

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ РАДИОЛОГИИ И АГРОЭКОЛОГИИ»

На правах рукописи



Эдомская Мария Александровна

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

Специальность: 1.5.1 — радиобиология

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук  
Лукашенко Сергей Николаевич

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	15
1.1. Источники плутония в окружающей среде.....	17
1.1.1. Поступление плутония вследствие проведения ядерных взрывов.....	18
1.1.2. Выбросы плутония в результате деятельности предприятий ядерно-топливного цикла .....	27
1.1.3. Плутоний, поступивший вследствие инцидентов с ядерными боеголовками, радиоизотопными источниками энергии .....	31
1.2. Плутоний в глобальных выпадениях.....	33
1.3. Вертикальное распределение плутония в почвах.....	37
1.4. Накопление плутония растениями.....	39
1.5. Факторы, влияющие на накопление плутония растительностью .....	47
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	50
2.1. Методы отбора почвенных и растительных образцов.....	50
2.2. Методика проведения вегетационных опытов .....	51
2.3. Модифицированная методика определения содержания плутония в образцах почвы, донных отложениях и растительности .....	53
2.4. Расчет и форма представления данных .....	58
2.5. Контроль качества измерений.....	59
ГЛАВА 3. СОДЕРЖАНИЕ ПЛУТОНИЯ В ПОЧВАХ.....	62
3.1. Оценка уровня глобальных выпадений плутония в почвах территории Восточно-Европейской равнины .....	62
3.2. 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 аварии на Чернобыльской АЭС.....	67
3.2.1. Содержание плутония в почвах зон влияния Билибинской и Белоярской атомных станций .....	67
3.2.1.1. Содержание плутония в почвах зоны влияния Билибинской атомной станции .....	68
3.2.1.2. Содержание плутония в почвах зоны влияния Белоярской атомной станции .....	71
3.2.2. Содержание плутония в почвах территорий, подвергшихся чернобыльским выпадениям. ....	77
3.2.2.1. Содержание плутония в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, Республика Беларусь (ближняя зона чернобыльских выпадений) .....	78
3.2.2.2. Содержание плутония в почвах Калужской области (дальняя зона чернобыльских выпадений) .....	81
3.2.3. Содержание плутония в почвах территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск.....	86

#### ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ РАСТЕНИЯМИ 93

4.1. Закономерности накопление плутония дикорастущей растительностью .	93
4.1.1. Накопление плутония разнотравьем в зоне влияния атомных станций .	93
4.1.2. Накопление плутония дикорастущей растительностью территории, подвергшейся загрязнению в результате чернобыльских выпадений.....	96
4.1.3. Накопление плутония дикорастущей растительностью территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск .....	98
4.2. Закономерности накопление плутония сельскохозяйственными растениями (вегетационные опыты) .....	109
4.2.1. Влияние типа почвы на накопление плутония сельскохозяйственными растениями .....	110
4.2.2. Влияние влажности почвы на накопление плутония растительностью	114

4.2.3. Вариативность накопления плутония сельскохозяйственными растениями, обусловленная видовыми различиями .....	123
4.2.4. Вариабельность коэффициента накопления плутония внутри одного сорта сельскохозяйственной культуры на примере бобов сорта «Янтарные» .	126
ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НАКОПЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ РАСТЕНИЯМИ .....	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	137
ВЫВОДЫ .....	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	141

## ВВЕДЕНИЕ

**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) [1], 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» [2].

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  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , и гораздо меньше внимания уделяется исследованию процессов накопления растениями изотопов 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 [3]. Радиотоксичность изотопов плутония существенно выше изотопов цезия и стронция. Так согласно [4]  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  относятся к группе А (изотопы с особо высокой радиотоксичностью),  $^{90}\text{Sr}$  — к группе Б (изотопы с высокой радиотоксичностью), а  $^{137}\text{Cs}$  — 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 [5, 6]. Более того, особое внимание к его изотопам обуславливается их большим периодом полураспада (тысячи и десятки тысяч лет) [7, 8].

Таким образом, вышеперечисленные факторы делают актуальным исследования 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 глобального выпадения плутония [9–33]. 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 [34–36]. Представленные параметры накопления плутония охватывают 7 порядков величин и рассчитаны на основе ограниченных источников данных. В своих работах эксперты МАГАТЭ отмечают [34], что приемлемое количество данных по накоплению радионуклидов растениями имелось только для нескольких из них, таких как цезий и стронций, в то время как для трансурановых элементов (Am, Pu) вводных данных было недостаточно для полноценной оценки поглощения изотопов плутония 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 растительностью [37, 38]. В литературе имеется ряд данных о зависимости поведения радионуклидов от разных 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 наземной 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».

**Теоретическое и практическое значение 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 Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, Калужской области, а также территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск и могут быть



использованы в качестве рекомендаций 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 плутония в организм животных и человека.

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

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Площадное загрязнение  $^{239+240}\text{Pu}$  почв территории Восточно-Европейской равнины, обусловленное глобальными выпадениями, составляет  $55 \pm 26$  Бк/м<sup>2</sup>, 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. Внутрисортовая 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 глобального выпадения 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 плутония 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.

Экспериментальное исследование 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.** В рамках работы 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», охватывающего вопросы изучения закономерностей поведения радиоактивных веществ в окружающей среде, последствий ядерных аварий и катастроф, чрезвычайных ситуаций, миграции радионуклидов, в том числе по сельскохозяйственным цепочкам, радиэкологические последствия радиоактивного загрязнения, в том числе в результате радиационных аварий.

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

**Личный вклад диссертанта в работу.** 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 работы и публикации.** Основные результаты исследования доложены и обсуждены на международных научных форумах, международных конференциях как в России, так и за рубежом: II International Scientific Forum «Nuclear science and technologies» 1<sup>st</sup> International Conference «Nuclear and Radiation Technologies in Medicine, Industry and Agriculture» (Алматы, Казахстан 2021); XV Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики — Atomfuture 2020» (Обнинск, Россия, 2019); XVI Международная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики — AtomFuture 2020» (Обнинск, Россия, 2020); 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); IV Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии» (Обнинск, Россия, 2021); III International Scientific Forum «Nuclear science and technologies» 2<sup>nd</sup> International Conference «Nuclear and Radiation Technologies in Medicine, Industry and Agriculture» (Алматы, Казахстан 2021); Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность — 2022» (Гомель, Республика Беларусь, 2022); X Российская конференция с международным участием «Радиохимия-2022» (Санкт-Петербург, Россия, 2022); XVIII Международная молодежная научно-

практическая конференция «Будущее атомной энергетики — AtomFuture 2022» (Обнинск, Россия, 2022); IV International Scientific Forum «Nuclear science and technologies» 3<sup>rd</sup> International Conference «Nuclear and Radiation Technologies in Medicine, Industry and Agriculture» (Алматы, Казахстан 2022).

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 6 статей, входящих в перечень ВАК, 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 наименования, в том числе 75 зарубежных. Материалы диссертации изложены на 163 страницах машинописного текста, включает 20 рисунков и 37 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.б.н. С. Н. Лукашенко за ценные советы, критический взгляд, всестороннюю помощь и поддержку на протяжении всего периода выполнения работы.

Автор приносит благодарность руководству ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» д.б.н. Е. И. Карпенко, д.б.н. Н. И. Санжаровой и к.б.н. О. А. Шубиной за поддержку и конструктивную критику. За помощь в выполнении работ по

исследованию и ценные рекомендации автор благодарит к.б.н. В. С. Анисимова, д.б.н. В. К. Кузнецова, к.б.н. П. Н. Цыгвинцева и всех сотрудников института.

Автор благодарит сотрудников ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова» за предоставление государственных агрохимических стандартных образцов почв для исследования. За совет и поддержку автор приносит благодарность к.б.н. Г. А. Ступаковой.

Автор благодарен В. Н. Глущенко, П. В. Харкину, Д. А. Желтову, Л. Д. Матиенко и другим сотрудникам РГП «Институт ядерной физики» РК за помощь в аналитических исследованиях при верификации методических подходов.

За помощь и рекомендации автор приносит благодарность к.б.н. старшему научному сотруднику МГУ имени М. В. Ломоносова Н. В. Кузьменковой.

Автор благодарит к.б.н. Е. В. Бондаренко и О. Э. Пронину за помощь и поддержку в организационных вопросах.

Особую благодарность автор выражает своей семье, их терпение и понимание помогли работе состояться.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Плутоний является радиоактивным элементом с атомным номером 94, относится к семейству актиноидов. Открыт в 1940–1941 гг. группой американских ученых, осуществляющих бомбардировки урана дейтронами. Позже Г. Сиборгом, Э. Макмилланом, Дж. Кеннеди и А. Валем был получен изотоп  $^{238}\text{Pu}$  при облучении урана ядрами тяжелого водорода — дейтронами и  $^{239}\text{Pu}$  в результате бета-распада ранее открытого  $^{239}\text{Np}$  [39, 40].

