

На правах рукописи



Эдомская Мария Александровна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В
ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ЗОН
ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 1.5.1. «Радиобиология»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Обнинск — 2023

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ), г. Обнинск.

Научный руководитель:

Лукашенко Сергей Николаевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник ФГБНУ ВНИИРАЭ.

Официальные оппоненты:

Мамихин Сергей Витальевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиозэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Ларионова Наталья Владимировна, кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, ученый секретарь филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН» (г. Екатеринбург).

Защита диссертации состоится «21» сентября 2023 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета 24.1.013.01 при ФГБНУ ВНИИРАЭ по адресу: 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д.1, к.1, пом. 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ ВНИИРАЭ: <https://ds.rirae.ru/>

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета

канд. биол. наук
Бондаренко Екатерина
Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Территория Российской Федерации многократно подвергалась выпадению радиоактивных осадков в результате ядерных испытаний, аварий на атомных электростанциях (АЭС), Кыштымской аварии, аварийных ситуаций при проведении мирных ядерных взрывов и др. Кроме того, промышленность России включает все виды предприятий ядерно-топливного цикла.

Важность контроля радиационной ситуации на территории России отражена в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» от 5 декабря 1995 года (с изменениями на 11 июня 2021 года), а также в Указе Президента Российской Федерации «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», где сказано, что «...Сохраняется повышенное радиоактивное загрязнение территорий вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 году, аварии на производственном объединении «Маяк» в 1957 году, деятельности организаций ядерно-топливного цикла и организаций ядерного оружейного комплекса, а также вследствие локальных радиоактивных выпадений после проведения испытаний ядерного оружия».

Многие из загрязненных вследствие аварий территорий относятся к территориям сельскохозяйственного назначения. Поскольку растительность является первым звеном пищевой цепочки, накопление радионуклидов растениями определяет величину их перехода из абиотических компонентов экосистем в биотические, включая организм человека.

В мировой практике достаточно много работ посвящено исследованию процессов накопления искусственных радионуклидов растительностью. Однако, в основном, данные исследования рассматривают переходы так называемых «традиционных» изотопов, таких как ^{137}Cs и ^{90}Sr , и гораздо меньше внимания уделяется исследованию процессов накопления плутония.

Вместе с тем, следует учитывать, что плутоний является высокотоксичным радиоактивным элементом. Несмотря на его плохую усвояемость в желудочно-кишечном тракте, поглощение 0,5 г плутония может привести к острому внутреннему облучению, которое способно привести к летальному исходу. Радиотоксичность изотопов плутония существенно выше изотопов цезия и стронция. Так согласно СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ относятся к группе

А (изотопы с особо высокой радиотоксичностью), ^{90}Sr — к группе Б (изотопы с высокой радиотоксичностью), а ^{137}Cs — к группе В (изотопы со средней радиотоксичностью).

Поведение плутония в организме человека характеризуется довольно длительной задержкой и высоким отложением радионуклида в скелете (более 50 %) и печени (до 30 %), с медленным и низким выделением, составляющим 50–100 лет и 40 лет, соответственно (Василенко, 2004; Лукина, 2018). Более того, особое внимание к его изотопам обуславливается их большим периодом полураспада (тысячи и десятки тысяч лет) (IAEA, 1973; Конопля, 2009).

Таким образом, вышеперечисленные факторы делают актуальным исследование накопления плутония растительностью.

Степень разработанности темы исследования. Плутоний в почвах присутствует в следовых концентрациях, обусловленных глобальными выпадениями. В литературе представлен ряд работ, посвященных исследованию уровней глобальных выпадений плутония. Основные работы по оценке глобального загрязнения плутонием проведены для территории Америки и Европы. Данные виды исследования для территории Российской Федерации носят локальный, нерегулярный характер.

Основные результаты всех мировых исследований о величине накопления радионуклидов растениями были обобщены группой экспертов МАГАТЭ и представлены в специальных публикациях (IAEA-TECDOC-1616, 2009; IAEA-TRS№472, 2010; IAEA-TRS№479, 2014). Представленные параметры накопления плутония охватывают 7 порядков величин и рассчитаны на основе ограниченного количества источников. В данных работах эксперты отмечают, что приемлемое количество данных по накоплению радионуклидов растениями имелось только для нескольких из них, таких как цезий и стронций, для трансурановых элементов (Am, Pu) вводных данных было недостаточно для полноценной оценки их поглощения растительностью.

На процесс накопления плутония растительностью оказывает влияние множество факторов, таких как вид растения, почва, на которой оно выращено, условия выращивания, включая климат и методы ведения сельского хозяйства, которые, в свою очередь, оказывают влияние на свойства почв (орошение, вспашка, известкование и внесение удобрений) и приводят к перераспределению радионуклидов, изменению кислотности почв,

форм нахождения радионуклидов в почве, а, следовательно, к способности поглощения их растениями (Lux, 1995; Sokolik, 2004). В литературе имеется ряд данных о зависимости поведения радионуклидов от почвенно-климатических факторов. Однако, данные факторы слабо изучены в отношении изотопов плутония.

Таким образом, недостаток первичных данных по содержанию плутония в компонентах экосистем территории Российской Федерации, а также слабая изученность закономерностей накопления его изотопов растительностью предопределили выбор темы исследования.

Цель исследования — выявить закономерности распределения изотопов плутония в почвенно-растительном покрове зон влияния радиационно-опасных объектов.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. экспериментально оценить уровень глобальных выпадений плутония на территории Восточно-Европейской равнины;
2. дать оценку содержания и распределения плутония в почвах зон влияния характерных радиационно-опасных объектов;
3. выявить закономерности накопления плутония дикорастущей растительностью в зонах влияния характерных радиационно-опасных объектов;
4. охарактеризовать накопление плутония надземной и корневой частями наиболее распространенных сельскохозяйственных культур;
5. выявить факторы, влияющие на накопление изотопов плутония растительностью.

