

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.013.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 18.09.2025 № 2

О присуждении Подлущкому Михаилу Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата биологических наук.

Диссертация «Молекулярные аспекты адаптации *Arabidopsis thaliana* к хроническому радиационному воздействию в Чернобыльской зоне отчуждения» по специальности 1.5.1. «Радиобиология» принята к защите 01.07.2025 (протокол заседания № 7) диссертационным советом 24.1.013.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ), 249035, Россия, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д.1, к.1, приказы № 362/нк от 29.07.2013 и № 561/нк от 03.06.2021.

Соискатель – Подлущкий Михаил Сергеевич, 24.10.1996 года рождения, в 2020 году окончил магистратуру с отличием по направлению подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии» в Обнинском институте атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (ИАТЭ НИЯУ МИФИ) с присвоением квалификации магистр (диплом 107704 № 0259544 от 08.07.2020) и в период с 2020 по 2024 гг. обучался в очной форме в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ по специальности «Радиобиология» по направлению подготовки 06.06.01 «Биологические науки». Диссертация выполнена на базе лаборатории молекулярно-клеточных основ сельскохозяйственной радиобиологии (лаборатория № 8) НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ. Соискатель работает в НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ в должности научного сотрудника.

Научный руководитель – Казакова Елизавета Александровна, кандидат биологических наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, старший научный сотрудник лаборатории № 8.

Официальные оппоненты:

Киров Илья Владимирович, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ведущий

научный сотрудник, заведующий лабораторией маркерной и геномной селекции растений;

Велегжанинов Илья Олегович, кандидат биологических наук, Институт биологии Федерального исследовательского центра Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук), старший научный сотрудник отдела радиоэкологии и ЦКП «Молекулярная биология»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского), г. Нижний Новгород, в своем положительном отзыве, подписанном Гринберг Мариной Антоновной, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории радиобиологии Института биологии и биомедицины ННГУ им. Н.И. Лобачевского и Воденеевым Владимиром Анатольевичем, доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедры биофизики Института биологии и биомедицины, указала, что диссертация Подлущкого М.С. является законченной научно-квалификационной работой, заслуживающей положительной оценки и соответствующей требованиям к соисканию степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.1 «Радиобиология».

В отзыве подчеркивается актуальность и научная новизна исследования, которая заключается в комплексном мультиомиксном анализе адаптации *Arabidopsis thaliana* к хроническому радиационному воздействию. Впервые для решения подобной задачи были совместно использованы транскриптомные и геномные данные. Такой подход позволил установить, что хроническое облучение в ряду поколений способно вызывать в потомстве травянистых растений устойчивые транскрипционные изменения, связанные с активацией энергетического, антиоксидантного метаболизма и перестройкой регуляторных сетей. Впервые были выявлены уникальные фиксированные однонуклеотидные полиморфизмы в экзонах генов и установлена их связь с дифференциальной экспрессией. Кроме этого, сделано предположение, что обнаруженные эффекты могут лежать в основе пониженной чувствительности потомков растений, длительно произраставших в условиях повышенного уровня ионизирующего излучения, к дополнительному острому  $\gamma$ -облучению.

Полученные результаты расширяют фундаментальные представления о специфических транскрипционных и геномных паттернах, возникающих после хронического воздействия ионизирующего излучения. Работа описывает механизм долговременного закрепления радиационно-индуцированных эффектов через возникновение фиксированных однонуклеотидных полиморфизмов в генах, углубляя понимание связи между первичными эффектами облучения и формированием длительных адаптивных реакций. Практическая значимость работы определяется применимостью разработанных подходов для выявления маркеров радиоустойчивости, что открывает перспективы для разработки новых стратегий

