



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЯСА НАУКА ДА ВЫЛЫС ВЕЛӨДЧАН  
МИНИСТЕРСТВО

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Коми научный центр Уральского отделения  
Российской академии наук»  
(ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)

«Россияса наукаяс академиялөн  
Урал юкөнса Коми наука шөрин»  
туялап удж нудьсь федеральной шөрин  
Федеральной канму  
сьомкуд наука учрежденийлөн  
(ТФШ РНА УрО Коми НЦ)



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

С. В. Дёгтева

«06» августа 2025 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» на диссертационную работу Празяна Александра Арменовича

«Закономерности формирования ответных реакций ярового ячменя на раздельное и сочетанное действие гамма-облучения и свинца», представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.1. «Радиобиология».

Диссертационная работа Празяна Александра Арменовича посвящена анализу закономерностей формирования ответных реакций ярового ячменя на раздельное и сочетанное действие  $\gamma$ -излучения и свинца. Исследование реализовано с применением комплексного подхода и современных научных методов, направленных на оценку морфологических изменений растений, в том числе микрофенологических фаз развития, анализу перестроек в системе антиоксидантной защиты, а также поиску генов, изменяющих активность в ответ на раздельное и совместное действие ионизирующего излучения и токсичного тяжелого металла - свинца.

### Актуальность избранной темы исследования

Тема диссертационного исследования Празяна А.А. является актуальной. В настоящее время загрязнение радионуклидами и тяжелыми металлами почв, в особенности относящихся к сельскохозяйственным угодьям, представляет опасность, поскольку зерновые культуры, такие как ячмень, являются важным источником продовольствия для человека и животных и поэтому имеют большое значение для экономики. Применение ионизирующих излучений для предпосевной обработки семян требует обоснований безопасности применения этого агротехнического приема, особенно с учетом использования обработанных таким образом семян на территориях с повышенным содержанием тяжелых металлов в почвах. Своевременность и важность работы А.А. Празяна обусловлена необходимостью восполнения пробелов

в знаниях об ответных реакциях растений на сочетанное действие низких доз радиации и токсичных концентраций тяжелых металлов, а также понимания закономерностей стрессоустойчивости к действию неблагоприятных факторов в целом. Анализ последствий как раздельного, так и сочетанного влияния указанных выше факторов на растения на примере ячменя ярового, безусловно, является необходимым для установления фундаментальных механизмов формирования ответных реакций растений на действие стрессовых факторов, в частности  $\gamma$ -излучения и свинца. Кроме этого, полученные данные о генах-кандидатах, реагирующих на абиотический стресс, а также закономерностях и механизмах стрессоустойчивости растений могут стать базисом для разработки подходов к созданию высокопродуктивных и высокоустойчивых к факторам окружающей среды сортов сельскохозяйственных растений.

### **Достоверность и новизна выводов и результатов работы**

Выводы и заключения, сформулированные в диссертации Празяна Александра Арменовича, не вызывают сомнений, поскольку основаны на применении адекватной целям и задачам исследования методологии, которая включает как современные методы анализа (ПЦР с обратной транскрипцией, высокоэффективная жидкостная хроматография с использованием градиентного элюирования, спектрофотометрический метод и др.) и новейшие генетические технологии (высокопроизводительное секвенирование), так и обоснованные статистические методы обработки данных. В рамках диссертационного исследования Празяном А.А. использовано 800 семян для анализа микрофенологических стадий развития, 1200 семян - для оценки морфологических параметров; в анализах транскриптома, активности ферментов и низкомолекулярных антиоксидантов, концентраций малонового диальдегида и экспрессии генов задействовано 3 и более биологических повторностей. Достоверность результатов подтверждается большими объемами выборок, и данные получены в результате многократных измерений с использованием биологических и технических повторностей. Следует отметить, что эксперименты проводили в строго контролируемых условиях, что позволило обеспечить сопоставимые условия содержания растений для всех вариантов эксперимента.

