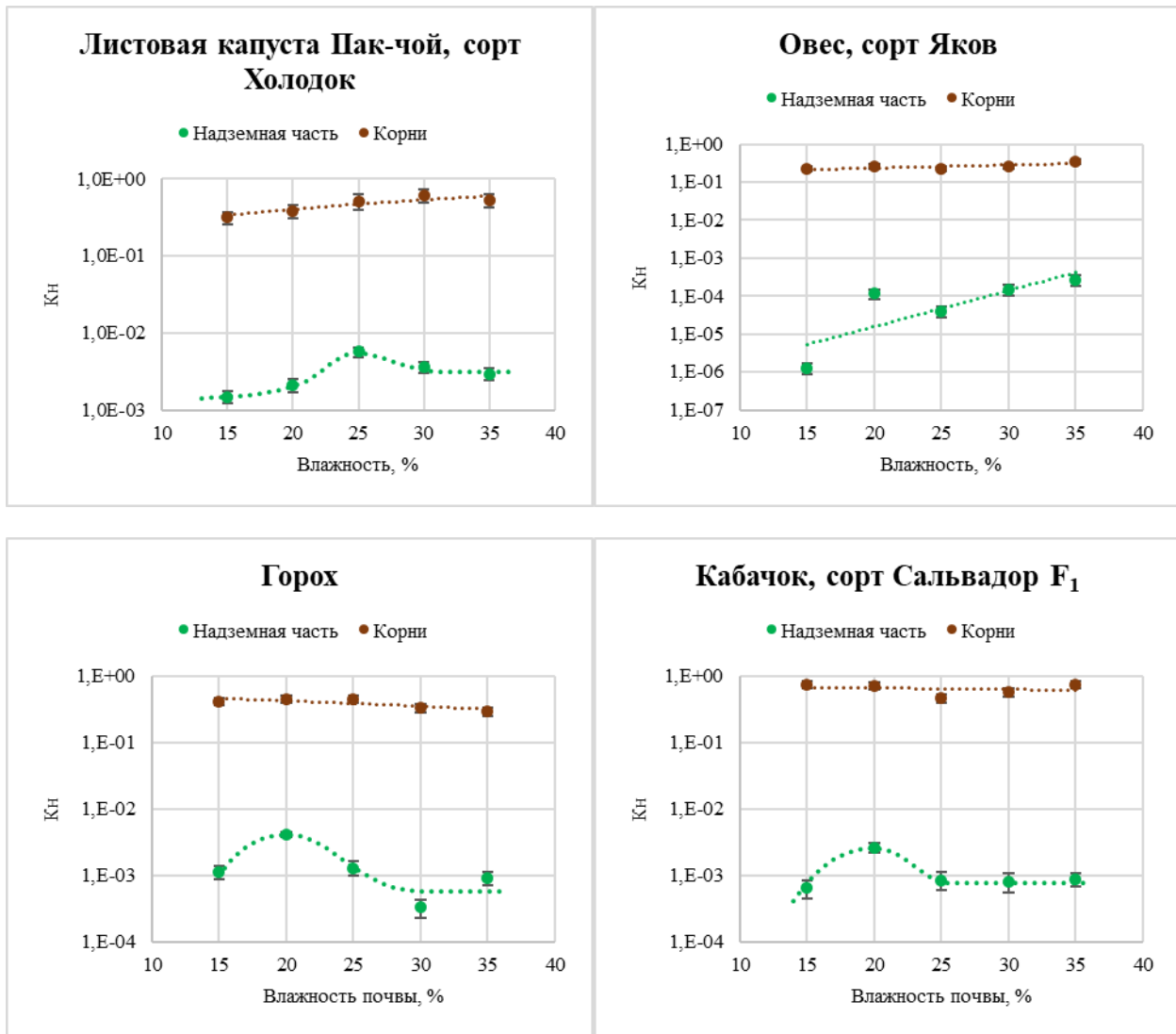


Рисунок 1. Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ надземной части и корневой системы исследуемых культур при разной влажности почвы

Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ надземной части изученных растений на порядки ниже K_n $^{239+240}\text{Pu}$ корневой системой и составляют $1.6 \cdot 10^{-3}$ – $6.1 \cdot 10^{-3}$ и 0.34 – 0.66 для листовой капусты Пак-чой, $1.3 \cdot 10^{-6}$ – $2.9 \cdot 10^{-4}$ и 0.24 – 0.38 для овса, $3.3 \cdot 10^{-4}$ – $2.2 \cdot 10^{-3}$ и 0.29 – 0.45 для гороха, $3.3 \cdot 10^{-4}$ – $2.6 \cdot 10^{-3}$ и 0.46 – 0.74 для кабачка, соответственно.

Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ корневой системой изученных растений не зависят от влажности почвы. Влажность почвы оказывает влияние на K_n радионуклида надземной частью растений. При этом наибольшее изменение K_n (до 210 раз) при изменении влажности отмечается для овса, наименьшее – для капусты (4.8 раз).

Несмотря на разные тренды как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, для некоторых с/х культур (кабачок, горох, листовая капуста) фиксируются максимальные значения K_n , как правило при влажности почвы 20–25 %.

В литературных источниках имеется ряд работ по установлению влияния влажности почвы на поглощение плутония другими сельскохозяйственными культурами.

В работе [2] исследовано влияние влажности почвы на накопление $^{239+240}\text{Pu}$ разными частями ячменя сорта Зазерский-85.

Результаты исследования также свидетельствуют о возрастающем тренде значений коэффициентов накопления плутония с увеличением влажности почвы, что согласуется с данными, полученными для овса сорта Яков, исследуемого в данной работе.

Изменения K_n корневой системой ячменя при изменении влажности почвы не фиксируется, что также согласуется с данными, полученными для корневой системы овса.

На рисунке 2 представлено графическое обобщение накопления плутония зерновыми культурами при разной влажности почвы на примере ячменя сорта Зазерский-85 и овса сорта Яков.

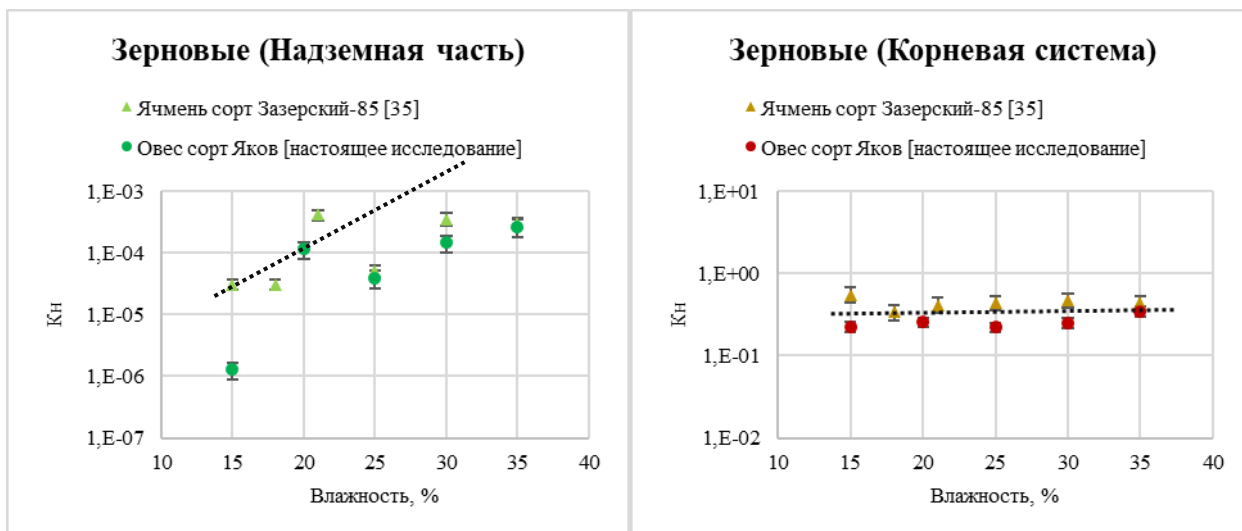


Рисунок 2. Коэффициенты накопления плутония в вегетативных органах ячменя и овса, выращенного при разной влажности почвы

Сравнительный анализ, представленный на рисунке 2, свидетельствует, что для надземной части зерновых культур с увеличением влажности почвы идет более интенсивное накопление плутония, а для корневой системы значения K_n остаются постоянными.