Научная новизна работы. Впервые проведена экспериментальная оценка глобальных выпадений плутония для территории Восточно-Европейской равнины. Получены комплексные данные по содержанию изотопов плутония в почвенном и растительном покрове с использованием единой методологии и методики исследования зон влияния радиационно-опасных объектов с различной природой радиоактивного загрязнения: Белоярской и Билибинской атомных станций, территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов (РАО), расположенному в г. Обнинск, а также территорий, подвергшейся воздействию аварийных выбросов Чернобыльской

АЭС — Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЗ) и Калужской области.

На основе комплексных данных установлены параметры накопления плутония растительностью для каждой из исследуемых территорий. Получены уникальные количественные показатели накопления изотопов плутония для надземной части древесной растительности территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО. В ходе специальных вегетационных опытов для сельскохозяйственных культур установлены вариативности накопления плутония, обусловленные влиянием типа почвы, влажностью почвы, видовыми различиями, а также внутрисортная вариабельность на примере бобов сорта «Янтарные».

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученный в ходе исследования уровень глобальных выпадений плутония для территории Восточно-Европейской равнины является одним из ключевых параметров при определении масштабов загрязненных территорий, включая оценку величины и площади загрязнений, а также определении границ зон влияния радиационно-опасных объектов. Полученные количественные данные по содержанию изотопов плутония в почвенном и растительном покрове являются базовыми характеристиками радиоэкологического состояния зон влияния Белоярской и Билибинской АЭС, территорий ПГРЗ, Калужской области, а также территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО, расположенному в г. Обнинск и могут быть использованы при разработке систем мониторинга зон влияния радиационно-опасных объектов.

Полученные количественные показатели накопления плутония растительностью могут использоваться в качестве параметров математических моделей для оценки его концентрации в сельскохозяйственной продукции, а, следовательно, и в расчетах перорального поступления Pu в организм животных и человека.

Выявленные закономерности накопления плутония разными частями деревьев существенно расширяют фундаментальные знания о накоплении изотопов плутония древесной растительностью.

Положения, выносимые на защиту:

1. Площадное загрязнение $^{239+240}Pu$ почв территории Восточно-Европейской равнины, обусловленное глобальными

выпадениями, составляет 55 ± 26 Бк/м², что с учетом 20 см отбора почвы соответствует концентрации в $0,18 \pm 0,09$ Бк/кг.

2. Спорадические пятна плутониевого загрязнения с величинами концентраций $^{239+240}\text{Pu}$ в почве, достигающих $n \cdot 10^2$ Бк/кг, фиксируются на территориях зон влияния ряда исследованных радиационно-опасных объектов, в частности Белоярской и Билибинской атомных станций, территории, прилегающей к хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск.

3. Значения коэффициентов накопления $^{239+240}\text{Pu}$ растениями исследуемых зон влияния характерных радиационно-опасных объектов оцениваются в $7,9 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-2}$ для надземной части разнотравья, $3,4 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-1}$ для вегетативных органов надземной части кустарников и $< 1,5 \cdot 10^{-5} - 6,8 \cdot 10^{-2}$ для разных органов и тканей надземной части древесной растительности.

4. По величине накопления изотопов плутония надземной частью бобов сорта «Янтарные» и ячменя сорта «Зазерский-85» типы почв можно ранжировать в следующий ряд: дерново-подзолистая супесчаная и серая лесная пылевато-суглинистая > болотная торфяная низинная >> чернозем типичный тяжелосуглинистый. Закономерности накопления плутония в зависимости от увлажненности почв (в пределах 15–40 % абсолютной влажности дерново-подзолистой почвы) неодинаковы для отдельных видов/органов сельскохозяйственных растений.

5. Видовая вариативность коэффициентов накопления плутония сельскохозяйственными растениями (ячмень (*Hordeum vulgare*), сорт Зазерский 85; патиссон (*Cucurbita pepo* var. *patissoniana*), сорт Белоснежка; лук (*Allium cepa*), сорт Штуттгартер; редис (*Raphanus sativus* var. *sativus*), сорт Жара; бобы (*Fabaceae*), сорт Русский чёрный боб; томаты (*Solanum lycopersicum*), сорт Сладкая гроздь; картофель (*Solanum tuberosum*), сорт Синеглазка) составляет от $3,2 \cdot 10^{-3}$ до $5,6 \cdot 10^{-3}$ для надземной части растений и от $3,8 \cdot 10^{-2}$ до $8,8 \cdot 10^{-1}$ для корневой системы. Внутрисортная вариативность накопления плутония бобами (*Fabaceae*) сорта «Янтарные», обусловленная индивидуальными особенностями растений, находится в диапазоне $1,6 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-1}$ (на все растение).

Предмет и объект исследования. Объектом исследований являлись почвы и растительность зон влияния радиационно-опасных

объектов: зон влияния Белоярской и Билибинской АЭС, территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО, а также территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Предметом исследования являлись закономерности распределения плутония в почвенном и растительном покрове зон влияния рассматриваемых радиационно-опасных объектов.

Методология и методы исследования. Оценка уровня глобальных выпадений плутония выполнена с использованием агрохимических стандартных образцов почвы из коллекции ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова».

В ходе исследования содержания плутония в почвенном и растительном покрове зон влияния радиационно-опасных объектов с различной природой радиоактивного загрязнения проведены полевые работы по отбору проб почвогрунтов и растительности естественных экосистем с последующим анализом содержания изотопов плутония в них в лабораторных условиях.

Оценка накопления Pu сельскохозяйственными растениями и изучение факторов, влияющих на процесс его накопления, включали в себя камеральные и лабораторные работы в соответствии с общепринятыми методами проведения вегетационных опытов. При проведении вегетационных опытов по выявлению факторов, влияющих на накопление плутония растениями, соблюдались одинаковые условия выращивания сельскохозяйственных культур с изменением одного изучаемого фактора.

Определение содержания плутония в образцах почвы и растительности проводилось с использованием альфа-спектрометрического метода анализа с предварительным радиохимическим выделением.