Основные результаты исследования представлены и обсуждены на девяти конференциях с международным и всероссийским участием, в том числе съезде по радиационным исследованиям. По результатам исследования опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

Поставленные цель и задачи исследования выполнены полностью. С использованием современных научных методов и подходов впервые осуществлен комплексный анализ взаимосвязи между разными уровнями организации ячменя, начиная от молекулярного и заканчивая организменным в ответ на раздельное и сочетанное действие  $\gamma$ -облучения и свинца. В диссертационной работе Празяна Александра Арменовича получены новые данные о стрессоустойчивости растений, в частности молекулярных механизмах формирования адаптивных реакций ячменя ярового на  $\gamma$ -облучение и действие свинца. Впервые проведен анализ транскриптома ячменя в ответ на действие острого  $\gamma$ -облучения на ранних стадиях развития растения и выявлены гены, потенциально участвующие в ответной реакции на абиотический стресс. Впервые в условиях комбинированного стресса проведена последовательная оценка морфологических, биохимических и молекулярно-генетических изменений у ячменя ярового, а также оценены изменения в скорости прохождения микрофенологических стадий прорастания семян и дифференциальная экспрессия генов, участвующих в реакции растения на  $\gamma$ -облучение, контроле транспорта тяжелых металлов и метаболизме основных классов фитогормонов.

## **Значимость результатов работы для науки и производства**

Полученные в диссертационном исследовании Празяна А.А. данные значительно расширяют представления о стрессоустойчивости растений к действию ионизирующего излучения и тяжелых металлов. Следует отметить, что в ходе реализации исследования применен комплексный подход, затрагивающий изучение как разных уровней организации растений и сочетания факторов разной природы, так и использование комплекса современных методов, что несомненно вносит значимый вклад в развитие методологии исследований в области радиобиологии, радиоэкологии и экотоксикологии. Полученные данные также можно использовать для принятия решений о применении агротехнологических приемов повышения урожайности зерновых культур, используемых в пищу человеком и сельскохозяйственными животными, а также служащих сырьем для различных отраслей промышленности.

## **Общая характеристика работы**

По структуре текст представленной рукописи кандидатской диссертации соответствует логике заявленной цели и поставленным задачам. Диссертационное исследование содержит введение, четыре главы, заключение, выводы, список сокращений и условных обозначений, список использованной литературы, включающий 231 источника и два приложения. Объем работы составляет 160 страниц. Иллюстративный материал содержит 8 таблиц и 16 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи и основные положения исследования, аргументирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, достоверность результатов, представлены данные о соответствии диссертации паспорту научной специальности, апробации результатов и личном вкладе диссертанта в работу. Также в данном разделе изложен список публикаций по теме работы, представлены краткие сведения о структуре и объеме диссертационного исследования.

**Глава I** состоит из обзора литературы, в котором на основании анализа публикаций в российских и зарубежных источниках обобщены закономерности радиобиологических эффектов у растений на разных уровнях структурно-функциональной организации, а также описаны механизмы токсического действия тяжелых металлов на растения и защиты от них на примере свинца. Также подробно рассмотрены закономерности сочетанного действия факторов абиотической природы на растения. В заключении по результатам проведенного анализа автор диссертации резюмирует основные принципы влияния множественных стрессоров на физиологические, биохимические и генетические процессы, происходящие в растениях. Также в рамках анализа литературы продемонстрирована недостаточная изученность молекулярно-генетических механизмов реакции растений как на раздельное, так и сочетанное действие  $\gamma$ -излучения и свинца и, тем самым, подтверждена необходимость исследования данного вопроса. Выполненный анализ литературы позволил автору логично сформулировать задачи работы, которые необходимо решить для достижения поставленной в работе цели.