Также проводились исследования влияния влажности почвы на накопление плутония бобами сорта Яantarные [2].

На рисунке 3 представлено обобщение полученных в ходе настоящей работы данных с представленными в результатах исследования [2].

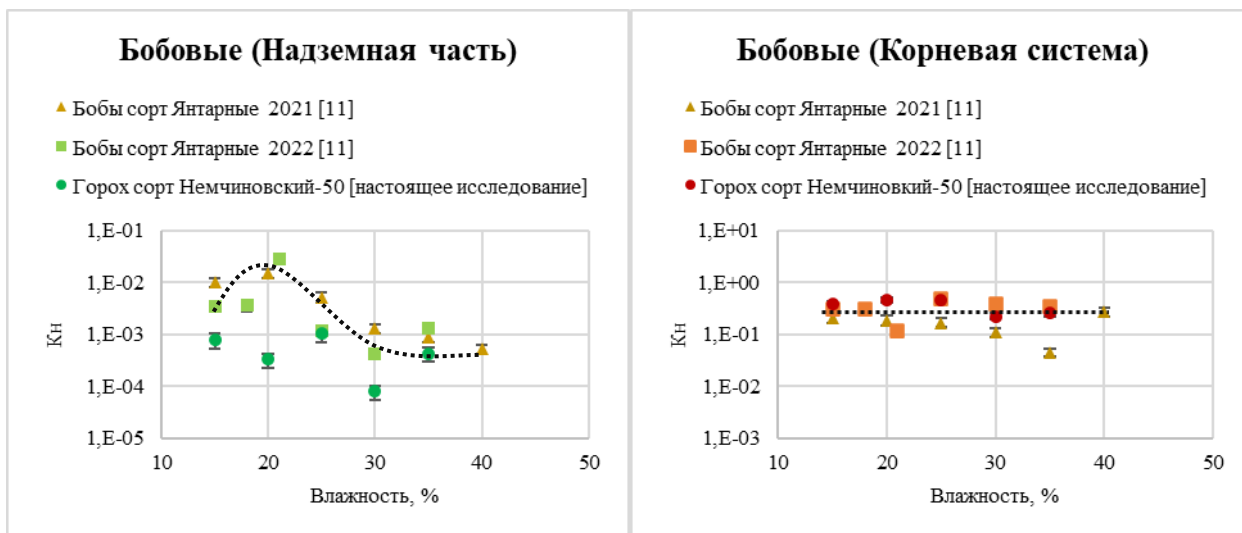


Рисунок 3. Коэффициенты накопления плутония в вегетативных органах бобов и гороха, выращенных при разной влажности почвы

Показано, что при увеличении влажности почвы наблюдается снижение K_n для надземной части бобов с пиком в виде максимума при 20 % влажности. А для корневой системы бобов влияние влажности почвы на накопление плутония не отмечается.

Данные рисунка 3 свидетельствуют, что для надземной части бобовых культур наблюдается снижение K_n при увеличении влажности почвы. При этом фиксируется максимум значений K_n при влажности почвы 20 %.

В то же время для корневой системы бобовых культур, как и для зерновых, изменений K_n при разной влажности почвы не наблюдается.

Выводы

Установлено существенное различие влияния влажности почвы на разные части рассматриваемых сельскохозяйственных культур. Для корневых систем не наблюдается существенного влияния влажности почвы. Для надземной части всех рассмотренных

сельскохозяйственных культур выявлено существенное влияние влажности почвы на накопление плутония, при этом выявленные зависимости являются видоспецифичными.

Список литературы

1. 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. V. 247. P. 106865.

2. Эдомская М.А. Закономерности распределения плутония в почвенно-растительном покрове зон влияния радиационно-опасных объектов: автореф. На соиск. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2023. 24 с.

EFFECT OF SOIL MOISTURE ON PLUTONIUM UPTAKE BY AGRICULTURAL CROPS

Shavrina K.E., Edomsкая M.A., Lukashenko S.N., Shapovalov S.G.