Плутоний не имеет стабильных изотопов. К настоящему времени известно о существовании 20 изотопов плутония с массами от 228 до 247 [41]. Наиболее распространенный вид радиоактивного распада является альфа-распад. Ядерно-физические характеристики основных изотопов плутония приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 — Ядерно-физические свойства основных изотопов плутония

Нуклид	Тип распада	$T_{1/2}$ , лет	Средняя энергия $\alpha$ -излучения и ядра отдачи МэВ/(Бк·с)	Примечание
$^{238}\text{Pu}$	СД, $\alpha$	$8,8 \cdot 10^1$	5,58	Используется в радиоизотопных источниках энергии
$^{239}\text{Pu}$	$\alpha$	$2,4 \cdot 10^4$	5,23	Основной изотоп, используемый при производстве ядерного вооружения и ядерного топлива.
$^{240}\text{Pu}$	СД, $\alpha$	$6,5 \cdot 10^3$	5,24	Является основной примесью в $^{239}\text{Pu}$ .
$^{241}\text{Pu}$	$\beta^-$	$1,4 \cdot 10^1$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	Обычно присутствует в только что выработанном оружейном плутонии. Является единственным основным $\beta$ -излучателем, однако он распадается с образованием более токсичного $^{241}\text{Am}$
$^{242}\text{Pu}$	СД, $\alpha$	$3,8 \cdot 10^5$	4,974	Используется в качестве трассера для радиохимического анализа.
СД – спонтанное деление				

Плутоний практически всегда представлен смесью его изотопов, радиоактивный распад которых может сопровождаться гамма- и рентгеновским излучением, нейтронами спонтанного деления  $^{240}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$ . Однако, биологическое действие изотопов плутония определяется, прежде всего, его альфа-излучением [42, 43].

Исследования биологического действия плутония показало, что при введении менее 4 кБк на кг массы тела наблюдаются острые, подострые и хронические поражения у собак. Острая форма лучевого поражения у мышей и кроликов развивалась при введении более 417 кБк/кг массы тела, а у крыс — более 740 кБк/кг. Гибель животных фиксировалась в первые 2–3 недели [5].

Плутоний может поступать в организм человека ингаляционным, пероральным и перкутаным путями [5, 6, 44–46]. Наиболее значимым путем поступления плутония является ингаляционный путь. При таком поступлении он способен оседать на поверхности бронхов и легких, отсюда частично попадать в кровоток, который разносит его по всему организму, включая лимфатические узлы, костную систему, печень и другие органы человека [6, 44]. Кроме того, ингаляционный путь поступления является наиболее опасным, поскольку вдыхание 20 мг плутония приводит к смерти от фиброза в течение месяца [3, 5].

Независимо от пути поступления в организм изотопов плутония основными органами его депонирования являются скелет и печень. В костной ткани накапливается более 50 % поступившего в организм плутония. Период полувыведения плутония из костной ткани человека оценивается в 50–100 лет. Воздействие альфа-излучения плутония на клетки костной ткани может привести к остеосаркоме – злокачественной опухоли. В печени накапливается до 30 % плутония, а его растворимых соединений до 80–90 %. Плутоний образует прочные соединения с гамма-глобулином. Выводится из печени крайне медленно, период полувыведения достигает 40 лет. Воздействие плутония на клетки печени приводит к серьезным нарушениям ее функций, вплоть до цирроза [5, 6].

Международная комиссия по радиологической защите установила максимальную величину ежегодного поглощения изотопов плутония в



280 нанограмм [42]. При этом клинические наблюдения за дозовыми нагрузками от плутония на персонал в производственных условиях показали, что минимальная пневмосклеротическая доза составляет 0,8–1,3 Зв. Дозы, не вызывающие опухоль, фиксировались на уровне менее 0,4 Зв [5].

### 1.1. Источники плутония в окружающей среде

Плутоний природного происхождения, образующийся в результате различных процессов, присутствует в окружающей среде в пределах следовых концентрациях. Одним из источников плутония природного происхождения является образование путем нуклеосинтеза в сверхновых звездах  $^{244}\text{Pu}$ . По некоторым оценкам выпадения  $^{244}\text{Pu}$  такого происхождения на земную поверхность составляет  $\sim 3 \cdot 10^4$  атомов/см<sup>2</sup> в период 1–14 миллионов лет назад, а его содержание в земной коре оценивается в  $3 \cdot 10^{-25}$  грамм на грамм земной коры [47]. Вторым источником природного плутония является непрерывно происходящая реакция  $\beta$ -распада  $^{239}\text{Np}$ , который образовывается при взаимодействии  $^{238}\text{U}$  с нейтронами (например, космического излучения) [42]. Принимая среднее содержание  $^{238}\text{U}$  в земной коре в  $2,7 \cdot 10^{-3}$  г/кг, грубая оценка даст среднюю концентрацию  $^{239}\text{Pu}$   $2 \cdot 10^{-14}$  г/кг или около  $5 \cdot 10^{-5}$  Бк/кг [47]. Следует учитывать, что значение общего количества  $^{239}\text{Pu}$  в земной коре весьма приблизительно.

Поступление антропогенного плутония связано с испытанием ядерного оружия; проведением подземных ядерных взрывов в мирных целях; аварийными сбросами и выбросами от ядерных установок; авариями транспортных средств, перевозящих ядерные материалы, включая космические аппараты; выбросами и сбросами предприятий по переработке и захоронению, утечками с мест захоронения ядерных материалов (особенно созданных в раннюю ядерную эру).

Основным источником, изменившим уровень фоновых значений концентрации плутония в объектах окружающей среды Земли, являются глобальные выпадения вследствие ядерных испытаний. Вместе с тем основная часть радионуклидов выпадает в том полушарии, в котором произведен ядерный

взрыв, тем самым формируя широтную зависимость. Наибольшая интенсивность глобальных выпадений приходится на широты 50—60°. Таким образом, наблюдается некоторая пространственная неоднородность глобальных выпадений, обусловлена размерами плутоний содержащими частиц и метеорологическими факторами, влияющими на их выпадение.

Другие источники техногенного поступления плутония формируют относительно локальные области загрязнения. Дальнейшее распространение изотопов плутония в объектах окружающей среды, включая его вовлечение в пищевые цепочки, во многом зависит от природы самих сбросов и выбросов, а также свойств экосистем, в которые они поступают.

### **1.1.1. Поступление плутония вследствие проведения ядерных взрывов**

Во всем мире проведено свыше 2400 испытаний ядерного оружия. В целом поступление изотопов плутония вследствие испытаний ядерного оружия происходило благодаря атмосферным взрывам, которые привели как к глобальному, так и к локальному загрязнению. Проведение подземных взрывов, как при испытании атомного оружия, так и в мирных целях, привели к локальному подземному или поверхностному, в случае выброса грунта на поверхность, загрязнению. Атмосферные ядерные взрывы разной мощности, проведенные во многих частях Земли, являются крупнейшим источником глобального поступления плутония в окружающую среду.

Атмосферные ядерные испытания проводили пять основных держав: Соединенные Штаты Америки (США), Россия, Франция, Великобритания и Китай. Общее количество атмосферных испытаний, проведенное этими пятью странами, составило 502. Наибольшее количество испытаний проведено бывшим Советским Союзом — 219 взрывов и Соединенными штатами — 210 атмосферных испытаний. Общее количество ядерных испытаний, проведенных США составило 1054, бывшим Советским союзом — 969, Францией — 210, Великобританией — 57,

Китаем — 44, Индией — 6, Пакистаном — 6, Северной Кореей — 6 (включая испытание 2017 г.).

### **Испытания, проведенные Соединенными Штатами Америки**

Впервые поступление искусственного плутония в атмосферу произошло в июле 1945 года близ Аламогордо в Нью-Мексико при детонации первой плутониевой бомбы с содержанием плутония ~6 кг, испытание получило название Тринити [47].

*Невадский испытательный полигон.* В 1950–1960 гг. на территории полигона в Неваде, площадью порядка 3500 км<sup>2</sup>, было проведено 928 ядерных взрывов, что привело к загрязнению почвы радионуклидами и плутонием свыше 1,5 Бк/г на большой площади. Основная часть активности приходится на верхние слои почвы. Оценочное содержание плутония, поступившего в результате ядерных испытаний, на поверхность и в недра полигона составляет 1500 ТБк (2,3 кг) для <sup>238</sup>Pu, 5900 ТБк (2600 кг) для <sup>239</sup>Pu, 1600 ТБк (180 кг) для <sup>240</sup>Pu, 22 000 ТБк (5,7 кг) для <sup>241</sup>Pu и 0,6 ТБк (4,1 кг) для <sup>242</sup>Pu.

Распределение изотопов плутония в почвах по территории полигона крайне неоднородно и зависит от типа проведенного ядерного взрыва. Наибольшее количество плутония фиксируется на площадке 13 площадью в 400 га, содержащую около 33 % от общего количества поступившего на территорию полигона плутония. Среднее содержание <sup>239+240</sup>Pu оценивается в  $5,6 \cdot 10^3$  Бк/кг. Максимальные уровни концентраций плутония в почвах фиксируются на площадке 11, где концентрация <sup>239+240</sup>Pu достигает  $3 \cdot 10^6$  Бк/кг. При этом 75 % общего количества радионуклидов на площадке 11 рассеяны в виде частиц в сорокамикронных фракциях или частично связаны с частицами глины [48].

*Маршалловы Острова.* В период с 1946 по 1958 гг. на территории Маршалловых Островов было проведено 66 ядерных испытаний, в результате которых острова Бикини и Эневетак стали одними из нескольких объектов мира с, наиболее высокими уровнями загрязнения плутонием. Концентрации плутония в окружающей среде значительно варьировались по всему архипелагу, при этом

концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах охватывали диапазон до пяти порядков: от фоновых уровней примерно в 0,04 Бк/кг на острове Таонги до 4140 Бк/кг на острове Эневетак [49].

### **Испытания, проведенные Великобританией**

Двенадцать атмосферных ядерных испытаний были проведены Великобританией в период 1952–1963 гг. в Австралии на Монтебелло, на Эму Филд и полигоне Маралинга. Кроме того на полигоне Маралинга было осуществлено несколько сотен подкритических ядерных испытаний и испытаний в целях изучения безопасности. Семь испытаний были проведены Великобританией в Республике Кирибати [47].