В **главе II** представлена методология диссертационной работы, основанная на комплексном анализе закономерностей формирования ответных реакций ярового ячменя на раздельное и сочетанное действие  $\gamma$ -облучения и свинца. Приведена характеристика ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) как объекта исследования и объяснена его ценность для радиобиологических исследований. Одним из достоинств диссертации Празяна Александра Арменовича является использование в экспериментах не только традиционных методов исследо-

вания (оценка микрофенологических фаз прорастания, морфологических параметров, активности антиоксидантных ферментов и др.), но и современных генетических подходов (высокопроизводительное секвенирование на платформе Illumina NovaSeq 6000 для анализа транскриптома). Также представлена подробная методика анализа экспрессии широкого спектра генов, отвечающих за метаболизм и сигналинг фитогормонов, ответ на  $\gamma$ -облучение и токсическое действие свинца с применением ОТ-ПЦР. Следует особо отметить, что автор диссертации овладел навыками дизайна праймеров, биоинформатической обработки результатов секвенирования, статистического анализа данных, основные этапы которых также представлены в главе “Материалы и методы”.

**Глава III** занимает одно из ключевых мест в диссертационной работе и содержит результаты исследования. По данным транскриптомного анализа выявлен сложный многоуровневый ответ растений *H. vulgare* на  $\gamma$ -облучение, выраженный в реакции 119 дифференциально экспрессируемых генов стресс-ответа, детоксикации ксенобиотиков и клеточного метаболизма. В рамках анализа геной онтологии показано обогащение функциональных категорий генов, участвующих в том числе в поддержании пространственной структуры белков, фотосинтезе, метаболизме компонентов клеточной стенки. Установлено, что при раздельном действии исследуемых факторов  $\gamma$ -излучение не вызывало нарушений в развитии семян, а свинец, напротив, индуцировал угнетение роста и асинхронность прохождения микрофенологических фаз. Также продемонстрировано, что в ответ на действие свинца у растений *H. vulgare* возникает окислительный стресс, выраженный в повышении активности каталазы в корнях, увеличении содержания МДА и восстановленного глутатиона в корнях и побегах, а также аскорбиновой кислоты в корнях. Напротив,  $\gamma$ -облучение индуцировало повышение аскорбатпероксидазы и снижение содержания МДА в побегах. Показано, что при комбинированном действии  $\gamma$ -излучение ослабляло токсическое действие свинца на рост, развитие семян и антиоксидантную систему, что указывает на антагонистический тип взаимодействия исследованных факторов ( $K_w < 1$ ,  $p < 0.05$ ). После воздействия  $\gamma$ -излучения и свинца на проростки ячменя выявлено увеличение экспрессии генов биосинтеза индолилуксусной (*HvAAO1*, *HvILR1*) и абсцизовой кислот (*HvNCED1*), цитокининов (*HvLOG3*), детоксикации тяжелых металлов (*HvPCS*) и антиоксидантной защиты (*GSTT3-like*). Отмечено, что для гена *GSTT3-like* повышенная экспрессия в побегах растений во всех вариантах взаимодействия исследованных факторов выявлена не только по данным ПЦР в реальном времени, но и по результатам анализа транскриптома. Таким образом, показано включение сложной системы защитных механизмов у растений *H. vulgare* в ответ на действие  $\gamma$ -излучения и свинца.

В **Главе IV** представлено сравнение и обсуждение полученных в диссертации результатов с данными опубликованных к настоящему времени исследований. Автором диссертации подробно обсуждены выявленные биологические реакции у *H. vulgare* в ответ на раздельное и сочетанное действие свинца и  $\gamma$ -облучения, обобщены наблюдаемые закономерности и объяснены механизмы действия исследованных факторов на ячмень, в том числе радиационный гормезис и антагонистический эффект сочетанного воздействия ионизирующего излучения и свинца.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Полученные результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы к применению в образовательном процессе бакалавров, магистрантов, аспирантов учреждений высшего профессионального образования по специальностям “биология”, “экология”,

“агроэкология”, а также для специалистов в области охраны окружающей среды и радиационной безопасности. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию специалистами в области сельского хозяйства для разработки подходов повышения устойчивости к неблагоприятным факторам растительных культур, представляющих особую значимость для экономики. Материалы исследования также могут быть предложены для включения в курсы лекций по радиобиологии и радиационной генетике. Кроме этого, диссертационные материалы могут быть рекомендованы к использованию студентам при выполнении самостоятельных научно-исследовательских работ и интерпретации полученных данных о биологических эффектах ионизирующего излучения как отдельно, так и в комплексе с тяжелыми металлами на растениях.