На этапе постановки научной проблемы и изучения степени ее разработанности проведен обзор литературных источников с использованием теоретических методов анализа, обобщения, сравнения и систематизации полученной информации. На этапе обработки и интерпретации результатов исследования применены статистические методы обработки данных, теоретические методы — анализ, сравнение, обобщение, систематизация.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Проведено исследование закономерностей распределения изотопов плутония в почвенно-растительном покрове зон влияния радиационно-опасных объектов и факторов, влияющих на его накопление сельскохозяйственными растениями, что соответствует пунктам 13 и 14 паспорта специальности 1.5.1. «Радиобиология», охватывающих вопросы изучения закономерностей поведения радиоактивных веществ в окружающей среде, последствий ядерных аварий и катастроф, чрезвычайных ситуаций, миграции радионуклидов, в том числе по сельскохозяйственным цепочкам, радиоэкологические последствия радиоактивного загрязнения, в том числе в результате радиационных аварий.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается достаточным объемом экспериментальных данных, использованием современной аппаратурно-методической базы, применением специально разработанных методических приемов, прошедших валидацию и верификацию с участием международной аккредитованной лаборатории.

Личный вклад автора. Автор самостоятельно выполнял все работы по настоящему исследованию — определение цели и задач исследования, разработка методологии исследования, в том числе постановка вегетационных экспериментов и лабораторных работ, модернизация методики анализа плутония в образцах почвы и растительности. Участвовал в полевых работах, выполнял анализ содержания плутония в отобранных образцах, осуществлял обработку результатов, интерпретацию и обобщение полученных данных, подготовку научных публикаций. Общее количество самостоятельно проанализированных автором образцов почво-грунтов и растительности, составляет ~500 образцов.

Апробация результатов и публикации. Основные результаты исследования доложены и обсуждены на международных научных форумах и конференциях как в России, так и за рубежом: International Scientific Forum «Nuclear science and technologies» (Алматы, Казахстан, 2019, 2021, 2022); Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики — Atomfuture» (Обнинск, Россия, 2019, 2020, 2022); Международная

научно-практическая конференция «Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве» (Обнинск, Россия, 2020); Международная научно-практическая конференция «Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС» (Обнинск, Россия, 2021); Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии» (Обнинск, Россия, 2021); Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность – 2022» (Гомель, Беларусь, 2022); Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022» (Санкт-Петербург, Россия, 2022).

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК и/или реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science, Scopus, Russian Science Citation Index. По результатам методической работы оформлена инструкция выполнения измерений «Определение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» ФГБНУ ВНИИРАЭ.

Связь темы диссертации с плановой тематикой научно-исследовательских работ ФГБНУ ВНИИРАЭ. Исследования были составной частью работ по государственному заданию «Исследовать закономерности миграции радионуклидов (РН) и тяжелых металлов (ТМ) в агроландшафтах. Разработать научно-методологические и методические подходы для оценки последствий техногенного загрязнения агроландшафтов с использованием экспериментальных данных и баз данных по параметрам миграции РН и ТМ в разных почвенно-климатических зонах» в период 2019–2022 гг.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов, списка литературы из 180 наименований, в том числе 75 зарубежных. Материалы диссертации изложены на 163 страницах машинописного текста, включает 20 рисунков и 37 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Глава 1. Обзор литературы

В главе дан обзор источников и механизмов поступления плутония в окружающую среду. Статистически проанализирована и обобщена информация о величине глобальных выпадений $^{239+240}\text{Pu}$, которая составила $65,0 \text{ Бк/м}^2$ для северного полушария, $9,0 \text{ Бк/м}^2$ для экваториальной зоны и $10,0 \text{ Бк/м}^2$ для южного полушария.

Рассмотрено вертикальное распределение плутония в почве по глубине. Показано, что в большинстве случаев концентрация изотопов плутония уменьшается с увеличением глубины почвенного горизонта по экспоненциальному закону. При этом около 95 % плутония от его общего содержания в почве приходится на 20 сантиметровый слой.

Рассмотрены и обобщены количественные показатели накопления плутония растительностью. Проведен сравнительный анализ обобщенной информации по коэффициентам накопления (Кн) плутония растениями, объединенный в группы, согласно группированию в публикациях МАГАТЭ.

Литературный анализ свидетельствует, что значения Кн(Pu) растительностью весьма изменчивы и охватывают семь порядков величины от $2,0 \cdot 10^{-7}$ до $7,8 \cdot 10^{-1}$ для наземной части растений, от $3,8 \cdot 10^{-7}$ до $9,7 \cdot 10^{-1}$ для корневой системы, $1,1 \cdot 10^{-1}$ – $5,9 \cdot 10^{-1}$ для грибов и $1,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,7 \cdot 10^{-1}$ для мхов и лишайников. На основе имеющегося набора данных трудно определить степень зависимости Кн от вида растений. Отмечается существенная разница в распределении Pu по вегетативным органам. Литературные данные свидетельствуют, что накопление Pu растениями зависит от условий их выращивания, однако, обобщенные данные не позволяют выявить почвенно-климатические факторы, влияющие на его накопления растениями.

Глава 2. Материалы и методы исследования

Оценка уровня глобальных выпадений плутония в почвах территории Восточно-Европейской равнины проведена с использованием научной коллекции агрохимических стандартных образцов разных типов почв, собранной ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова». Для создания данной коллекции образцы почв отбирали в разных почвенно-климатических зонах постсоветского пространства в период с 1978 по 2018 гг.

Работы по исследованию содержания плутония в почвенном и растительном покрове зон влияния радиационно-опасных объектов

включали в себя выездные работы по отбору проб почвы и растений, а также лабораторные работы по определению содержания Рu в образцах.

При отборе образцов почво-грунтов использовали точечный отбор и метод конверта. Отбор проб растительности осуществляли в один день с отбором образцов почво-грунтов сопряженно. Вес отобранных образцов составлял приблизительно 2 кг свежей массы.