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

In the conditions of vegetation experiments, a significant difference in the influence of soil moisture on different parts of the considered agricultural crops was established. For the root system of the studied crops, the influence of soil moisture on the transfer factors was not detected. For the aboveground part of all considered agricultural crops, a significant influence of soil moisture on the transfer factors of plutonium was revealed, while the revealed dependencies differ from the type of agricultural crop.

Ключевые слова: *sod-podzolic soil, agricultural crops, alpha spectrometry, migration in the soil-plant system, Pu, vegetation experiment*

УДК 575:632.4:635.65

ОТВЕТ ПРОРОСТКОВ ЛЮПИНА БЕЛОГО, ПОДВЕРГШИХСЯ ЗАРАЖЕНИЮ АГРЕССИВНЫМ ШТАММОМ ФИТОПАТОГЕНА *COLLETOTRICHUM LUPINI* НА УРОВНЕ АНАЛИЗА ТРАНСКРИПТОМА

Шубина С.И.^{1,а}, Подлущкий М.С.¹, Воронежская В.С.¹, Самад С.², Байк А.², Бондаренко В.С.¹, Болдырев С.В.², Лукашевич М.И.³, Бен 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 Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30 стр. 1, Российская Федерация

³ Всероссийский научно-исследовательский институт люпина – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса, 241524, Брянская обл., Брянский р-он, п. Мичуринский, ул. Березовая, д. 2, Российская Федерация
e-mail: ^а shubinasveta22@gmail.com

Белый люпин — важная сельскохозяйственная культура, ценящаяся за высокое содержание белка, масла и клетчатки и за способность улучшать структуру полей. Возделыванию люпина препятствуют эпифитотии патогенного гриба *Colletotrichum lupini*, вызывающего антракноз. Это заболевание приводит к увяданию растений, некрозу тканей и деформации стеблей, что существенно снижает урожайность белого люпина, приводя к значительным потерям. Проведен анализ дифференциальной экспрессии генов в зараженных *C. lupini* 7-дневных проростках белого люпина трех генотипов с разной устойчивостью к антракнозу. Выявленные дифференциально экспрессируемые гены после дополнительного анализа могут быть полезны в качестве мишеней для геномного редактирования люпина и создания устойчивого к антракнозу сорта.

Ключевые слова: транскриптомный анализ, *Colletotrichum lupini*, *Lupinus albus*, антракноз, секвенирование РНК

Белый люпин (*Lupinus albus* L.) – зернобобовая культура, называемая также «северная соя», семена которой характеризуются высоким уровнем белка с уникальным аминокислотным составом. Белый люпин отличается относительной устойчивостью к засухе, засолению и повышенной кислотности почвы, что делает его перспективной культурой для выращивания в условиях изменения климата [1-3]. Благодаря симбиозу с клубеньковыми бактериями и способности накапливать в почве усвояемые формы фосфора, люпин – превосходная культура для улучшения структуры почв. Выращиванию люпина препятствует комплекс болезней, из которого наиболее вредоносным является антракноз – грибковое заболевание, вызываемое *Colletotrichum lupini* [4].

Несмотря на значительный объем исследований, касающихся морфологического и генетического разнообразия *C. lupini*, его вирулентности и различных молекулярных аспектов патогенности, существует острая необходимость в более глубоком понимании механизмов ответных реакций растений на заражение этим патогеном [5]. Цель данного исследования заключается в анализе транскриптомных профилей белого люпина в ответ на инфицирование *C. lupini*, включая функциональный анализ обогащения для дифференциально экспрессируемых генов.

Материалы и методы

Из стручков белого люпина, собранных в 2021 году с экспериментального поля ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса» (г. Брянск, Брянская обл.) были изолированы несколько штаммов *C. lupini* [6]. После изучения морфологических и молекулярных характеристик для настоящего исследования был выбран агрессивный штамм 3.1 [6], который использовался для последующего заражения семян трех генотипов с разным уровнем устойчивости к антракнозу: Андромеда (австралийский сорт, устойчивый к антракнозу), Мичуринский (российский сорт, обладающий устойчивостью к засухе и фузариозу, чувствительный к антракнозу) и СН 5-19 (селекционная линия с умеренной устойчивостью к антракнозу). Семена были простерилизованы, затем инокулированы раствором, содержащим 10^5 спор *C. lupini* и инкубированы в темноте при температуре 24 ± 2 °C и относительной влажности 55 %. Тотальная РНК выделялась из 7-