### **Соответствие автореферата и публикаций тексту диссертации**

Содержание автореферата соответствует тексту диссертационной работы. Структура автореферата, представленного на 24 страницах, полностью согласуется со структурой диссертации.

### **Личный вклад автора**

Автор диссертации лично участвовал в постановке целей и задач исследования и выборе адекватных методов для достижения целей работы. Выполнял эксперименты на всех этапах исследования и анализировал полученные результаты, а также внес значительный вклад в написание статей, формулирование выводов и основных положений, выносимых на защиту.

### **К работе возникают следующие вопросы и замечания:**

1. При описании актуальности, перспектив и современного состояния исследуемой проблемы в тексте работы часто упоминаются библиографические источники, опубликованные 10 и более лет назад. Например, Гудков, 1991; Palumbl, 2001; Alloway, 2013; Jan et al., 2012; Yang et al., 2000; Sparrow, 1968; Ward, 1995; Гродзинский, 1989 и ряд других работ. Безусловно, применение ссылок на классические источники литературы логически обосновано, однако хотелось бы видеть и ссылки на более современные работы. Также некоторые ссылки есть в списке литературы, но нет в тексте диссертации (Bodnar, I. S. et al., 2022).

2. В тексте диссертации присутствует значительное количество опечаток, грамматических и пунктуационных ошибок: стр. 7 - «омогенизировали»; стр. 94 – «занчение»; стр. 97 – «связанно», «повышенная», «выевлена»; стр. 98 – «участвуют», стр. 103 – «таранскриптома» и другие. Кроме того, по тексту встречаются несогласованные предложения и неоднозначные выражения. Например: стр. 23. “некоторые тяжелые металлы, включая мышьяк (As)...”; стр. 26. “Когда свинец диффундирует в корнях, подвижной остается только часть свинца в корне...”; стр. 36. “При гипоксии и засоленности у арабидопсиса ...”; “Засуха и высокая температура у томатов (*Solanum lycopersicum* L.) показывает...” “Таким образом, при засухе и засолении у огурцов ...” и так далее. В целом данные неточности и ошибки не искажают общий смысл и сформулированные выводы, однако ухудшают внешний вид и восприятие работы.

3. Почему для оценки микрофенологических фаз развития ярового ячменя выбрана доза 20 Гр, а для анализа транскриптома - 15 Гр? Не лучше было бы в обоих экспериментах использовать одну и ту же дозу? Кроме того, при обосновании выбора дозы автор сообщает, что «поглощенная доза в 15 Гр была приемлемой для молодых растений ячменя и не вызывала остановки роста [International Atomic Energy Agency, 2023].» Что подразумевается под

выражением «приемлемой для молодых растений»? И в таком случае, насколько «приемлемой» была доза в 20 Гр?

4. Как определяли «барицентр растений» для точного дозирования в процессе облучения?

5. В своих экспериментах автор использовал разные сорта ячменя: Нур и Фокс-1. Почему для исследования не выбрали один сорт ячменя? Допустимо ли обобщать результаты, полученные по разным сортам, и делать вывод о ячмене в целом?

6. Почему листья для анализа транскриптома собирали через 24 часа после облучения? Почему для анализа биохимии и экспрессии генов использовали корни и побеги именно 7-суточных проростков?

7. Концентрация свинца сопоставима с концентрациями, встречающимися при реальном загрязнении почвы?

8. Стр. 43. В методике исследования (п. 2.2.1) недостаточно информации об условиях проращивания ячменя. В каком виде и с какой целью вносили в почву обогащающие ее питательные вещества и микроэлементы? Каков был исходный состав почвы? Это покупная почвенная смесь, или ее готовили самостоятельно?