ремедиации экосистем, загрязненных радионуклидами, а также для использования в биотехнологии, сельском хозяйстве и космических исследованиях. Достоверность полученных результатов обеспечена применением современных и проверенных методов, строгой стандартизацией экспериментов, многоступенчатой проверкой качества секвенирования и открытым доступом к полученным данным, что гарантирует их воспроизводимость. Указанные в отзыве замечания не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы, не затрагивают ее выводов и положений, выносимых на защиту, а также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Соискатель имеет 70 опубликованных научных работ, в том числе 18 работ – по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и/или индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, а также Едином государственном перечне научных изданий «Белого списка» – 3 статьи. Высокий рейтинг журналов подтверждает значимость полученных результатов. В список опубликованных по теме диссертации работ также входят материалы международных, всероссийских и региональных конференций. Подготовка публикаций выполнена соискателем лично или при его непосредственном участии. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах в диссертации отсутствуют. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Podlutskii M.**, Babina D., Podobed M., Bondarenko E., Bitarishvili S., Blinova Y., Shesterikova E., Prazyan A., Turchin L., Garbaruk D., Kudin M., Duarte G., Volkova P. *Arabidopsis thaliana* Accessions from the Chernobyl Exclusion Zone Show Decreased Sensitivity to Additional Acute Irradiation // *Plants*, 2022. – Vol. 11. – № 22. – P. 3142 (K1, BC1, WoS, Scopus, Q1).

2. Babina D., Podobed M., Bondarenko E., Kazakova E., Bitarishvili S., **Podlutskii M.**, Mitsenyk A., Prazyan A., Gorbatova I., Shesterikova E., Volkova P. Seed Gamma Irradiation of *Arabidopsis thaliana* ABA-Mutant Lines Alters Germination and Does Not Inhibit the Photosynthetic Efficiency of Juvenile Plants // *Dose Response*, 2020. – Vol. 18. – № 4. – P. 1-13 (K1, BC2, WoS, Scopus, Q2).

3. Voronezhskaya V., Volkova P., Bitarishvili S., Shesterikova E., **Podlutskii M.**, Clement G., Meyer C., Duarte G., Kudin M., Garbaruk D., Turchin L., Kazakova E. Multi-Omics Analysis of *Vicia cracca* Responses to Chronic Radiation Exposure in the Chernobyl Exclusion Zone // *Plants*, 2023. – Vol. 12. – № 12. – P. 2318 (K1, BC1, WoS, Scopus, Q1).

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов от: доктора биологических наук Котерова Алексея Николаевича (заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ. им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва), кандидата биологических наук Шинкаркиной Анны Петровны (заведующая отделом молекулярной генетики, МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, г. Обнинск), кандидата биологических наук Ахмадуллиной Юлии Рафисовны (начальник отдела, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела радиационной цитогенетики, ФГБУН ЮУрФНКЦИ МБ

ФМБА России, г. Челябинск), кандидата биологических наук Антоновой Елены Валерьевны (старший научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург), кандидата биологических наук Шималиной Надежды Сергеевны (старший научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии, Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург), кандидата биологических наук Рыбак Анны Викторовны (научный сотрудник отдела радиоэкологии, ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар), кандидата биологических наук Якимовой Анны Олеговны (заведующий лабораторией молекулярной и клеточной радиобиологии, МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, г. Обнинск), кандидата биологических наук Евстратовой Екатерины Сергеевны (заведующий отделением регенеративных технологий и биофабрикации, начальник отдела обеспечения качества лекарственных средств, МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, г. Обнинск), кандидата биологических наук Гайнуллина Наиля Рифкатовича (ведущий научный сотрудник лаборатории генетики и пребридинга, ФИЦ «Немчиновка», г. Москва), кандидата биологических наук Пермяковой Натальи Владиславовны (старший научный сотрудник лаборатории биоинженерии растений, Институт цитологии и генетики СО РАН, г. Новосибирск). Все отзывы положительные. В них отмечается актуальность работы, теоретическая и практическая значимость, новизна полученных результатов, высокий методический уровень выполненных исследований, четкость изложения материала и выводов, а также возможность использования результатов в решении таких практических задач, как разработка новых подходов для восстановления загрязненных радионуклидами земель, выявление маркеров радиоустойчивости растений для сельского хозяйства, биотехнологии и космической биологии, повышение устойчивости сельскохозяйственных культур к неблагоприятным факторам среды и прогнозирование долгосрочных генетических последствий техногенных катастроф.