На полигоне Маралинга приблизительно 22 кг плутония и такое же количество обогащенного урана было рассеяно в ходе испытаний, проведенных в период с 1961 по 1963 г. Испытания проводились для изучения характеристик взрывов при случайной детонации. Вследствие чего, рассредоточение радиоактивного загрязнения происходило не за счет ядерного взрыва, а за счет горения и осколочно-фугасной детонации. В результате высвобождалась большая энергия в виде вертикальной струи, выстреливавшей вверх и поднимавшей загрязненные плутонием обломки на высоту более 750 м. Большая часть выброшенного плутония выпала в форме очень мелких частиц. Наибольшие концентрации плутония-239 на территории полигон наблюдаются в 10 см слое почвы и составляют от 1 до 2600 Бк/кг [50]. Повышенные концентрации  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  в почвах, значение которых достигают 310 и 52 Бк/кг, соответственно, фиксируются и на острове Монтебелло. В целом концентрация изотопов плутония в почве на всей территории Австралии оцениваются в  $n \cdot 10^{-1}$  Бк/кг. [51].

### **Испытания, проведенные Францией.**

45 атмосферных ядерных испытаний были проведены Францией, включая 4 испытания в Алжире, 37 в Муруроа, 4 на территории Фангатауфе, Французская

Полинезия в Тихом океане. Франция и Китай продолжали атмосферные испытания до 1974 г. и 1980 г. соответственно [47].

**Полигон в Алжире.** В 1960–1966 гг. Францией было осуществлено 4 атмосферных и 30 подземных ядерных испытаний. Кроме того, в Реганском оазисе было выполнено 35 экспериментов с плутониевыми гранулами, с использованием порядка 20 г плутония на эксперимент, а также 5 экспериментальных работ по диспергированию плутония с использованием 20–200 г плутония в каждом эксперименте. По результатам исследований МАГАТЭ, проведенных в 1999 г., установлено, что общее загрязнение территории плутонием незначительно. Исключением является территория, которая была подвержена загрязнению вследствие испытания Берил в 1962 г. Суммарная остаточная активность после данного испытания оценивается в 1–2 ТБк  $^{239+240}\text{Pu}$ . В целом для территории Алжира диапазоны концентраций плутония составляют 0,012–0,013 Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$  и 0,24–0,61 Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$  [52].

**Французская Полинезия.** В период с 1966 по 1996 гг. Францией проведено 178 ядерных испытаний на островах Муруроа и Фангатауфа, Французской Полинезии, включая атмосферные испытания в количестве 41 взрыва и подземные испытания в количестве 137 взрывов. Помимо исследования ядерного оружия на территории Французской Полинезии были проведены 15 испытаний по исследованию безопасности. При этом для имитации аварийных ситуаций ядерные устройства взрывались при помощи обычных взрывчатых веществ. При данных испытаниях было диспергировано около 3,5 кг  $^{239}\text{Pu}$  [47, 53]. Полномасштабного исследования Французской Полинезии не проводилось, однако на исследованных участках территории концентрации  $^{238}\text{Pu}$  находятся в диапазоне 0,6–26 Бк/кг, а  $^{239+240}\text{Pu}$  — 19–500 Бк/кг [54].

### **Испытания, проведенные Китаем**

**Полигон Лобнор.** В Китае на территории испытательной полигоне Лобнор с 1964 по 1996 гг. было проведено 45 атмосферных и подземных взрывов. Первое испытание проведено в 1967 году. Атмосферные испытания ядерного оружия были

прекращены в 1980 г, после чего было проведено 20 подземных испытаний. Информации о выбросах плутония и загрязнении его изотопами территории полигона в открытой печати нет. Выпадения в районе Цзюцюань, расположенном с подветренной стороны полигона Лобнор, оцениваются как неоднородные и характеризуются концентрациями  $^{239+240}\text{Pu}$  в 13–546 Бк/м<sup>2</sup> [47].

### **Испытания, проведенные СССР**

Бывший Советский Союз проводил испытания ядерного оружия в атмосфере в основном на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП), расположенного в Казахстане, на территории которого проведено 116 атмосферных испытаний. Кроме Семипалатинского полигона атмосферные испытания в количестве 91 взрыва проведено на полигоне Новая Земля, 10 на территории Капустин Яр и на территории Тозка.

#### ***Семипалатинский испытательный полигон, Республика Казахстан.***

Семипалатинский испытательный полигон являлся одним из основных, использовавшихся для испытаний ядерного оружия, полигоном в СССР. В период с 1949 по 1989 гг. на территории СИП проведено 456 ядерных испытаний, что составило 64 % от всех испытаний, проведенных бывшим Советским Союзом. В настоящее время Семипалатинский испытательный полигон наиболее полно изучен с точки зрения радиозоологической оценки последствий проведенных ядерных испытаний [55, 56].

*Проведение атмосферных испытаний.* Первой испытательной площадкой, предназначенной для проведения атмосферных ядерных испытаний, была площадка «Опытное поле». Территория площадки представляет собой равнину 20 км в диаметре и площадью около 300 км<sup>2</sup>. На площадке «Опытное поле» в период с 1949 по 1962 гг. было проведено 116 испытаний ядерного оружия, включая 86 воздушных и 30 наземных. Непосредственно на территории площадки отсутствуют выпадения радиоактивных элементов, от проведенных воздушных испытаний, практически все образовавшиеся радиоактивные вещества поступили

в верхние слои атмосферы, что привело к выпадению их на поверхность всей Земли.

Площадка «Опытное поле» включала в себя технические площадки — П-1, П-3, П-5, на которых и проводились наземные испытания. Три наиболее мощных наземных испытания были проведены на площадке П-1. В местах их проведения находятся воронки с навалами грунта и фрагментами оплавленной почвы, которые содержат продукты проведенных ядерных взрывов. На площадках П-2, П-7, П-2М в основном были проведены гидроядерные и гидродинамические эксперименты. При проведении данных экспериментов отсутствовало значимое ядерное энерговыделение, что в свою очередь привело к образованию сравнительно небольшого количества «продуктов деления», однако, обнаруживаются высокие концентрации делящихся материалов, включая плутоний.

В период с 2012 по 2016 гг. Институтом радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан выполнены масштабные исследования, которые позволили оценить радиоэкологическую ситуацию на всей территории «Опытного поля» с разрешением 20 м. В результате исследований установлено, что радиоактивное загрязнение территории площадки неоднородно и приурочено к местам непосредственного проведения ядерных испытаний, а именно эпицентрам, эпицентральной зоне и к следам радиоактивных выпадений.

В зависимости от содержания плутония в объектах окружающей среды все участки проведения испытаний можно условно разделить на две основные группы:

1. места наземных ядерных экспериментов с высокой степенью энерговыделения и интенсивным нейтронным потоком. Почва таких территорий характеризуется как высокими значениями концентраций продуктов деления, так и изотопов плутония, концентрация которых в эпицентрах достигает  $n \cdot 10^4$  Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ . При этом территория загрязнения плутонием не превышает 2 км<sup>2</sup>;

2. места ядерных испытаний, характеризующиеся малым, вплоть до полного отсутствия, ядерным энерговыделением, что приводит к малым расстояниям разлета образующихся радиоактивных частиц. Почва таких

территорий характеризуется значениями концентраций до  $n \cdot 10^7$  Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ . На участках с максимальным загрязнением выполнено изъятие грунта или рекультивация. На сегодняшний день концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в почве не превышает  $n \cdot 10^4$  Бк/кг. При этом территория загрязнения плутонием с высоким содержанием оценивается в  $n \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>.

За пределами испытательных площадок загрязнение территории формировалось при выпадении радиоактивных элементов из образовавшихся после взрывов радиоактивных облаков. Последующие исследования установили, что следы от атмосферных ядерных испытаний наблюдаются от границ «Опытного поля» до границ полигона. Длина следов с шириной около 15 км составляет свыше 100 км. Максимальные концентрации плутония в почвах на следах радиоактивных выпадений обнаружены в 40 км от эпицентра взрывов, проведенных на площадке П-1, и оцениваются в 100 Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ . На границе СИП концентрация плутония в почве на следах снижается до  $n \cdot 10^0$  Бк/кг.

*Проведение подземных испытаний.* Подземные ядерные испытания на территории СИП проводились на трех площадках. На площадках «Сары-Узень» и «Балапан» были осуществлены ядерные взрывы в скважинах, а на площадке «Дегелен» — в штольнях. При этом при большинстве проведенных подземных испытаний не было выбросов изотопов плутония, за исключением взрывов, сопровождающихся аварийными ситуациями.

На территории испытательных площадок «Сары-Узень» и «Балапан», незагрязненных локальными радиоактивными выпадениями, средняя концентрация плутония оценивается в  $n \cdot 10^0$  Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ . Площадь радиоактивного загрязнения вследствие аварийных ситуаций на приустьевых площадках оценивается  $n \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>. Максимальные концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в почве достигают  $n \cdot 10^5$  Бк/кг.

Большая часть территории площадки «Дегелен» не имеет радиоактивного загрязнения, поскольку более 90 % радиоактивности сосредоточено в полостях штолен. Наиболее загрязненными радионуклидами территории площадки «Дегелен» являются припортальные площадки штолен с водотоками. Многолетние



мониторинговые исследования показывают, что вынос радионуклидов водным путем из полостей ядерных взрывов продолжается и в настоящее время [57].

Максимальные концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в воде водотоков штолен достигали 6,4 Бк/л (шт. 503). Радиоактивное загрязнение сосредоточено в донных отложениях русел ручьев, имеющих в поперечнике размеры не более 10 м. Максимальные значения  $^{239+240}\text{Pu}$  наблюдаются вблизи порталов штолен, около выхода водотоков на поверхность и достигают  $n \cdot 10^4$  Бк/кг. При этом отмечается резкое снижение концентрации плутония по мере удаления от порталов штолен.