9. Стр. 56. Гены для анализа уровня экспрессии «были подобраны на основе анализа литературных источников и транскриптомного исследования проростков ячменя после  $\gamma$ -облучения [Prazyan et al., 2024].» Однако далее в тексте и таблицах нет однозначного сопоставления выбранных для анализа экспрессии генов и генов, идентифицированных как дифференциально экспрессируемые (ДЭГ) в ходе транскриптомного исследования. Присутствовали ли среди выбранных для оценки экспрессии гены, сходные по функциям генам, идентифицированным в анализе транскриптома? Почему один из генов, приведенных в списке, - *AtPDR8-like* - имеет идентификатор *Arabidopsis thaliana* в названии? Кроме того, форматирование приложения 1 не дает возможности полноценного поиска генов по их идентификаторам, приведенным в тексте, что очень затрудняет сопоставление полученных результатов и выводов, сделанных на их основе.

10. В таблице 4 есть гены, продукты которых участвуют в транспорте и детоксикации ксенобиотиков, в том числе тяжелых металлов, и гены белков метаболизма гормонов растений. Известно, что одной из основных мишеней действия ионизирующего излучения является ДНК. Однако, ни один ген, участвующий в метаболизме ДНК, не вошел в список анализируемых. Как автор может это объяснить?

11. Стр. 62-65. Графики (рис. 5-7) с результатами оценки микрофенологических фаз прорастания семян ячменя в разных условиях сложны для восприятия, поскольку отличаются от обычно встречающихся в подобных исследованиях. Из рисунков непонятно, какова итоговая всхожесть семян в разных условиях, какая доля семян от общего числа достигла той или иной фазы роста? К тому же, в материалах и методах отсутствует информация о том, как производили подсчет семян на каждой из стадий развития, и поэтому данных, представленных в таблице 6, недостаточно для понимания.

12. Стр. 81. «Экспрессия генов биосинтеза цитокининов в основном росла, за исключением гена *HvLOG3* в корнях, который отвечает за преобразование неактивных форм цитокининов в активные.» Какие гены биосинтеза цитокининов имеет в виду автор?

13. Необходимо более тщательно подходить к написанию главы "Обсуждение". При обсуждении собственных результатов требуется не просто перечислять факты, обнаруженные в публикациях других авторов, а использовать эти данные для подтверждения собственных утверждений.

14. Стр. 86. Что означает выражение “однопротекторные идентификаторы белков”?

### Заключение


Диссертация Празяна Александра Арменовича является самостоятельным, логически законченным исследованием, содержит необходимые исходные данные, обобщающие таблицы, рисунки, результаты статистически обработаны и достоверны, выводы обоснованы. Результаты, полученные автором, оригинальны, обладают научной новизной и практической значимостью. Указанные замечания к содержанию и оформлению работы не уменьшают значимость диссертации, не затрагивают ее основных выводов и заключений, а также не влияют на общую положительную оценку выполненного автором исследования.

Диссертационная работа «Закономерности формирования ответных реакций ярового ячменя на раздельное и сочетанное действие гамма-облучения и свинца» соответствует паспорту специальности и критериям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями), а ее автор - Празян Александр Арменович - заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.1 Радиобиология.

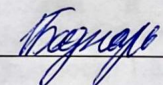
Диссертационная работа и данный отзыв были обсуждены на заседании Отдела радиоэкологии Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (протокол № 4 от 01 августа 2025 г.). Отзыв был утвержден единогласным голосованием 16 сотрудников категории «научный персонал», присутствовавших на заседании.

Отзыв составили:

с.н.с., зав. отделом радиоэкологии  
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, к.б.н.


  
Раскоша Оксана Вениаминовна

с.н.с. отдела радиоэкологии  
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, к.б.н.

  
Боднарь Ирина Сергеевна

Подписи И. С. Боднарь и О. В. Раскоши «ЗАВЕРЯЮ»

И.о. главного ученого секретаря  
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, к.х.н.

  
Полле Андрей Яковлевич

«06» августа 2025 г.

Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук” (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Руководитель организации: директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН Дёгтева Светлана Владимировна.

Почтовый адрес: 167982, ГСП-2, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.

Тел.: (8212) 24-10-26, факс: (8212) 24-22-64.

E-mail: [info@frc.komisc.ru](mailto:info@frc.komisc.ru). Сайт: <http://www.komisc.ru>.