Критические замечания в отзывах отсутствуют. В качестве замечаний и пожеланий представлено: 1) «В автореферате приведены физико-химические характеристики и уровни радиоактивного загрязнения почвы на экспериментальных участках, однако не представлены результаты оценки дозовых нагрузок растений. Проводился ли анализ активности дозообразующих радионуклидов в вегетативной массе растений, произрастающих на экспериментальных участках?» (кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии Шималина Н.С.); 2) «В главе 2, описывающей методологию исследования, указано, что проведены регистрация плотности потоков альфа- и бета-частиц и измерение мощности эквивалентной амбиентной дозы для характеристики радиационной обстановки исследуемых участков. Однако в тексте автореферата эти данные не представлены» (кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела радиоэкологии Рыбак А.В.); 3) «Поскольку в исследовании речь идет о хроническом радиационном воздействии, хотелось бы иметь представление о величинах мощностей поглощенных доз для растений *Arabidopsis thaliana*, семена которых отобраны для дальнейшей экспериментальной работы. Проводились ли какие-нибудь расчеты?» (кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела радиоэкологии Рыбак

А.В.); 4) «В Главе 3 приведены данные о физико-химических характеристиках и уровнях радиоактивного загрязнения почв, также размышления о предполагаемом большом накоплении радионуклидов растениями арабидопсиса на участке Масаны по причине повышенной кислотности почв, низким содержанием обменных оснований, дефицита калия и формирования органоминеральных комплексов с высокой подвижностью. Однако в автореферате отсутствуют данные о мощности поглощенной дозы, рассчитанной с помощью любого общепринятого метода. Это позволило бы свести информацию об удельной активности радионуклидов в почве и растениях, привести к общему знаменателю и проследить зависимость «доза-эффект» (кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории популяционной радиобиологии Антонова Е.В.); 5) «Не указан тип разбросов значений (с. 12). Хотя данные для физико-химических свойств почв и носят вспомогательный характер, выпускать подобную информацию не следует» (доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии Котеров А.Н.); 6) «Надо называть как целое «Аберрации хромосом» (включают и хромосомные, и хроматидные перестройки), а не «Хромосомные аберрации» (как на с. 4), когда автором подразумевается именно целое (и хромосомные, и хроматидные аберрации)» (доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии Котеров А.Н.); 7) «Не совсем понятна во «Введении» (с. 3) попытка автора расширить важность своего исследования на растениях до «развития новых ядерных технологий... и активизации космических исследований». Выглядит некоторой натяжкой. (Трудно придумать конкретику – разве что исследование космонавтами произрастания растений? И что там будет за фон? Переносить же генетические закономерности с облученных растений так прямо на облученных людей (космонавтов и ядерных работников) все же слишком смело). Это лишнее, поскольку работа и без этого имеет много названных важных, фундаментальных и практических, приложений» (доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии Котеров А.Н.); 8) «Имеется некоторое логическое несоответствие в рассуждениях относительно отдельных полученных результатов. Была исследована экспрессия, полиморфизмы и пр. адаптивных генов (антиоксидантных, репарации ДНК, глутатионпероксидазы и т.п.) и получилось, что при хроническом облучении произошла адаптивная стимуляция вкупе с радиоадаптивным ответом (продемонстрированным автором). Казалось бы, произошел гормезис, то есть обычная ситуация типа стимуляции семян облучением в сельском хозяйстве. Однако из результатов следует ослабление растения со всех загрязненных участков – и с максимальной, и со средней степенью загрязнения: «...снижение параметров прорастания и некоторых морфофизиологических показателей, а также пониженную... эффективность фотосистемы II и измененные параметры фотохимического тушения, что указывает на перестройку фотосинтетического аппарата в условиях хронического радиационного воздействия». Выходит так, что выявленной на генном уровне адаптации сопутствует явное физиологическое и метаболическое угнетение. Вместо ожидаемого гормезиса. В автореферате нет объяснений данному факту, и нет возможности сравнить степень загрязнения, к примеру,  $^{137}\text{Cs}$  (основной радионуклид) для опытных и контрольного