*Испытания боевых радиоактивных веществ.* В 1953–1957 годах на территории СИП проведены исследования по испытанию боевых радиоактивных веществ (БРВ), представляющих жидкие или порошкообразные радиоактивные рецептуры. Данные испытания проводились на площадках «4» и «4а», расположенных северо-западнее площадки «Опытное поле». Рассеяние БРВ проводили посредством подрыва отдельных снарядов, бомбардировки минометными снарядами, сброса бомб или распыления боевых радиоактивных веществ с самолета. В качестве основного БРВ использовался  $^{90}\text{Sr}$ . Однако в испытаниях использовались другие радионуклиды, включая плутоний, хотя и в гораздо меньшем количестве. Площади участков загрязнения плутонием, обусловленные испытаниями БРВ, оцениваются в  $n \cdot 10^2$ – $n \cdot 10^5$  м<sup>2</sup> с концентрацией  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах на уровне  $n \cdot 10^3$ – $n \cdot 10^4$  Бк/кг.

*Новоземельский ядерный полигон. Россия.* В 1954–1990 гг. на территории «Новая Земля» было произведено 136 ядерных взрывов, включая 91 испытание в атмосфере, 39 на земле, 6 под водой. Несмотря на недостаток информации по загрязнению изотопами плутония, загрязнение продуктами деления локализовано на трех основных площадках, а именно Черная губа, Маточкин Шар и Сухой Нос, на котором проводилось испытание «Царь-бомбы» в 1961 г. Загрязнение донных отложений Черной Губы неоднородно и достигает 8,5 кБк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$  [47].

### **Проведение мирных ядерных взрывов**

В 1965–1988 гг. в рамках реализации государственной программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства» СССР произведено 124 подземных мирных ядерных взрывов (МЯВ), 117 из которых за пределами испытательных полигонов [58]. При проведении МЯВ было несколько взрывов с возникновением аварийных ситуаций. Например, на объектах «Кристалл» и «Кратон-3», расположенных в Якутии. На объекте «Кратон-3» фиксируется крайне неравномерное загрязнение территории в радиусе до 150 м от объекта с концентрациями  $^{239+240}\text{Pu}$  от 6,2 Бк/кг до 5900 Бк/кг в поверхностных слоях почвы (0–5 см) [59].

На территории СИП в 1965–1968 гг. было осуществлено четыре экспериментальных мирных ядерных взрывов с выбросом грунта с целью отработки создания искусственных каналов и водохранилищ. Основная часть радионуклидов, образовавшихся в результате данных испытаний, сосредоточена в зонах навалов грунта. Радиоактивное загрязнение территорий ограничено 200 м для «Телькем-1» и «Телькем-2», 5 км для «Атомного озера». Максимальная концентрация в зоне навала составляет  $n \cdot 10^4$  Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ .

### **Военное использование ядерных взрывов**

Единственным случаем использования ядерного оружия в военном конфликте был взрыв бомб в 1945 году на территории Хиросимы и Нагасаки. На территории Хиросимы не было обнаружено следов оружейного плутония. В качестве делящегося материала использовался обогащенный уран. В результате взрыва бомбы в Нагасаки около 1,2 кг плутония подверглись делению, еще 14 кг плутония было выброшено в окружающую среду, при этом около 37,5 г выпало непосредственно на территории Нагасаки. Результаты исследований содержания плутония в почвах показали, что содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах Нисиямы и Нагасаки достигает 73 Бк/кг при среднем значении в 46 Бк/кг. [60–62].

Восемь войсковых учений провели США на полигоне в Неваде под кодовым названием «Дезерт Рок», при которых в районе проведения ядерного взрыва проводили учения десантных войск [63].

В 1954 г. СССР осуществил общевойсковое корпусное учение на Тоцком полигоне в Оренбургской области с применением атомной бомбы. Данные по составу самой бомбы, как и радиозэкологической обстановке территории в открытой печати отсутствуют [64].

### **1.1.2. Выбросы плутония в результате деятельности предприятий ядерно-топливного цикла**

#### **Аварийные выбросы плутония**

С 1951 по 1957 год на атомном комплексе «Селлафилд», расположенном на побережье Ирландского моря, графства Камбрия, Великобритания, работали два урановых реактора с воздушным охлаждением и графитовым замедлителем (блоки 1 и 2). Реакторы производили плутоний для британской оружейной программы. В октябре 1975 года вследствие пожара на блоке 1 произошла крупнейшая авария атомной промышленности Англии. В результате в атмосферу были выброшены летучие вещества, продукты деления и активации, а также 0,02 ТБк (8,7 г)  $^{239}\text{Pu}$ . Загрязнение характеризовалось как неоднородное и фиксировалось на расстоянии до 4 км [47, 65].

Самая серьезная авария в истории атомной энергетики, которая привела к масштабному выбросу радиоактивности произошла в 1986 г. на Чернобыльской атомной станции (ЧАЭС). Авария привела к выбросу приблизительно 20 ТБк  $^{238}\text{Pu}$ , 15 ТБк  $^{239}\text{Pu}$ , 23 ТБк  $^{240}\text{Pu}$ , 3000 ТБк  $^{241}\text{Pu}$  и 0,04 ТБк  $^{242}\text{Pu}$  [47].

Высокое загрязнение территории изотопами плутония практически ограничилось зоной отчуждения в 30 км [66]. Максимальная концентрация плутония в почве близлежащей территории до 1 км от ЧАЭС оценивается в 1100 Бк/кг [27, 67]. Концентрация плутония на более отдаленных участках резко снижается. Например, для ближних чернобыльских выпадений на расстоянии 4 км

от площадки Чернобыльской АЭС в почвах села Копачи удельная активность изотопов плутония составляет 6 Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$ , 12 Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$  и 14 Бк/кг для  $^{241}\text{Pu}$ . При этом основное его содержание фиксируется до глубины 1 см [67]. Концентрация плутония в почвах дальних чернобыльских выпадениях в районе города Новозыбков Брянской области оценивается в 5 Бк/кг [68].

11 марта 2011 года недалеко от Хонсю, Япония, произошло землетрясение магнитудой 9,0. Землетрясение и последовавшее за ним цунами, привели к крупнейшей аварии в атомной энергетике со времен чернобыльской аварии. По оценке в результате аварии в окружающую среду поступило 2,9–6,9 ГБк  $^{238}\text{Pu}$ , 1–14 ГБк  $^{239+240}\text{Pu}$  и 1,1–2,6 ГБк  $^{241}\text{Pu}$  [47, 69]. Однако, концентрации плутония в почве прилегающих территорий в среднем оцениваются в 0,065 Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$  и 1,1 Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$ , что сопоставимо с фоновыми значениями данных радионуклидов [70].

### **Выбросы и сбросы плутония предприятий топливного энергетического комплекса**

С момента запуска комплекса «Селлафилд» в 1951 году производились сбросы радиоактивных стоков, включая плутоний, по трубопроводам в Ирландское море. Пик выбросов приходился на 1970–1980 гг. Общий объем плутония, поступившего с 1970 по 1980 год со сбросами в Ирландское море оценивается в 120 ТБк (0,2 кг)  $^{238}\text{Pu}$ , 620 ТБк (270 кг)  $^{239}\text{Pu}$  и 22 000 ТБк (5,7 кг)  $^{241}\text{Pu}$ . Общий объем сбросов плутония за период работы площадки оценивается в 720 ТБк.

Ежегодные атмосферные выбросы площадки были задокументированы и составили за период с 1952 по 1992 год: 3,6 ТБк (1,6 кг) для  $^{239}\text{Pu}$  и 23 ТБк (6 г) для  $^{241}\text{Pu}$  на высоту 80 м над земной поверхностью и 0,076 ТБк (30 г)  $^{239}\text{Pu}$  и 1,1 ТБк (0,3 г)  $^{241}\text{Pu}$  на высоту 10 м. Суммарные выбросы в атмосферу более чем на 2 порядка меньше, чем поступившие сбросы в Ирландское море. Масштабы загрязнения, вследствие описанных выбросов и сбросов сложно оценить. Исследования содержания плутония в почвах зоны влияния площадки показывают,

что концентрация  $^{238}\text{Pu}$  находится в диапазоне от 0,9 до 1980 Бк/кг, а  $^{239+240}\text{Pu}$  — 0,6–8860 Бк/кг [71–74].

Заводом по переработке ядерного топлива в Ла-Хаг на Полуострове Котантен, Франция до 1985-ого года было сброшено около 3 ТБк плутония в Английский канал. В 1990-х годах объем сбросов существенно снизился. В 2007 году Areva SA (французская многонациональная объединение, специализирующаяся на ядерной энергетике) сообщила о сбросе жидких стоков, содержащих 0,02 ТБк альфа-излучающих радионуклидов [47].

В 1961–2000 гг. сбросы в реку Рона завода по переработке ядерного топлива в Маркуле, Франция составляли 92 ГБк для  $^{239+240}\text{Pu}$  и 443 ГБк для  $^{238}\text{Pu}$ . Анализ взвешенных частиц реки Рона, проведенный в 1998 году, показал присутствие в них  $^{239+240}\text{Pu}$  в количестве 0,15 Бк/кг и  $^{238}\text{Pu}$  в количестве 0,48 Бк/кг [75].

Суммарный сброс изотопов плутония Токайского комплекса по переработке отработавшего ядерного топлива, Япония в 1977–2007 гг. со сбросами низкорadioактивных отходов в Тихий океан, составил приблизительно  $4 \cdot 10^8$  Бк.