дневных проростков с использованием набора ExtractRNA (ЗАО «Евроген», Россия) в соответствии с протоколом производителя. Качество выделенной РНК оценивалось с помощью спектрофотометра NanoDrop OneC (Thermo Fisher Scientific, США). Подготовка библиотек для секвенирования на приборе Illumina NovaSeq 6000 была выполнена компанией Евроген (Москва, Россия). Контроль качества исходных данных проводился с использованием FastQC версии 0.11.9 и пакета ngsReports версии 2.4.0 для RStudio Server версии 2023.12.1+402. Низкокачественные прочтения и сохранившиеся адаптерные последовательности триммировались с использованием Fastp версии 0.23.4 и Trimmomatic версии 0.40, используя следующие параметры: length_required: 50, average_qual: 30, trim_front1: 15, trim_front2: 15, adapter_fasta. Отфильтрованные прочтения выравнивались на референсный геном белого люпина (версия 1.0 от Peret Lab) с использованием программы STAR версии 2.7.10b. Для количественной оценки экспрессии генов и подсчета ридов, выровненных по аннотированным генам, использовался инструмент FeatureCounts версии 2.0.2. Анализ дифференциальной экспрессии генов (ДЭГ) проводился с помощью пакета DESeq2 версии 1.42.0 для RStudio Server версии 2023.12.1+402. Гены считались дифференциально экспрессированными при скорректированном значении p-value (FDR, метод Бенджамини-Хохберга) $\leq 0,05$ и логарифме кратного изменения (\log_2FC) $\geq |1|$. Функциональный анализ обогащения для ДЭГ выполнялся с использованием биоинформатического проекта Gene Ontology (GO) и инструмента GO Enrichment версии 1.0 от Peret Lab. Значимые GO-термины определялись при уровне значимости ≤ 0.05 и уточнялись с учетом коэффициента ложных обнаружений (FDR). Для последующей интерпретации возможных функциональных особенностей значимости использовались только те термины GO, которые имели скорректированное значение FDR ≤ 0.05 .

Основные результаты

Анализ транскриптомного ответа растений сорта Андромеда на инокуляцию агрессивным штаммом 3.1 *C. lupini* выявил 121 ДЭГ: 62 гена демонстрировали повышенный уровень экспрессии, и 59 генов – пониженный (рис. 1А).