Исследование накопления плутония сельскохозяйственными культурами и факторов, влияющих на его накопление, проводили с использованием техники вегетационных опытов. Во время вегетационного периода осуществляли контроль температуры и влажности воздуха с помощью Регистратора Elitech GSP-6 с автоматической записью через каждый час. Вегетационный период составлял 31–127 дней, в зависимости от выращиваемой культуры.

Определение концентрации изотопов плутония в образцах почвы и растительности проводили методом альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением. Для сокращения времени разложения, увеличения навесок разлагаемых образцов, а также снижения перекрестного загрязнения проведена модификация методики выполнения измерений определения плутония в объектах окружающей среды: разработана конструкция автоклавов, позволяющая выполнять разложение почвы массой до 20 г; экспериментально подобраны кислоты и их количество для полного разложения образцов; с целью уменьшения объема реагентов предложено использование 72% HF; предложен метод фильтрации под давлением при помощи специальной шприцевой насадки, позволяющей минимизировать перекрестное загрязнение образцов.

Модифицированная методическая схема была верифицирована и оформлена в виде инструкции выполнения измерений «Определение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$, в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» ФГБНУ ВНИИРАЭ.

Предел обнаружения используемой методики зависит от ряда параметров (масса навески, время измерения, радиохимический выход, степень озоления). При анализе 10 г озоленного образца, суточных измерениях и радиохимическом выходе $> 50\%$ предел обнаружения составлял 0,08 Бк/кг для $^{239+240}\text{Pu}$ и 0,1 Бк/кг для ^{238}Pu .

Глава 3. Содержание плутония в почвах

Проведена экспериментальная оценка уровня глобальных выпадений изотопов плутония в почвах территории Восточно-

Европейской равнины. Установлено, что концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах, обусловленная глобальными выпадениями составляет $0,18 \pm 0,09$ Бк/кг, что соответствует 55 ± 26 Бк/м². Уровень глобальных выпадений плутония для территории Восточно-Европейской равнины является близким по значению к величине глобальных выпадений плутония для северного полушария, полученного в ходе литературного анализа в 65 Бк/м².

Получены общие закономерности содержания и распределения плутония в почвах зон влияния радиационно-опасных объектов (Билибинской и Белоярской АЭС, территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО) и территории, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате чернобыльских выпадений.

Определено, что содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах зон влияния АЭС составляют 0,58–34,0 Бк/кг для зоны влияния Билибинской АЭС, <0,1–2,9 Бк/кг для фоновых территорий зоны влияния Белоярской АЭС и <0,1–33 Бк/кг для территории Ольховской болотно-речной системы.

Концентрация плутония в почвах территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению чернобыльских выпадений, варьирует в пределах 1,8–141 Бк/кг $^{239+240}\text{Pu}$ и <0,82–55 Бк/кг ^{238}Pu для территории ПГРЗ и <0,1–0,47 Бк/кг $^{239+240}\text{Pu}$ для территории Калужской области. Отмечается нетипичное распределение концентраций плутония по глубине почвы для территории Калужской области.

Площадь загрязнения плутонием территории, прилегающей к границе бывшего хранилища РАО, г. Обнинск, ограничивается 50 м зоной к юго-западу от хранилища с диапазоном концентраций $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном 5 см слое почвы 3,7–9,6 Бк/кг, при среднем значении 6,7 Бк/кг. В обозначенной зоне наблюдаются значимые концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ до глубины 95 см. Хаотическое вертикальное распределение загрязнения указывает на его поступление с грунтовыми водами.

Глава 4. Закономерности накопления плутония растениями

Переход радионуклидов из почвы в растения является первым звеном пищевой цепочки, определяя степень их вовлечения в биотические компоненты экосистем, включая организм человека.

Установлено, что $K_n(\text{Pu})$ дикорастущей растительностью оцениваются в $<n \cdot 10^{-3}$ для наземной части разнотравья зон влияния АЭС; $1,9 \cdot 10^{-4}$ – $3,7 \cdot 10^{-5}$, при среднем значении $1,0 \cdot 10^{-4}$ для шишек сосны обыкновенной ПГРЗ; $2,1 \cdot 10^{-2}$ – $4,4 \cdot 10^{-2}$, при среднем значении $2,9 \cdot 10^{-2}$ для разнотравья (растение в целом) Калужской области.

Кн плутония травянистой растительностью территории, прилегающей к хранилищу РАО, составили $7,9 \cdot 10^{-4}$ – $1,5 \cdot 10^{-2}$, при среднем значении, равном $7,3 \cdot 10^{-3}$ для надземной части и $1,1 \cdot 10^{-2}$ – $2,7 \cdot 10^{-1}$, при среднем значении в $1,8 \cdot 10^{-2}$ для корневой системы.

Для листьев кустарников (смородина белая и лещина обыкновенная) Кн(Pu) варьирует от $4,4 \cdot 10^{-3}$ до $8,9 \cdot 10^{-2}$, при среднем значении в $2,9 \cdot 10^{-2}$. Стебли и ветви кустарников характеризуются Кн от $3,4 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-2}$ со средней величиной $6,9 \cdot 10^{-3}$. Накопление Pu корневой системой кустарников, характеризуется величиной Кн $n \cdot 10^{-2}$. Накопление плутония разными частями смородины белой можно ранжировать в следующий ряд: кисти с ягодами ($1,1 \cdot 10^{-1}$) > корневая система ($2,9 \cdot 10^{-2}$) > листья ($1,1 \cdot 10^{-2}$) > ветви ($6,5 \cdot 10^{-3}$).