На территории Комбината Рокки Флэтс, США с 1958 по 1968 год происходили утечки отработанного масла, содержащего изотопы плутония. Порядка 0,2 ТБк попало в почву в результате данных утечек. Концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в верхнем слое почв (0–20 см) загрязненных территорий находится в диапазоне от 2220 до 11460 Бк/кг, при среднем значении 7250 Бк/кг [76].

На территории Комплекса Хэнфорда размещено большое количество радиоактивных отходов, содержащих порядка 8000 ТБк плутония, в специальных емкостях, часть из которых утратило свою герметичность. В результате подтекания в окружающую среду поступило около 400 ТБк  $^{239}\text{Pu}$  в виде жидких отходов. Однако точных данных по содержанию плутония на загрязненной территории в открытых источниках не обнаружено.

На ранних этапах работы Лос-Аламосской лабораторией, США в каньон Мортандад были сброшены  $^{239+240}\text{Pu}$  около 0,01 ТБк (3 г) и  $^{238}\text{Pu}$  приблизительно 0,004 ТБк (6 мг). В 1990-х гг. был значительно ужесточен контроль сбросов радиоактивных отходов в каньон Мортандад. Концентрация плутония на

территории каньона оценивается в 1,5–460 мБк/л в водных объектах и в 0,04–2,2 Бк/кг в донных отложениях [77]. Радиозэкологическое состояние территорий размещения отходов Лос-Аламосской национальной лаборатории, как и состав самих отходов, не охарактеризованы полностью. Оценочное общее количество плутония по массе превышает 43 кг.

Национальной лабораторией Саванна Ривер, США в 1954–1989 гг. было выброшено в атмосферу около 0,14 ТБк и сброшено в поверхностные воды порядка 0,023 ТБк плутония. Концентрация в донных отложениях  $^{238}\text{Pu}$  оценивается в 2,6–14000 мБк/кг,  $^{239+240}\text{Pu}$  — в 0,01–52 Бк/кг [78].

На территории Комплекса по обращению с радиоактивными отходами Национальной лаборатории Айдахо США захоронено 21 ТБк (0,03 кг)  $^{238}\text{Pu}$  и 780 ТБк (340 кг)  $^{239}\text{Pu}$ . При анализе почвы территории, прилегающей к захоронению, установлено загрязнение трансурановыми элементами, максимальные значения концентраций в поверхностных слоях почвы (0–4 см) составляли 51 Бк/м<sup>2</sup> для  $^{239}\text{Pu}$  и 1184 Бк/м<sup>2</sup> для  $^{238}\text{Pu}$  [79].

Источниками поступления изотопов плутония в объекты окружающей среды в зоне влияния производственной площадки «Маяк», Россия, являются: аварийные ситуации 1957 и 1967 гг., регламентные выбросы в атмосферу, сбросы в водные объекты, ветровой подъем радионуклидов с загрязненной территории.

Загрязнение изотопами плутония почвы на большей части территории, прилегающей к промышленной зоне, характеризуется концентрациями в пределах 1,2–10 Бк/кг. Повышенные концентрации плутония в 10–100 Бк/кг фиксируются на территории, прилегающей к санитарно-защитной зоне, которая была загрязнена вследствие аварийных ситуаций в 1957 и 1967 гг. Загрязнение территории характеризуется как неравномерное и носит пятнистый характер. Зона загрязненная плутонием превышает 100 км, а на расстоянии 40–100 км имеются участки с концентрацией  $^{238+239+240}\text{Pu}$  в 0,5–12 Бк/кг. При этом содержание  $^{238}\text{Pu}$  составляет 40–80 % от общего количества поступившего плутония.

Величина загрязнения почв центральной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), образованного в результате аварии 1957 г.,

оцениваются в  $0,1 \text{ Ки/км}^2$  ( $45 \text{ Бк/кг}$ ) по содержанию  $^{239+240}\text{Pu}$ . По оси следа на расстояниях 20–60 км фиксируются концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$ , равные 15–150 Бк/кг. На Карачаевском следе, образованном вследствие ветрового разноса активных частиц с берегов оз. Карачай в 1967 году, высокие концентрации плутония в почве от 20 до 200 Бк/кг наблюдаются на территориях города Новогорный и окрестностях поселка Худайбердинский [80].

Точных данных по количеству поступившего плутония вследствие деятельности Горно-химического комбината (ГХК), Россия в открытых источниках нет. Наиболее загрязненными являются пойменные почвы и донные отложения реки Енисей до 1500 км вниз по течению реки от г. Железногорска. Диапазон содержания плутония в аллювиальных почвах варьируется от  $0,1 \text{ Бк/кг}$  до  $50 \text{ Бк/кг}$ , при среднем значении  $5,4 \text{ Бк/кг}$  [81].

На Сибирском химическом комбинате (СХК), Россия произошло несколько аварий, повлекших значительные выбросы радиоактивных веществ. Информация о масштабах загрязнения изотопами плутония ограничена. В 1955–1990 гг. общий сброс плутония в реку Томь оценивается в  $0,74 \text{ ТБк}$ . В результате аварии в 1993 г. в резервуаре хранения радиоактивных растворов была заражена территория в десятки квадратных километров. При этой аварии в окружающую среду поступило порядка  $2,8 \text{ г}$  плутония. Максимальная концентрация плутония в почве загрязненной территории составила  $17 \text{ Бк/кг}$ . Наблюдаются высокие до  $75 \text{ Бк/кг}$  концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах береговой линии канала «Ромашка» [82].

### **1.1.3. Плутоний, поступивший вследствие инцидентов с ядерными боеголовками, радиоизотопными источниками энергии**

Пожар на военно-воздушной базе Макгуайр, расположенной на острове Джонстон, США, в 1960 году привел к выбросу частиц, содержащих плутоний, на территорию до  $1 \text{ км}^2$ . Максимальное содержание плутония во фракциях почвы  $75\text{--}147 \text{ мкм}$  оценивается в  $6340 \text{ Бк/кг}$ .

В 1966 г при дозаправке в воздухе над Средиземным морем в районе селения Паломарес, Испания, столкнулись бомбардировщик В-52 и танкер-заправщик КС-135. В результате их падения на землю взорвались 2 бомбы, содержащие вещество заряда в виде урана и плутония. Площадь диспергированных частиц оценивается в 2 км<sup>2</sup>. Наиболее загрязненный грунт был изъят. Оставшееся после рекультивационных работ количество <sup>239+240</sup>Pu оценивается в 0,1 ТБк (0,04 кг). При этом концентрация <sup>239+240</sup>Pu в почве на границе Паломареса достигает 700 Бк/кг [83].

В 1968 году загорелся и упал в 11 км от авиабазы Туле, Гренландия несущий плутониевые бомбы американский бомбардировщик. В результате аварии порядка 6 кг плутония (10<sup>13</sup> Бк) поступило в окружающую среду. Площадь загрязнения оценивалась в несколько квадратных километров. Основная часть загрязнения была удалена путем механического сбора [47]. Остаточное содержание плутония оценивается в 1,4–6 ТБк (~0,53–2,3 кг) для <sup>239</sup>Pu. Проведенный анализ в 1997 г морской воды показал, что в пробах воды, отобранной у северо-западного побережья Гренландии концентрация <sup>239+240</sup>Pu варьировала от 2,4 до 18 мБк/м<sup>3</sup>, при среднем значении 5,5 мБк/м<sup>3</sup> [84].

В 1964 году навигационный спутник СНАП-9А, содержащий 630 ТБк (1 кг) <sup>238</sup>Pu, не смог стабилизироваться на орбите и повторно вошел в атмосферу Земли над Индийским океаном в пределах Южного полушария. Впервые выброс частиц размером 5–58 мкм, содержащих плутоний был зафиксирован на высоте 30 км через 4 месяца. Высвобожденная активность привела практически к трехкратному увеличению глобальных выпадений <sup>238</sup>Pu в Южном полушарии. К середине 1970-х гг. преимущественно на территории Южного полушария было депонировано 95 % плутония, высвобожденного в результате этой аварии [47].

В целом до 1975 г в окружающую среду поступило > 4 т плутония. В настоящее время его поступление незначительно. По оценкам среднемировое площадное загрязнение составляет < 70 Бк/м<sup>2</sup> [43].

Таким образом, плутоний в окружающей среде имеет преимущественно техногенное происхождение. Наибольшая величина активности поступившего



плутония связана с атмосферными, наземными и подземными ядерными испытаниями. Максимальное количество выброшенного плутония приходится на 1950–1960 гг. Вторым по величине является атомная промышленность, включая переработку и захоронение. Большой вклад в поступление изотопов плутония имеет авария на Чернобыльской АЭС. Однако, авария навигационного спутника СНАП-9А повлекла за собой значительное поступление  $^{238}\text{Pu}$  преимущественно в южном полушарии.

Максимальные концентрации плутония в почвах на уровне  $n \cdot 10^7$  Бк/кг наблюдаются на очень локальных участках, площадью до  $n \cdot 10^3$  м<sup>2</sup>, в местах проведения гидроядерных взрывов. Для эпицентров типичных наземных испытаний концентрации плутония в почвах достигают значений в  $n \cdot 10^5$  Бк/кг, площадь загрязнения такими концентрациями не превышает  $n \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>. В зонах выпадения радиоактивных осадков из радиоактивных облаков концентрации плутония оцениваются в  $n \cdot 10^2$  с площадью загрязнения в  $n \cdot 10^3$  км<sup>2</sup>.