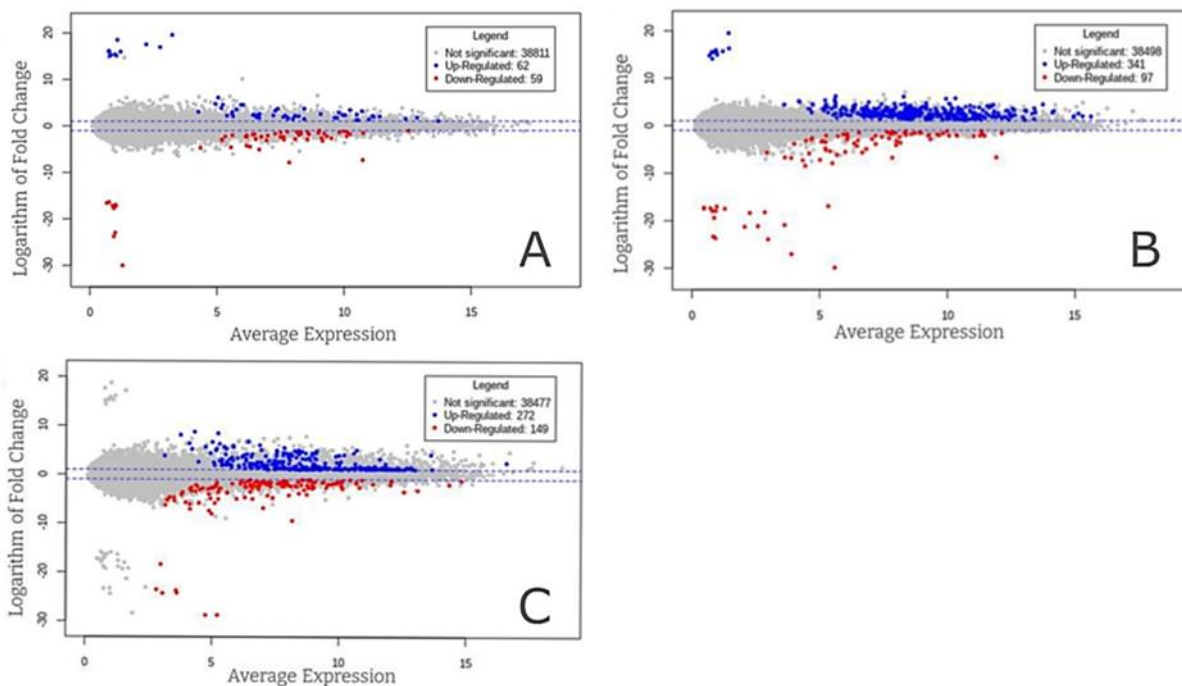


Рисунок 1. Профиль дифференциальной экспрессии генов в 7-дневных проростках белого люпина сортов (А) Андромеда, (В) Мичуринский и (С) СН 5-19, зараженных штаммом 3.1 патогена *C. lupini*

По результатам анализа генной онтологии у растений сорта Андромеда наблюдалось повышение экспрессии генов, связанных с ключевыми адаптивными механизмами, такими как регулирование роста (GO:0040008, FDR = 6.9×10^{-3}) и гидротропизм (GO:0010274, FDR = 6.9×10^{-3}). В то же время снижение экспрессии наблюдалось у генов, вовлеченных в процессы катаболизма углеводов (GO:0044275, FDR = 5.5×10^{-3}).

Для растений сорта Мичуринский, инфицированных штаммом 3.1, было выявлено 438 дифференциально экспрессируемых генов, из которых 341 демонстрировали повышенную экспрессию, а 97 — пониженную (рис. 1В). По данным генной онтологии у растений сорта Мичуринский отмечалось увеличение экспрессии генов, связанных с реакцией на гипоксию (GO:0071456, FDR = 1.2×10^{-6}), метаболизмом салициловой кислоты (GO:0009751, FDR = 7.1×10^{-6}) и свертывании белков (GO:0006457, FDR = 1.2×10^{-2}), что может свидетельствовать об активизации защитных механизмов [7] в ответ на инфекционное воздействие. Одновременно наблюдалось и снижение экспрессии генов, участвующих в процессах транспортировки воды (GO:0006833, FDR = 4.3×10^{-5}).

Для проростков белого люпина линии СН 5-19 было обнаружено 411 дифференциально экспрессируемых генов: 272 гена с повышенной экспрессией и 139 с пониженной (рис. 1С). По данным генной онтологии наблюдалось повышение экспрессии генов, участвующих в процессах сборки сплайсосомальных комплексов (GO:0000387, FDR = 1.5×10^{-3}) и

олигомеризации белков (GO:0051259, FDR = 1.3×10^{-4}), что может указывать на активацию механизмов регуляции и стабилизации белков [8] в ответ на воздействие патогена. В то же время зафиксировано снижение экспрессии генов, ответственных за биосинтез восков (GO:0010025, FDR = 1.9×10^{-2}).

Сорта Андромеда, Мичуринский и селекционная линия СН 5-19 демонстрируют различные профили транскриптомного ответа на заражение *C. lupini*. Отечественные генотипы Мичуринский и СН 5-19 проявили более выраженный ответ на штамм 3.1 (438 и 411 ДЭГ соответственно), по сравнению с сортом Андромеда (121 ДЭГ). Детальный анализ и последующие исследования обнаруженных ДЭГ могут быть полезны для выявления мишеней для геномного редактирования люпина, с целью создания устойчивого к антракнозу генотипа.