участков, поскольку для контрольного данных почему-то нет. Вместе с тем, гормезис у растений наблюдается в условиях 20-40 ЕРФ (к примеру Кузин А.М., 2004), и сравнение уровня  $^{137}\text{Cs}$  с фоном для контрольного участка было бы уместно» (доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии Котеров А.Н.); 9) «Возможно, адаптивных ресурсов растения не хватило именно потому, что уровень радиоактивного загрязнения на опытных участках был очень высок. Автором указаны значения для  $^{137}\text{Cs}$  в 11510 Бк/кг и 1074 Бк/кг (с. 12). Много это или мало? Оценок в автореферате не обнаружено. Но, согласно Ильин ЛА и др. Рад. гигиена, 2017, это немало. Причем разница в удельной радиоактивности почвы на порядок для двух участков (с. 12) не привела к различиям в угнетении морфофизиологии и метаболизма растений. Эти моменты следовало бы объяснить при будущих исследованиях» (доктор биологических наук, заведующий лабораторией радиобиологических проблем техногенного облучения Отдела радиационной эпидемиологии Котеров А.Н.); 10) Выявлены ли различия в молекулярных аспектах адаптации *Arabidopsis thaliana* к воздействию ионизирующих излучений разных типов?» (кандидат биологических наук, заведующая отделом молекулярной генетики Шинкаркина Анна Петровна).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они являются компетентными специалистами в области радиобиологии, молекулярной биологии и радиоэкологии, имеют значимые публикации в ведущих международных и отечественных научных изданиях и пользуются заслуженным авторитетом у коллег. Доктор биологических наук Киров Илья Владимирович – ведущий ученый в области геномики и биоинформатики растений. Его научные интересы включают изучение организации геномов растений с помощью современных омиксных подходов, а также исследование роли мобильных генетических элементов в адаптации растений к стрессовым факторам. Он руководит исследованиями, посвященными анализу ретротранспозонов и их возможного влияния на геном. Кандидат биологических наук Велегжанинов Илья Олегович – признанный специалист в области экспериментальной радиобиологии. Его научные интересы включают изучение механизмов ответа клеток на действие ионизирующего излучения, в том числе исследование радиационно-индуцированных повреждений ДНК, апоптоза и формирования адаптивного ответа на малые дозы облучения.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований впервые с использованием мультиомиксного подхода изучены микроэволюционные и молекулярно-генетические механизмы адаптации *A. thaliana* к хроническому радиационному воздействию в условиях Чернобыльской зоны отчуждения. В ходе работы был проведен совместный анализ транскриптомных и геномных изменений у потомков растений, длительно подвергавшихся воздействию ионизирующего излучения.

Впервые установлены и охарактеризованы ранее неизвестные фиксированные однонуклеотидные полиморфизмы в генах, связанных с контролем клеточного цикла, репарацией ДНК, регуляцией митоза и функционированием фрагмопласта, а также с антиоксидантной защитой и фитогормональной регуляцией. Получены прямые свидетельства направленного накопления мутаций в генах, регулирующих клеточный цикл, что указывает на действие сильного селективного давления в условиях