В зонах аварийных выбросов и сбросов предприятий топливно-энергетических комплексов, максимальные концентрации плутония в  $n \cdot 10^3$  Бк/кг, как правило, сосредоточены на территории до 1 км. На расстояниях более километра загрязненные территории, вследствие аварийных выбросов и сбросов, характеризуются уровнями концентрации плутония, не превышающими значения  $n \cdot 10^1$  Бк/кг.

## 1.2. Плутоний в глобальных выпадениях

Основным источником, определившим фоновые уровни плутония, являются глобальные выпадения, вследствие ядерных испытаний.

Выпадение радиоактивных частиц начинается практически сразу после проведения испытания. Первыми выпадают крупные частицы в непосредственной близости от эпицентра ядерного взрыва. Мелкие частицы, размером 5 мкм и менее, попадают в верхние слои тропосферы, и вместе с потоками воздушных масс переносятся на многие тысячи километров [85]. Стоит отметить, что, несмотря на

большую территорию их распространения, в силу движения воздушных масс загрязнение наблюдается преимущественно на широте проведения ядерного испытания.

При ядерных испытаниях на больших высотах или с использованием большой мощности (более 1 мегатонны) основная часть радиоактивных частиц переходит в стратосферу. Осаждение таких частиц происходит достаточно медленно, что способствует их переносу на большие расстояния. Такие выпадения сформировали обширные территории низкоуровневого радиоактивного загрязнения. Характер распределения таких выпадений относительно равномерный. Данные выпадения носят глобальный характер.

Радионуклиды, инжектированные в стратосферу после взрыва, в последующем переносятся в тропосферу, из нее они удаляются вместе с осадками или в сухом виде [86]. При этом равномерность выпадения радионуклидов возрастает при большей доле сухих выпадений и с удалением от места проведения взрыва [87]. При этом наибольшая интенсивность глобальных выпадений радионуклидов и плутония, в частности, приходится на широты 50–60°.

Кроме того, ландшафтно-геохимические особенности территории влияют на характер как первичного, так и вторичного перераспределения радионуклидов. Попадая на поверхность почвенного покрова, радионуклиды, включая плутоний, поглощаются почвой и мигрируют в ней.

Миграция радионуклидов приводит к их перераспределению как по глубине почвы, так и в горизонтальном направлении. Например, часто наблюдается приуроченность участков повышенного радиоактивного загрязнения к водоразделам, платообразным поверхностям выравнивания (закрепленные первичные выпадения), а также к подножьям горных макросклонов, днищам крупных речных долин и межгорных котловин [88]. Вынос радионуклидов за пределы ландшафта, как и вынос их из почвенного профиля вследствие вертикальных и поверхностных стоков оценивается в десятые доли процента в год от общей активности, а их вовлечение в биологический круговорот, как правило, не превышает десятых долей процента.

Вертикальная миграция радионуклидов в почве происходит под влиянием многих факторов. В естественных условиях основными являются: фильтрация атмосферных осадков в глубь почвы, капиллярный отток влаги, перенос влаги под действием градиента температур, гранулометрический и минеральный состав почвы, роющая деятельность животных.

Самым масштабным является исследование, выполненное Лабораторией Здоровья и безопасности Комиссии по атомной энергии Соединенный Штатов Америки в 1970–1971 годах [9]. Другие исследования направлены на оценку уровня глобальных выпадений плутония на отдельных, локальных территориях [9–33].

Следует отметить, что при исследованиях глобальных выпадений плутония авторами используются разные единицы измерения, методики отбора почвенных образцов. Для обобщения представленной в публикациях информации произведен пересчет данных к единым единицам измерения Бк/м<sup>2</sup>. Во избежание существенного занижения расчетов для данных с концентрацией <sup>239+240</sup>Pu ниже предела обнаружения были использованы значение представленных пределов. Средние значения рассчитывались как среднее арифметическое по всем данным.

Результаты обобщения уровней глобальных выпадений изотопов плутония представлены в таблице 2. Данные таблицы 2 показывают, что мировой уровень глобальных выпадений <sup>239+240</sup>Pu находится на уровне  $n \cdot 10^1$  Бк/м<sup>2</sup>.

Уровень глобальных выпадений <sup>239+240</sup>Pu в северном полушарии выше, чем в южном. Кроме того, наблюдается неоднородность концентраций плутония в почвах для разных стран в диапазоне от 1,4 Бк/м<sup>2</sup> для территории Индонезии до 270 Бк/м<sup>2</sup> для территории Черногории. Это связано с широтной зависимостью выпадений плутония и последующим его перераспределением в почвах.

Таким образом, концентрации плутония в почве, обусловленные глобальными выпадениями, оцениваются в десятки единиц Бк/кг. Однако, наблюдается некоторая неоднородность выпадений, связанная с широтной зависимостью и перераспределением радионуклидов. Несмотря на довольно большой объем исследований по оценке уровня глобальных выпадений плутония, полноценной оценки для территории России в литературных данных не найдено.

Таблица 2 — Уровень глобальных выпадений  $^{239+240}\text{Pu}$  по [9–33]

Страна	Уровень глобальных выпадений $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/м <sup>2</sup>	
	Диапазон	Среднее
Великобритания	–	47
Венесуэла	–	8,9
Германия	55–100	78
Гренландия	–	23
Дания	44–81	54
Исландия	56–79	64
Италия	93–110	100
Катар	22–170	80
Китай	4,4–460	97
Колумбия	–	4,8
Корея	14–150	45
Коста-Рика	–	35
Норвегия	0,7–150	35
Пакистан	–	59
Португалия	–	56
США	14–82	45
Финляндия	1,76–408	58
Франция	49–350	130
Черногория	9,6–870	270
Шотландия	7,4–56	32
Япония	23–63	43
Среднее для северного полушария		65,0
Индонезия	1,3–1,6	1,4
Кения	–	19
Эквадор	–	6,7
Среднее для экваториальной зоны		9,0
Австралия	11–28	19
Ангола	–	3,4
Бразилия	–	20
Зимбабве	–	5,6
Мадагаскар	9,0–52	19
Мозамбик	0,60–7,0	4,0
Новая Зеландия	–	17
Перу	–	4,4
Чили	1,20–7,5	4,0
Южная Африка	1,4–11	6,0
Среднее для южного полушария		10,0

### 1.3. Вертикальное распределение плутония в почвах

Выпавшие на земную поверхность изотопы плутония вступают во взаимодействие с почвенными частицами, почвенным раствором, включаются в процессы миграции, что приводит к их перераспределению в почве. Исследованию распределения плутония по вертикальному профилю почв посвящен ряд работ [10, 19, 31, 89–93].

Исследование распределения изотопов плутония по глубине почв Черногории показало, что его максимальные содержания в 44 % находятся в верхнем слое почвы 0–5 см. С увеличением глубины отбора образцов наблюдалось снижение его концентрации. Для глубины 5–10 см содержание плутония оценивалось в 31 %, а на глубине 10–15 см находилось 25 % от общего содержания [89].

Для территории Семипалатинского испытательного полигона основное содержание плутония, около 95 %, приходится на верхние слои почвы до 5 см [91]. Однако такое распределение отмечается не для всех типов почв полигона. Например, в солонцах 80 % от общего содержания приходится на 10–15 сантиметровый слой почвы.

Исследование распределения плутония по глубине почв четырех районов г. Канберра, Австралия установило, что в слое 0–5 и 5–10 см содержится практически одинаковое количество  $^{239+240}\text{Pu}$ , составляющее 38 и 32 % от общего содержания [10]. Такое распределение авторы связывают с эрозионными процессами в данном регионе.

На рисунке 1 представлена кривая вертикального распределения плутония в почвах, полученная на основании обобщения литературных данных, проведенного в работе [94].

Данные рисунка 1 свидетельствуют, что 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.

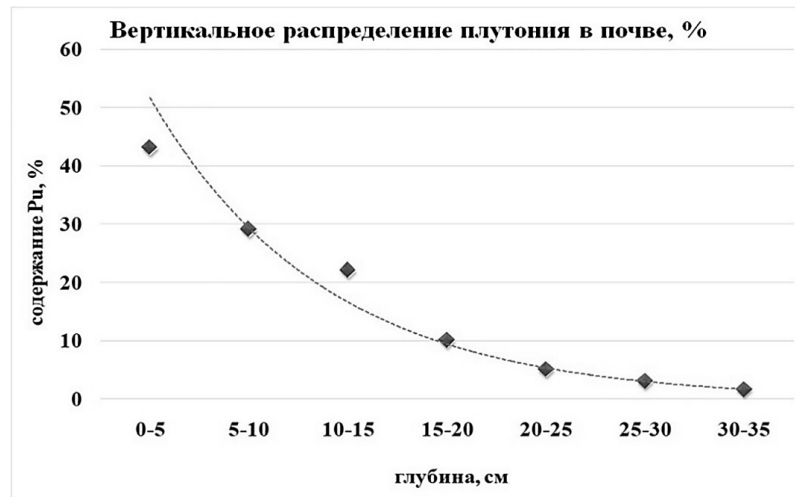


Рисунок 1 — Вертикальное распределение плутония в почве по глубине [94]

Такое распределение плутония в почвогрунтах наблюдается не во всех случаях. Например, исследование распределения плутония по глубине почвы территории Ланьчжоу, расположенному в 1200 км к востоку от полигона Лобнор Китай, концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в поверхностных слоях (0–5 см) составляла <0,05 Бк/кг, и увеличивалась по глубине, достигая максимальных значений в 0,23 Бк/кг на глубине 13 см [19].