Из исследованных видов древесной растительности высокие Кн плутония наблюдаются у ели обыкновенной. Максимальные Кн(Pu) отмечается в листьях и хвое в $6,8 \cdot 10^{-2}$ и $1,3 \cdot 10^{-2}$, соответственно. Вариативность Кн ветвями составляет 2 порядка и находится в пределах от $5,0 \cdot 10^{-4}$ до $2,8 \cdot 10^{-2}$. Исследование накопления плутония структурными элементами ствола ивы ломкой свидетельствует, что оно происходит преимущественно в коре дерева ($7,9 \cdot 10^{-3}$) и практически отсутствует в древесине ($< 1,5 \cdot 10^{-5}$).

Поскольку исследование количественных параметров накопления плутония сельскохозяйственными растениями, а также факторов, влияющих на его накопление, на рассмотренных территориях затруднено в силу его малых концентраций в почве, отдаленности территорий друг от друга, сложностью контроля изучаемых факторов влияния и др., работы по данному исследованию проведены в условиях вегетационных опытов.

Определено, что по величине накопления Pu бобами и ячменем (рисунок 1), типы почв можно ранжировать в следующий ряд: дерново-подзолистая супесчаная и серая лесная пылевато-суглинистая > болотная торфяная низинная >>> чернозем типичный тяжелосуглинистый. При этом максимальные и минимальные значения различаются более чем на порядок (в ~ 30 раз).

Установлено, что особенности накопления плутония в зависимости от увлажненности почв (в пределах 15–40 % абсолютной влажности дерново-подзолистой почвы) неодинаковы для отдельных видов/органов сельскохозяйственных растений.

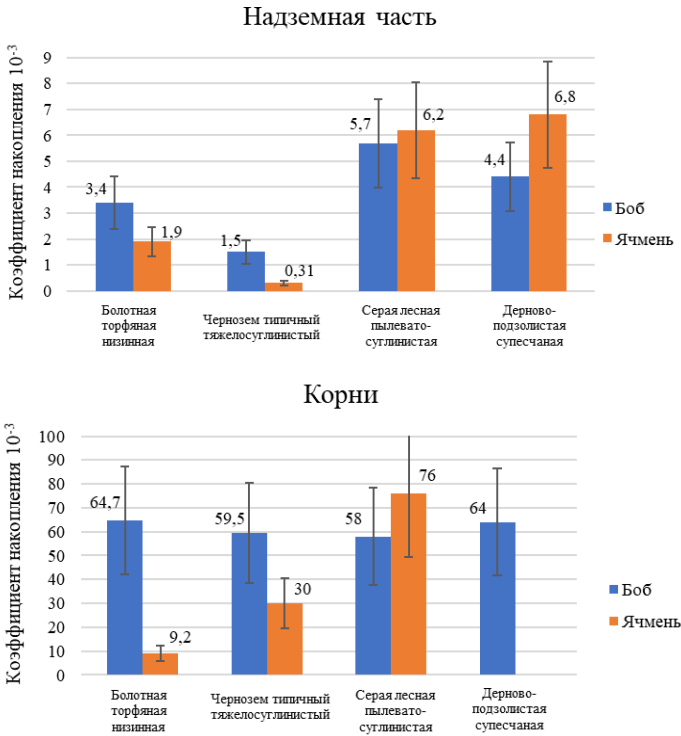


Рисунок 1 — Коэффициенты накопления плутония для ячменя сорта «Зазерский-85» и бобов сорта «Янтарные»

Для надземной части ячменя с увеличением влажности почвы наблюдается тенденция увеличения K_n плутония (рисунок 2).

Для надземной части бобов наблюдается обратная зависимость — снижение K_n до двух порядков величины с увеличением влажности почвы (рисунок 3). Максимальные и минимальные значения $K_n(Pu)$ отличаются в среднем в 45 раз. При этом в диапазоне влажности в 15–20 % наблюдается повышение значений K_n , с последующим резким падением в диапазоне влажности 20–30 %. При дальнейшем увеличении влажности почвы резких изменений в величине $K_n(Pu)$ не наблюдается.

Для пера и луковиц также наблюдается снижение K_n плутония по мере увеличения влажности почвы (рисунок 4).

Для корневой части рассматриваемых сельскохозяйственных культур зависимости $K_n(Pu)$ от влажности почв не наблюдается.

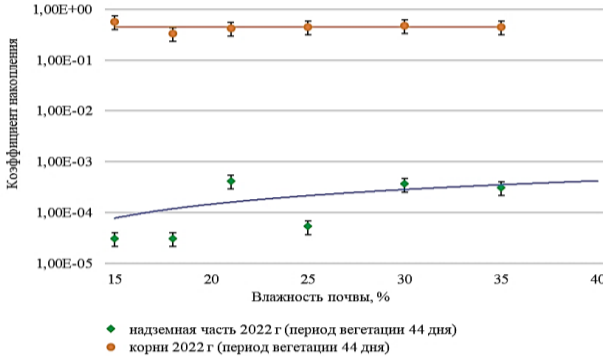


Рисунок 2 — Коэффициенты накопления плутония для ячменя, выращенного при разной влажности почвы (2022 г.)

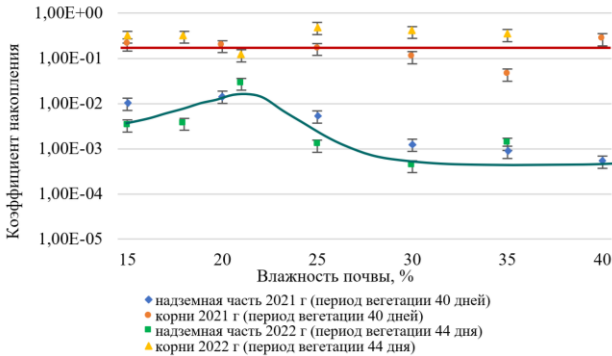


Рисунок 3 — Коэффициенты накопления плутония для бобов, выращенных при разной влажности почвы (2021–2022 гг.)