хронического стресса. В работе продемонстрирована взаимосвязь между накоплением специфических однонуклеотидных полиморфизмов и изменением экспрессии соответствующих генов, а также установлена роль отдельных метаболитов, таких как кемпферол и пролин, в формировании радиопротекторных фенотипов. Выявлено, что популяции из Чернобыльской зоны отчуждения также демонстрируют пониженную чувствительность к дополнительному острому  $\gamma$ -облучению, что отражает возможное формирование устойчивых адаптивных признаков на генетическом уровне.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что полученные результаты расширяют фундаментальные представления о молекулярных механизмах адаптации растений к хроническому радиационному воздействию. Впервые комплексными исследованиями показано, что длительное воздействие ионизирующего излучения приводит к формированию специфических транскрипционных и геномных ответов, отражающих как подавление, так и активацию различных сигнальных, метаболических и защитных путей. Проведенный мультиомиксный анализ позволил установить связь между геномными и транскрипционными изменениями, что углубляет понимание микроэволюционных процессов и вносит существенный вклад в развитие радиобиологии и эволюционной генетики.

Практическая значимость работы подтверждается разработкой и валидацией эффективных экспериментальных и биоинформатических подходов для выполнения комплексной оценки радиационно-индуцированных изменений. Полученные данные о специфических маркерах радиоустойчивости, включая гены с уникальными однонуклеотидными полиморфизмами, могут быть использованы для создания генетических тест-систем мониторинга состояния популяций на загрязненных территориях. Идентификация ключевых метаболитов и генов открывает перспективы для разработки новых биотехнологических решений по повышению устойчивости сельскохозяйственных культур, а также для оценки последствий радиационного воздействия в рамках космических исследований и задач радиационной безопасности.

Оценка достоверности результатов исследования подтверждается применением стандартизированных методов на всех этапах работы, строгим контролем условий отбора и последующего выращивания растений, а также использованием современных аналитических и статистических подходов анализа. Секвенирование выполнено на высокопроизводительной платформе (секвенирование нового поколения, NGS) с многоступенчатой проверкой качества и обработкой полученных данных по строгим статистическим критериям. Использование лабораторных линий растений позволило минимизировать внутривнутрипопуляционную изменчивость, а сопоставимость результатов с независимыми исследованиями подтверждает их надежность.

Личный вклад автора охватывает все ключевые этапы диссертационного исследования. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач работы, выполнил анализ и обобщение данных научной литературы. Соискателем была спланирована и проведена основная экспериментальная часть, включая участие в научной экспедиции по отбору проб. Ключевой вклад автора состоит в самостоятельной биоинформатической и статистической обработке всего массива

полученных данных, в том числе с разработкой и применением оригинальных скриптов на языке Python. Интерпретация результатов, формулировка положений, выносимых на защиту, и основных выводов диссертации выполнены лично автором. Результаты работы были апробированы в виде устных докладов на всероссийских и международных конференциях, а также легли в основу научных публикаций, подготовленных при непосредственном участии автора.

Высказанные в ходе защиты диссертации замечания не были расценены диссертационным советом как критические. Соискатель аргументированно ответил на замечания и поставленные вопросы.

На заседании 18 сентября 2025 года диссертационный совет принял решение: за вклад в развитие молекулярной радиобиологии и радиозэкологии, за новые научные данные, полученные при применении мультиомиксного подхода, позволившего на геномном и транскриптомном уровнях выявить возможные молекулярно-генетические механизмы адаптации растений к условиям хронического радиационного воздействия; за выявление направленного накопления уникальных однонуклеотидных полиморфизмов в генах, регулирующих клеточный цикл, репарацию ДНК и антиоксидантную защиту, что является свидетельством наличия микроэволюционных процессов в популяциях травянистых растений, а также за выявление и характеристику кандидатных генов, открывающих перспективы для разработки новых биотехнологических решений повышения устойчивости сельскохозяйственных культур и создания систем мониторинга с целью оценки состояния экосистем на радиоактивно загрязнённых территориях

присудить Подлущкому Михаилу Сергеевичу ученую степень кандидата биологических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 14 докторов наук по специальности 1.5.1. «Радиобиология», участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – 0.

Председатель  
диссертационного совета

Санжарова Наталья Ивановна

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета

Переволоцкий Александр Николаевич

Дата оформления заключения: «18» сентября 2025 г.