Список литературы

1. Nigussie Z. Contribution of White Lupin (*Lupinus albus* L.) for Food Security in North-Western Ethiopia: A Review // Asian Journal of Plant Sciences. 2012. № 11(5). PP. 200-205. doi:10.3923/ajps.2012.200.205.
2. The Use of Lupin as a Source of Protein in Animal Feeding: Genomic Tools and Breeding Approaches / E.M. Abraham, I. Ganopoulos, P. Madesis [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2019. № 20(4). P. 851. doi:10.3390/ijms20040851.
3. Cowling W.A., Gladstonjes J.S. Lupin Breeding in Australia. Linking Research and Marketing

Opportunities for Pulses in the 21st Century // Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture. 2000. № 34. PP. 541-547. doi:10.1007/978-94-011-4385-1_51.

4. Genetic diversity of *Colletotrichum lupini* and its virulence on white and Andean lupin / J.A. Alkemade, M.M. Messmer, R.T. Voegelé [et al.] // Scientific Reports. 2021. № 11. P. 13547. doi:10.1038/s41598-021-92953-y.

5. Life styles of *Colletotrichum* species and implications for plant biosecurity / D.D. De Silva, P.W. Crous, P.K. Ades [et al.] // Fungal Biol. Rev. 2017. V. 31. PP. 155-168.

6. Characterization of white lupine (*Lupinus albus*) cultivars' response to primary infection by diverse

Colletotrichum lupini strains from a single Russian field / S. Samad, A. Baik, S. Boldyrev [et al.] // International Journal of Agriculture and Environmental Research. 2023. V. 09(06). PP. 1-23. doi:10.51193/IJAER.2023.9606.

7. Biosynthesis and Roles of Salicylic Acid in Balancing Stress Response and Growth in Plants / Q. Zhong, H. Hu, B. Fan [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2021. № 22. P. 11672. doi:10.3390/ijms222111672.

8. The Arabidopsis cyclophilin CYP18-1 facilitates PRP18 dephosphorylation and the splicing of introns retained under heat stress / S.H. Jo, H.J. Park, A. Lee [et al.] // The Plant Cell. 2022. № 34(6). PP. 2383-2403. doi:10.1093/plcell/koac084.

RESPONSE OF WHITE LUPINE SEEDLINGS INFECTED BY AN AGGRESSIVE STRAIN OF THE PHYTOPATHOGEN *COLLETOTRICHUM LUPINI* IN TERMS OF TRANSCRIPTOME ANALYSIS

Shubina S.I.¹, Podlutskiy M.S.¹, Voronezhskaya V.S.¹, Samad S.², Baik A.², Bondarenko V.S.¹, Boldyrev S.V.², Lukashevich M.I.³, Ben C.², Bondarenko E.V.¹

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

²Autonomous Non-Profit Organization for Higher Education «Skolkovo Institute of Science and Technology», Bolshoy Boulevard, 30, p. 1, Moscow, the territory of the Skolkovo Innovation Center, Russian Federation, 121205

³All-Russia Research Institute of Lupin – Branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Berezovaya st. 2, Michurinsky, Bryansk region, Bryansk district, Russian Federation, 241524

White lupine is an important crop, valued for its high protein, oil and fibre content and its ability to improve field structure. Lupine cultivation is hampered by the presence of epiphytic forms of the pathogenic fungus *Colletotrichum lupini*, which causes anthracnose. This disease leads to plant wilting, tissue necrosis and stem deformation, which significantly reduces the yield of white lupine, resulting in significant losses.

The analysis of differential gene expression in *C. lupini*-infected 7-day-old seedlings of three genotypes with different levels of anthracnose resistance was carried out. The identified differentially expressed genes, after additional analysis, might serve as targets for lupine genome editing and the creation of anthracnose-resistant cultivar.

Ключевые слова: transcriptome analysis, *Colletotrichum lupini*, *Lupinus albus*, anthracnose, fungal pathogens, RNA sequencing

White lupine varieties Andromeda, Michurinsky and breeding line CH 5-19 show different response mechanisms to infection with *C. lupini*. The Michurinsky variety and the CH 5-19 line showed a more pronounced transcriptomic response to strain 3.1 (438 and 411 DEGs, respectively), compared to the Andromeda variety (121 DEGs). The identified genes,

probably involved in metabolism and defence responses, might play important roles in plant adaptation to infectious agents. These results may be useful for the development of breeding strategies and biotechnologies aimed at improving the resistance of white lupine to pathogens.