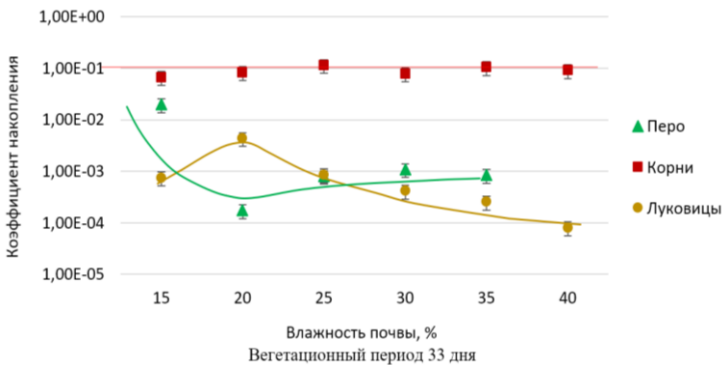


Рисунок 4 — Коэффициенты накопления плутония для лука, выращенного при разной влажности почвы (2021 г.)

Видовая вариативность K_n плутония сельскохозяйственными растениями составляет $3,2 \cdot 10^{-3} - 5,6 \cdot 10^{-3}$ для надземной части растений, $3,8 \cdot 10^{-2} - 8,8 \cdot 10^{-1}$ для корневой системы и $4,5 \cdot 10^{-3} - 4,3 \cdot 10^{-2}$ для растения в целом. Результаты исследования свидетельствуют о существенном отличии в накоплении Pu разными частями растений. При этом максимальное его накопление наблюдается в корнях.

Исследована вариабельность K_n плутония внутри одного сорта сельскохозяйственной культуры на примере бобов сорта «Янтарные», обусловленная индивидуальными особенностями растений (рисунок 5). Диапазон K_n (на все растение) по результатам вегетационного опыта составил $1,6 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-1}$ со средним значением $3,9 \cdot 10^{-2}$. Вариабельность K_n плутония составляет два порядка с разницей максимального и минимального значения в 75 раз.

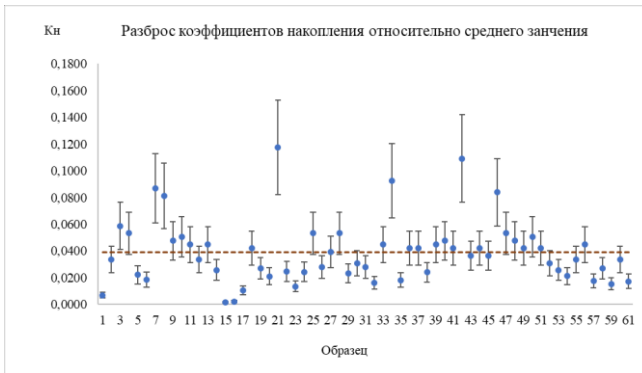


Рисунок 5 — Значения коэффициентов накопления плутония бобами сорта «Янтарные»

Глава 5. Сравнительный анализ количественных параметров накопления плутония растениями

С целью оценки результатов исследования проведен сравнительный анализ полученных коэффициентов накопления плутония с приведенными в литературных источниках (таблица 1).

Полученные в ходе настоящего исследования K_n плутония разнотравьем зон влияния Билибинской и Белоярской АЭС, а также территории, прилегающей к хранилищу РАО, находятся в диапазоне $n \cdot 10^{-4} - 10^{-2}$ для надземной части и $n \cdot 10^{-4} - n \cdot 10^{-2}$ для корневой системы, что соответствует значениям K_n , опубликованным в литературных источниках.

Таблица 1 — Коэффициенты накопления плутония дикорастущей растительностью, полученные в ходе настоящего исследования и анализа литературных данных

Группа растений	Часть растения	Коэффициент накопления плутония								
		Литературные данные					Полученные в ходе исследования			
		МАГАТЭ	30-км зона чернобыльских выпадений и ПГРЗ	СИП	Пойменные участки р. Енисей	След ядерного взрыва «Кратон-3»	Билибинская и Белоярская АЭС	ПГРЗ	Калужская область	Территория, прилегающая к хранилищу РАО
Деревья	хвоя	—	$3,2 \cdot 10^{-4}$	—	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	шишки	—	—	—	—	—	—	$3,7 \cdot 10^{-3} -$ $1,9 \cdot 10^{-4}$	—	—
	листья	—	—	—	—	$4,2 \cdot 10^{-2} -$ $4,5 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$6,8 \cdot 10^{-2}$
	кора	—	—	$1,8 \cdot 10^{-2} -$ $4,5 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	—	$7,9 \cdot 10^{-3}$
	древесина	—	—	$1,6 \cdot 10^{-2} -$ $1,6 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	—	$< 1,5 \cdot 10^{-5}$
Кустарники	ягоды	$6,4 \cdot 10^{-5} -$ $6,6 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-2} -$ $3,9 \cdot 10^{-2}$	—	$5,6 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	$1,1 \cdot 10^{-1} *$
	ветви	—	—	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	$3,4 \cdot 10^{-3} -$ $1,0 \cdot 10^{-2}$
	листья	—	—	—	$2,6 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	$4,4 \cdot 10^{-3} -$ $8,9 \cdot 10^{-2}$
	корни	—	$3,9 \cdot 10^{-3} -$ $1,7 \cdot 10^{-1}$	—	$2,7 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	$4,2 \cdot 10^{-3} -$ $3,0 \cdot 10^{-2}$
Разнотравье	надземная часть	$5,0 \cdot 10^{-5} -$ $3,9 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4} -$ $7,8 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$< n \cdot 10^{-3}$	—	—	$7,9 \cdot 10^{-4} -$ $1,5 \cdot 10^{-2}$
	корни	—	$1,1 \cdot 10^{-1} -$ $9,7 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	—	—	$1,1 \cdot 10^{-2} -$ $2,7 \cdot 10^{-1}$
	растение в целом	$1,4 \cdot 10^{-2} -$ $5,0 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	—	—	$2,1 \cdot 10^{-2} -$ $4,4 \cdot 10^{-2}$	—

* – анализ выполнен для кистей с ягодами

В ходе анализа литературных данных информации по накоплению плутония сосновыми шишками найдено не было. Однако, Кн(Pu) сосновыми шишками сопоставим с Кн плутония для хвои сосны с территории ПГРЗ, и меньше, чем для ствола сосны, произрастающей на территории следа наземного взрыва, проведенного на территории СИП.