В результате исследования распределения плутония по глубине почвогрунтов на территории ВУРСа установлено, что для лесного и лугового биоценозов изотопы плутония задерживаются в подстилке и дернине, а их содержание с глубиной изменяется более плавно в сравнении с лугово-черноземной и серой лесной почвами. Для лугово-черноземной почвы фиксируется увеличение концентрации плутония в нижней части перегнойного горизонта. Для этой почвы были обнаружены концентрации изотопов плутония, равные 0,3 Бк/кг на глубине 45 см. Авторы связывают такое распределение с гидроморфностью почв и повышенным содержанием карбонатов [80].

Таким образом, выпавший на поверхность плутоний мигрирует по почвенному горизонту вследствие различных факторов. Как правило, его распределение по глубине почвенного горизонта экспоненциально уменьшается с глубиной. В среднем ~95 % общего содержания плутония в почве приходится на 20 сантиметровый слой.

#### 1.4. Накопление плутония растениями

В литературных данных авторами используются разные критерии и единицы оценки накопления плутония растениями. Основными критериями являются коэффициент накопления ( $K_n$ ), рассчитываемый как отношение удельной активности радионуклида в растении Бк/кг к удельной активности почвы Бк/кг, на которой выращено растение и коэффициент перехода ( $K_p$ ), рассчитываемый как отношение содержания радионуклида в растительной массе (Бк/кг) к поверхностной активности почвы (Бк/м<sup>2</sup>).

С целью сравнения литературных данных в настоящей работе произведен перерасчет к единому коэффициенту накопления. При обработке данных из литературных источников, в которых не проведен расчет коэффициентов накопления, но представлена информация по содержанию изотопов плутония в растительности и почве, на которой она выращена, были рассчитаны коэффициенты накопления. Значения содержания изотопов плутония в плодах фруктовых деревьев, которые представлены в расчете на свежий вес, пересчитаны к содержанию плутония в сухом весе с учетом средней влажности рассматриваемой растительности или ее части [95].

В специальных публикациях МАГАТЭ группой экспертов дано обобщение результатов мировых исследований по установлению величин коэффициентов накопления биологическими организмами [34–36]. Приведенные в данных публикациях  $K_n$  плутония отличается высокой изменчивостью значений, достигающей 4 порядков внутри групп (Таблица 3).

Большой разброс значений  $K_n$  вероятно связан с объединением растений по видам, а также разными почвенно-климатическими условиями их произрастания. Более того, представленные значения были получены на основании ограниченного числа литературных источников, многие из которых описывают специфические районы с определенными почвенно-климатическими факторами, что делает их неподходящими для оценки в других случаях. Авторы отмечают, что достаточное количество исследований коэффициентов накопления растениями имеется только

для некоторых радионуклидов, таких как Cs и Sr. Для трансураниевых элементов, таких как Am и Pu, имеющихся данных было недостаточно для полноценной оценки [34].

Таблица 3 — Коэффициенты накопления плутония по данным специальных публикаций МАГАТЭ (рассчитанные как отношение содержания Pu в сухом образце растительности Бк/кг к его содержанию в сухой почве, Бк/кг)

Группа растений	Часть растения	Кн(Pu)
Деревья	фрукты	$1,3 \cdot 10^{-6} - 2,1 \cdot 10^{-2}$
Кустарники	ягоды	$6,4 \cdot 10^{-5} - 6,6 \cdot 10^{-1}$
	надземная часть	$6,4 \cdot 10^{-5} - 2,7 \cdot 10^{-4}$
Разнотравье	все растение	$1,4 \cdot 10^{-2} - 5,0 \cdot 10^{-2}$
	листья и стебли	$5,0 \cdot 10^{-5} - 3,9 \cdot 10^{-3}$
Ягодные	ягоды	$2,7 \cdot 10^{-5} - 8,3 \cdot 10^{-4}$
Бобовые	листья и стебли	$1,1 \cdot 10^{-4} - 2,9 \cdot 10^{-3}$
	семена и стручки	$3,7 \cdot 10^{-5} - 1,5 \cdot 10^{-4}$
Зерновые	зерно	$2,0 \cdot 10^{-7} - 1,1 \cdot 10^{-3}$
Кукуруза	листья и побеги	$2,0 \cdot 10^{-6} - 3,2 \cdot 10^{-4}$
	зерно	$3,0 \cdot 10^{-6}$
Листовые овощи	листья	$1,0 \cdot 10^{-5} - 2,0 \cdot 10^{-3}$
Нелистовые овощи	плоды	$6,0 \cdot 10^{-6} - 1,2 \cdot 10^{-3}$
Клубни	клубни	$3,8 \cdot 10^{-6} - 5,0 \cdot 10^{-3}$
Корнеплоды	корнеплод	$7,0 \cdot 10^{-5} - 8,6 \cdot 10^{-3}$
	листья	$2,5 \cdot 10^{-4} - 4,9 \cdot 10^{-3}$
Мхи и лишайники	—	$1,5 \cdot 10^{-1} - 2,5 \cdot 10^{-1}$

В литературных источниках представлено ограниченное число исследований накопления плутония растительностью для территорий глобальных выпадений. Это связано с чрезвычайно низкими концентрациями плутония в почве в десятые доли Бк/кг, а также методами анализа ультранизких концентраций плутония в объектах окружающей среды, которые весьма трудоемки.

Наиболее подробно накопление растениями плутония глобального происхождения изучено на территории Финляндской Республики. Диапазоны Кн внутри типов рассматриваемой в исследованиях растительности изменяются в пределах 1–3 порядков. Так диапазон накопления изотопов плутония для грибов



составил  $1,8 \cdot 10^{-2}$ – $1,6 \cdot 10^{-1}$ , для лесных ягод —  $2,6 \cdot 10^{-3}$ – $1,1 \cdot 10^{-1}$ , для лишайников —  $3,0 \cdot 10^{-3}$ – $7,9 \cdot 10^{-2}$  [12, 96].

Обширное исследование по изучению  $K_n(\text{Pu})$  проведено для всей территории Японии. В исследовании дана оценка накопления плутония для очищенного зерна риса. Диапазон  $K_n(\text{Pu})$  для отшелушенного риса составил  $4,5 \cdot 10^{-6}$ – $1,2 \cdot 10^{-4}$  [97].

Крупномасштабные исследования по изучению коэффициентов накопления плутония дикорастущими и сельскохозяйственными растениями были проведены для территории Семипалатинского испытательного полигона на участках с высокой концентрацией плутония (до десятков тысяч Бк/кг) в естественных условиях [98–101]. Следует отметить, что данные работы проведены в одной климатической зоне и на одном типе почвы, одним коллективом исследователей по одинаковым методикам, что свидетельствует о минимальных возможных случайных ошибках.

Полученные в ходе исследований, проведенных на территории СИП, коэффициенты накопления плутония сельскохозяйственными культурами представлены в таблице 4. Данные таблицы 4 свидетельствуют, что коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  сельскохозяйственными культурами находятся в диапазоне  $n \cdot 10^{-5}$ – $n \cdot 10^{-1}$ . Отмечается существенная разница в накоплении изотопов плутония для разных вегетативных органов рассматриваемых культур, достигающая 2 порядков величин (например, плоды и листья перца).

Для ряда сельскохозяйственных растений наименьшие  $K_n$  плутония фиксируется для надземной части растений. Однако, накопление плутония преимущественно в корневой системе не является типичным для всех рассматриваемых культур. Например, коэффициент накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  плодами баклажана, который составил  $5,5 \cdot 10^{-2}$ , характеризуется тем же порядком величины, что и коэффициент накопления плутония корневой системой, который составил  $1,6 \cdot 10^{-2}$ .

Один порядок величины коэффициента накопления плутония надземной частью и корнеплодом наблюдается для моркови, которые составили  $6,9 \cdot 10^{-2}$  и  $3,9 \cdot 10^{-2}$ , соответственно.

Таблица 4 — Коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  сельскохозяйственными культурами для территории Семипалатинского испытательного полигона (рассчитанные как отношение содержания Pu в сухом образце растительности Бк/кг к его содержанию в сухой почве, Бк/кг)

Вид растения	Часть растения	$K_n(\text{Pu})$	Вид растения	Часть растения	$K_n(\text{Pu})$
Томат	плоды	$<1,0 \cdot 10^{-3}$	картофель	клубни	$4,3 \cdot 10^{-4}$
	листья	$4,8 \cdot 10^{-3}$		листья	$2,2 \cdot 10^{-2}$
	стебли	$1,7 \cdot 10^{-3}$		стебли	$8,0 \cdot 10^{-3}$
	корни	$2,9 \cdot 10^{-1}$		корни	$4,7 \cdot 10^{-2}$
Морковь	листья	$6,9 \cdot 10^{-2}$	свекла	листья	$1,0 \cdot 10^{-2}$
	корнеплоды	$3,9 \cdot 10^{-2}$		корнеплоды	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Перец	плоды	$1,1 \cdot 10^{-4}$	тыква	плоды	$3,1 \cdot 10^{-5}$
	листья	$1,1 \cdot 10^{-2}$		листья	$3,4 \cdot 10^{-3}$
	стебли	$1,8 \cdot 10^{-3}$		стебли	$7,4 \cdot 10^{-4}$
	корни	$9,0 \cdot 10^{-3}$		корни	$6,6 \cdot 10^{-3}$
Капуста	листья	$1,2 \cdot 10^{-3}$	огурец	плоды	$1,9 \cdot 10^{-4}$
	стебель	$7,1 \cdot 10^{-3}$		листья	$5,0 \cdot 10^{-3}$
	корни	$2,8 \cdot 10^{-2}$		стебли	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Лук	листья	$2,8 \cdot 10^{-3}$	баклажан	плоды	$5,5 \cdot 10^{-2}$
	луковицы	$1,3 \cdot 10^{-2}$		листья	$5,1 \cdot 10^{-2}$
Пшеница	зерно	$8,1 \cdot 10^{-4}$		стебли	$9,5 \cdot 10^{-4}$
	стебли	$2,6 \cdot 10^{-3}$		корни	$1,6 \cdot 10^{-2}$
	корни	$8,3 \cdot 10^{-2}$			

Наименьший коэффициент накопления плутония для картофеля, составляющий  $4,3 \cdot 10^{-4}$  фиксируется для клубнеплодов. Для корневой системы  $K_n(\text{Pu})$  оценивается в  $4,7 \cdot 10^{-2}$ . Средние значения  $K_n$  надземной частью составили  $2,2 \cdot 10^{-2}$  для листьев и  $8,0 \cdot 10^{-3}$  для стеблей.