Научное издание

Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве

Сборник докладов
III Международной молодежной конференции
(Обнинск, 23-24 октября 2024 г.)

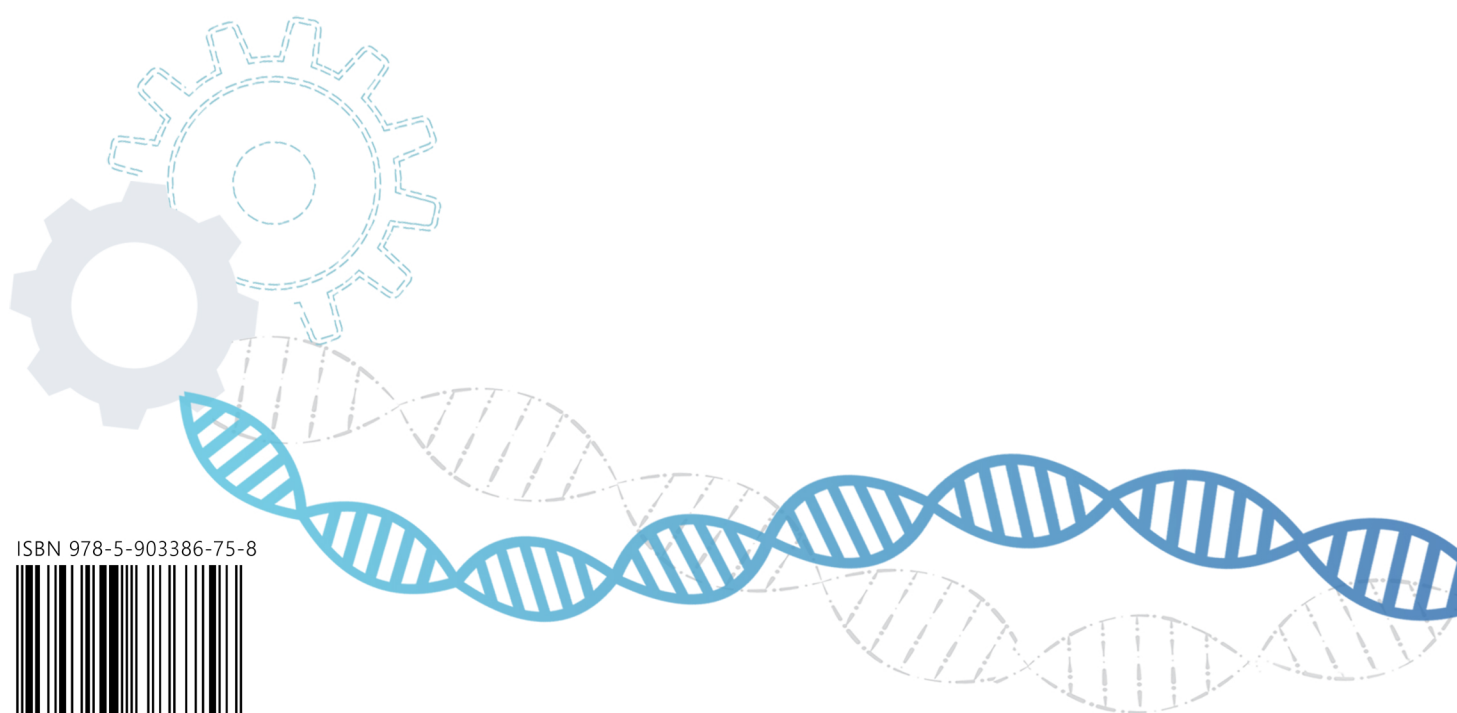
ISBN 978-5-903386-75-8



Компьютерная верстка Шубина О.А.

Подписано в печать 21.10.2024 г.
Формат 60x90 1/8. Гарнитура PT Sans, AGLetterica.
Усл. печ. л. 39,6. Тираж 350 экз. Заказ № 69.

Издательство НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ
249035, г. Обнинск, Киевское шоссе, д.1., к.1
www.rirae.ru



ISBN 978-5-903386-75-8



9 785903 386758