Значение Кн плутония для кистей с ягодами смородины белой ($1,1 \cdot 10^{-1}$) территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО, соответствует значению верхней границы диапазона Кн(Pu) для ягод, представленного в публикациях МАГАТЭ ($6,6 \cdot 10^{-1}$) и на порядок ниже приведенных значений для территории 30-км зоны отчуждения Чернобыльской АЭС и пойменных участков р. Енисей.

Полученный в ходе настоящего исследования коэффициент накопления Pu хвоей ели обыкновенной территории, прилегающей к хранилищу РАО, в $1,3 \cdot 10^{-2}$, превышает опубликованные значения Кн плутония хвоей сосны территории 30-км зоны чернобыльских выпадений ($3,2 \cdot 10^{-4}$) и лиственницы ($5,2 \cdot 10^{-4}$), произрастающей на территории следа подземного ядерного взрыва «Кратон-3», на 2 порядка. Вероятно, это связано с разницей в поступлении Pu, обуславливающей его распределение по глубине почвы, а также химическими формами поступившего в окружающую среду Pu.

Один порядок величин фиксируется для листьев деревьев территории, прилегающей к хранилищу РАО и территории следа МЯВ «Кратон-3», который составляет $n \cdot 10^{-2}$.

Коэффициент накопления плутония для коры ивы ломкой в $7,9 \cdot 10^{-3}$, более чем на порядок ниже, чем Кн для коры сосны территории следа наземного ядерного взрыва на СИП, составляющий $1,8 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-1}$. Для древесины ивы ломкой Кн(Pu) существенно ниже ($< 1,5 \cdot 10^{-5}$), чем для древесины сосны территории СИП, которые оцениваются в $1,6 \cdot 10^{-2} - 1,6 \cdot 10^{-1}$.

Проведена оценка полученных в ходе настоящего исследования Кн плутония сельскохозяйственными культурами с представленными значениями Кн в специальных публикациях МАГАТЭ и опубликованных по результатам полевых опытов на территории СИП (таблица 2).

Полученные в ходе вегетационных опытов Кн для картофеля выше представленных в специальных публикациях МАГАТЭ, а также опубликованных по результатам экспериментальных работ на СИП.

Таблица 2 — Коэффициенты накопления плутония по результатам вегетационных опытов и опубликованным данным

Вид растения	Часть растения	Коэффициент накопления $^{239+240}\text{Pu}$		
		МАГАТЭ	СИП	Результат вегетационных опытов
картофель	клубни	$*8,4 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$
	листья	—	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
	стебли	—	$8,0 \cdot 10^{-3}$	
	корни	—	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$
томат	листья	—	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
	стебли	—	$1,7 \cdot 10^{-3}$	
	корни	—	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
лук	перо	—	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
	луковицы	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
	корни	—	—	$8,8 \cdot 10^{-1}$
ячмень	все растение	—	—	$**8,8 \cdot 10^{-3}$
бобы	надземная часть	$4,9 \cdot 10^{-4}$	—	$3,2 \cdot 10^{-3}$
	корни	—	—	$3,8 \cdot 10^{-2}$
	все растение	—	—	$**2,2 \cdot 10^{-2}$
редис	все растение	—	—	$4,3 \cdot 10^{-2}$
патиссон	все растение	—	—	$1,8 \cdot 10^{-2}$
* – Кн для корнеплодов				
** – Среднее арифметическое по результатам за 2020 и 2021 гг.				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное значение уровня глобальных выпадений $^{239+240}\text{Pu}$, является одним из ключевых параметров, позволяющих выявить и оценить территории загрязнения плутонием.

На всех исследованных территориях влияния радиационно-опасных объектов выявлены участки с повышенными концентрациями плутония в почве.

Представленные значения $\text{Кн}(\text{Pu})$ и характеристики его накопления разными частями растений существенно дополняют и расширяют имеющиеся данные мировых исследований и могут быть использованы в качестве параметров математических моделей для оценки концентраций плутония в сельскохозяйственной продукции, оценке возможности использования древесины деревьев, произрастающих на загрязненных территориях, а также для расчета его перорального поступления в организм животных и человека.

Выявленные зависимости накопления плутония сельскохозяйственными растениями от ряда факторов могут быть использованы для решения ряда практических задач, связанных с оценкой качества сельскохозяйственной продукции, полученной на загрязненных территориях, а также при выработке рекомендаций ведения сельского хозяйства на таких территориях.

ВЫВОДЫ

1. Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах территории Европейской части России и Восточной Европы, обусловленная глобальными выпадениями, составляет $0,18 \pm 0,09$ Бк/кг, что с учетом 95 % содержания плутония в 20 см слое почв и плотности почвы составит 55 ± 26 Бк/м².

2. Диапазон концентраций плутония в почвах зон влияния рассмотренных радиационно-опасных объектов (Билибинской и Белоярской АЭС и территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск) характеризуется значениями от фоновых величин до величин концентраций, достигающих $n \cdot 10^2$ Бк/кг.

3. Уровень концентраций изотопов плутония в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ближняя зона чернобыльских выпадений) достигает 141 Бк/кг для $^{239+240}\text{Pu}$ и 55 Бк/кг для ^{238}Pu . Диапазон значений концентраций плутония в почвах Калужской области (дальняя зона чернобыльских выпадений) составляет $<0,1-0,47$ Бк/кг, что обусловлено глобальными выпадениями.

4. Значения коэффициента накопления $^{239+240}\text{Pu}$ надземной частью разнотравья зон влияния атомных станций оцениваются в $<n \cdot 10^{-3}$. Коэффициент накопления плутония чернобыльского происхождения находится на уровне $n \cdot 10^{-4}$ для шишек сосны обыкновенной и $n \cdot 10^{-2}$ для разнотравья (растение в целом). Для территории, прилегающей к хранилищу радиоактивных отходов г. Обнинск, коэффициент накопления плутония варьирует в пределах $n \cdot 10^{-4}-n \cdot 10^{-2}$, $n \cdot 10^{-3}-n \cdot 10^{-1}$ и $<n \cdot 10^{-5}-n \cdot 10^{-2}$ для надземной части травянистой, кустарниковой и древесной растительности.

5. По величине коэффициента накопления плутония растениями типы почв можно ранжировать следующим образом: дерново-подзолистая супесчаная и серая лесная пылевато-суглинистая > болотная торфяная низинная >> чернозем типичный тяжелосуглинистый.

6. Накопление плутония в зависимости от увлажненности почв (в пределах 15–40 % абсолютной влажности дерново-подзолистой почвы) неодинаково для отдельных видов/органов сельскохозяйственных растений. Для надземной части бобов с увеличением влажности почвы наблюдается увеличение накопления плутония до экстремума при влажности почвы в 21 % с последующим его снижением на протяжении всего рассмотренного диапазона влажности почвы. Аналогично накопление плутония фиксируется для луковиц с экстремумом при влажности почвы в 20 %. Для пера лука наблюдается резкое падение накопления плутония с увеличением влажности почвы в диапазоне 15–20 %, с последующим увеличением влажности почвы величина коэффициента накопления не изменяется. Для надземной части ячменя с увеличением влажности почвы наблюдается тенденция увеличения коэффициента накопления.

7. В ходе специальных вегетационных опытов оценена вариативность накопления плутония сельскохозяйственными культурами, обусловленная видовыми различиями. Установлено, что накопление плутония неодинаково для разных частей рассматриваемых сельскохозяйственных культур. В целом накопление плутония надземной частью растений существенно ниже, чем корневой системой.

8. Вариабельность коэффициентов накопления плутония бобами сорта «Янтарные» составляет $1,6 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-1}$, с разницей максимального и минимального значения в 75 раз.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science, Scopus, Russian Science Citation Index:

1. Лукашенко С.Н. Плутоний в окружающей среде: источники, механизмы распространения, концентрации / С.Н. Лукашенко, М.А. Эдомская // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021. – Т. 61. – №. 4. – С. 394–424. DOI: 10.31857/S086980312104007X.

Lukashenko S.N. Plutonium in the Environment: Sources, Dissemination Mechanisms, and Concentrations / S.N. Lukashenko,

М.А. Edomsкая // *Biology Bulletin*. – 2022. – Vol. 49. – № 11. – P. 47–73. DOI: 10.1134/S1062359022110139.

2. Панов А.В. Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, А.В. Коржавин, И.В. Гешель, С.В. Коровин, **М.А. Эдомская** // *Радиационная гигиена*. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 86–101.

3. **Эдомская М.А.** Оценка содержания изотопов плутония в почве в районе размещения хранилища радиоактивных отходов в городе Обнинске / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик [и др.] // *Радиация и риск*. – 2022. – Том 31, № 4 – С. 73–81. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-4-73-81.

4. **Edomsкая М.А.** Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and Eastern Europe territory / **М.А. Edomsкая**, S.N. Lukashenko, G.A. Stupakova [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2022. – № 247. – P. 106865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106865>.

5. **Эдомская М.А.** Оценка содержания плутония и цезия-137 в почве и разнотравье Калужской области / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, Г.А. Ступакова [и др.] // *Плодородие*. – 2023. – №1. – С. 14–19. DOI: 10.25680/S19948603.2023.130.03.

6. **М.А. Эдомская.** Накопление плутония растительностью на разных почвах / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик, С.Г. Шаповалов // *Почвоведение*. – 2023. – № 7. – С. 864–871. DOI: 10.31857/S0032180X22601463, EDN: FQBMUB.

В научных сборниках и материалах конференций:

7. **Эдомская М.А.** Исследование уровня глобальных выпадений плутония на территории СНГ / **М.А. Эдомская**, Г.А. Ступакова, П.В. Харкин [и др.] // *Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве: сборник докладов*. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. – С. 147–149.

8. **Эдомская М.А.** Оценка содержания изотопов плутония в почвах Полесского радиационно-экологического заповедника / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, П.Ю. Волкова [и др.] // *Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС*. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. – С. 157–160.

9. **Эдомская М.А.** К вопросу о содержании изотопов плутония в почвах зон потенциального влияния радиационно-

опасных объектов / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.В. Панов [и др.] // III Международный научный форум «Ядерная наука и технологии»: Тезисы докладов. – Алматы: РГП ИЯФ, 2021. – С. 204–205.

10. Эдомская М.А. Исследование миграции плутония в системе «почва- сельскохозяйственное растение» / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик, С.В. Коровин // Радиобиология и экологическая безопасность – 2022: материалы международной научной конференции – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – С. 192–195.

11. Эдомская М.А. Факторы, влияющие на процесс миграции плутония в системе «почва-растение» / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик [и др.] // IV Международный научный форум «Ядерная наука и технологии». Тезисы докладов. – Алматы: РГП ИЯФ РК, 2022. – С. 221–222.

12. Эдомская М.А. Исследование содержания плутония в почвах территории, прилегающей к хранилищу радиоактивных отходов г. Обнинск / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, Н.О. Братухин [и др.] // X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022». Сборник тезисов. – Москва: Адмирал Принт, 2022. – С. 219.

13. Эдомская М.А. Исследование вариабельности коэффициента накопления плутония внутри одного сорта с/х культуры / **М.А. Эдомская**, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик [и др.] // X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022». Сборник тезисов. – Москва: Адмирал Принт, 2022. – С. 243.

Методическая работа:

14. Инструкция выполнения измерений «Определение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$, в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» / ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. – 17 с.

Эдомская Мария Александровна ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ В ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ЗОН ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
биологических наук.

Типография «_____»