Обширные исследования по накопления плутония дикорастущими растениями были проведены на территории 30 км зоны отчуждения Чернобыльской АЭС и Полесского государственного радиационно-экологического заповедника [37, 38, 102–106]. Обобщенные результаты данных исследований представлены в таблице 5.

Таблица 5 — Коэффициенты накопления плутония дикорастущими растениями для территории чернобыльских выпадений (рассчитанные как отношение содержания Pu в сухом образце растительности Бк/кг к его содержанию в сухой почве, Бк/кг)

Группа	Семейство	Часть растения	Кн(Pu)	
			Среднее	Диапазон
Травянистые растения	разнотравье	надземная часть	$8,94 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-4} - 7,8 \cdot 10^{-1}$
		корни	$5,69 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1} - 9,7 \cdot 10^{-1}$
	астровые	надземная часть	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-2}$
		корни	$4,41 \cdot 10^{-1}$	—
	бобовые	надземная часть	$3,05 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-1}$
		зерно	$1,67 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3} - 3,3 \cdot 10^{-2}$
	злаки	надземная часть	$9,72 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3} - 4,1 \cdot 10^{-1}$
		корни	$6,75 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1} - 9,7 \cdot 10^{-1}$
		надземная часть	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3} - 1,4 \cdot 10^{-1}$
	осоковые	корни	$9,16 \cdot 10^{-1}$	—
сложноцветные		надземная часть	$3,40 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-3} - 7,0 \cdot 10^{-2}$
Травянистые ягодные растения	розовые (земляника, костяника)	листья	$1,14 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3} - 2,0 \cdot 10^{-2}$
		стебли	$6,58 \cdot 10^{-2}$	$8,7 \cdot 10^{-4} - 2,4 \cdot 10^{-1}$
		ягоды	$2,51 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-1} - 3,3 \cdot 10^{-1}$
Кустарники	—	ягоды	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - 3,9 \cdot 10^{-2}$
		надземная часть	$2,32 \cdot 10^{-1}$	—
		корни	$4,69 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-3} - 1,7 \cdot 10^{-1}$
Деревья	сосновые	хвоя	$3,2 \cdot 10^{-4}$	—
Лишайники и мохообразные	лишайники	—	$1,80 \cdot 10^{-1}$	—
	мох	—	$8,78 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2} - 2,8 \cdot 10^{-1}$

Данные таблицы 5 показывают, что коэффициенты накопления изотопов плутония травянистой растительностью, произрастающей на рассматриваемой территории находятся на уровне  $n \cdot 10^{-2}$ . Вместе с тем отмечается, что для надземной части травянистой растительности наблюдаются Кн(Pu) со значениями на порядок величин ниже, чем значения коэффициентов накопления для корневой системы. Несмотря на большой разброс Кн плутония в корневой системе кустарников, среднее значение коэффициентов накопления корневой системой ниже, чем для их надземной части.

Коэффициенты накопления плутония травянистой растительностью зоны влияния комплекса «Селлафилд» варьируются в очень широких пределах, составляя диапазон от  $1,1 \cdot 10^{-6}$  до  $3,3 \cdot 10^{-1}$ .

Исследование накопления плутония черной смородиной, произрастающей на пойменных участках р. Енисей территории «Атаманово (остров)», которые были загрязнены в результате работы ГХК описано в [107]. В ходе исследования установлено, что наименьшие значения коэффициента накопления плутония в  $1,0 \cdot 10^{-2}$  фиксировались для ветвей кустарника.  $K_n(\text{Pu})$  листьями в  $2,6 \cdot 10^{-2}$  очень близко к значению  $K_n$  корнями, составляющего  $2,7 \cdot 10^{-2}$ . Максимальное накопление плутония наблюдалось в ягодах смородины с  $K_n$ , равным  $5,6 \cdot 10^{-2}$ .

Накопление изотопов плутония дикорастущими растениями, произрастающими на разном расстоянии от следа подземного ядерного взрыва «Кратон-3» были изучены в исследовании [108]. Коэффициент накопления плутония хвоей лиственницы составил  $5,2 \cdot 10^{-4}$ . Диапазоны  $K_n$  для листьев деревьев варьировались в диапазоне  $4,2 \cdot 10^{-2}$ – $4,5 \cdot 10^{-2}$ , для осики —  $1,5 \cdot 10^{-2}$ – $2,7 \cdot 10^{-1}$ , для лишайника —  $4,5 \cdot 10^{-2}$ – $1,9 \cdot 10^{-1}$ , для мха —  $2,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,4 \cdot 10^{-1}$ .

Для удобства сравнения в таблице 6 представлена обобщенная информация по коэффициентам накопления для разного типа загрязнения почвы изотопами плутония, объединенная в группы, согласно группированию в специальных публикациях МАГАТЭ.

Данные таблицы 6 свидетельствуют, что коэффициенты накопления плутония находятся в очень широких пределах  $n \cdot 10^{-7}$ – $n \cdot 10^0$ . Безусловно, накопление плутония растительностью зависит от множества факторов, например, тип/вид растений, тип почв, эдафические факторы, климат, формы поступления и нахождения плутония, методы ведения сельского хозяйства. При этом рекомендованные значения  $K_n(\text{Pu})$  МАГАТЭ хорошо согласуются с представленными значениями  $K_n$  плутония для территорий, подверженных глобальным выпадениям и находятся в пределах видовых вариаций.

Для загрязненных территорий  $K_n(\text{Pu})$  существенно выше, значений  $K_n$  представленных для территорий, подверженных глобальным выпадениям и в специальных публикациях МАГАТЭ. Например, полученные экспериментальные значения  $K_n$  на территории СИП превышают рекомендованные значения  $K_n(\text{Pu})$  для многих сельскохозяйственных культур, достигая разницы в 2 порядка.

Таблица 6 — Коэффициенты накопления изотопов плутония растительностью на основе литературных данных

Группа	Часть растения	МАГАТЭ	Глобальные выпадения	Черно-быльские выпадения	СИП	Селлафилд	ГХК	ПЯВ Кратон-3	По всем данным
1	2	3	4	5		7	8	9	10
грибы	—	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $5,9 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$ – $1,6 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $5,9 \cdot 10^{-1}$
мох	—	$1,5 \cdot 10^{-1}$ – $2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$2,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,4 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,7 \cdot 10^{-1}$
лишайник	—	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$ – $7,9 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$ – $2,8 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$4,5 \cdot 10^{-2}$ – $1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$ – $2,8 \cdot 10^{-1}$
деревья	надземная часть	—	—	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$ – $4,5 \cdot 10^{-1}$	—	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$ – $4,5 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$ – $2,6 \cdot 10^{-1}$
	фрукты	$1,3 \cdot 10^{-6}$ – $2,1 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$3,9 \cdot 10^{-3}$ – $1,7 \cdot 10^{-1}$	—	—	$1,3 \cdot 10^{-6}$ – $1,7 \cdot 10^{-1}$
кустарники	ягоды	$6,4 \cdot 10^{-5}$ – $6,6 \cdot 10^{-1}$	—	$2,0 \cdot 10^{-2}$ – $3,9 \cdot 10^{-2}$	—	—	$5,6 \cdot 10^{-2}$	—	$6,4 \cdot 10^{-5}$ – $6,6 \cdot 10^{-1}$
	корни	—	—	$2,3 \cdot 10^{-1}$	—	—	$2,7 \cdot 10^{-2}$	—	$2,7 \cdot 10^{-2}$ – $2,3 \cdot 10^{-1}$
	надземная часть	$6,4 \cdot 10^{-5}$ – $2,7 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$ – $1,7 \cdot 10^{-1}$	—	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$ – $2,6 \cdot 10^{-2}$	—	$6,4 \cdot 10^{-5}$ – $1,7 \cdot 10^{-1}$
разнотравье	все растение	$1,4 \cdot 10^{-2}$ – $5,0 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	—	—	$1,4 \cdot 10^{-2}$ – $5,0 \cdot 10^{-2}$
	надземная часть	$5,0 \cdot 10^{-5}$ – $3,9 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$ – $7,8 \cdot 10^{-1}$	—	$1,1 \cdot 10^{-6}$ – $3,3 \cdot 10^{-1}$	—	—	$1,1 \cdot 10^{-6}$ – $7,8 \cdot 10^{-1}$
	корни	—	—	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,7 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	$1,1 \cdot 10^{-1}$ – $9,7 \cdot 10^{-1}$
зерновые	корни	—	—	—	$8,3 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$8,3 \cdot 10^{-2}$
	стебли и листья	$4,4 \cdot 10^{-7}$ – $9,0 \cdot 10^{-4}$	—	—	$2,6 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	$4,4 \cdot 10^{-7}$ – $2,6 \cdot 10^{-3}$
	зерно	$2,0 \cdot 10^{-7}$ – $1,1 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$ – $1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$ – $3,3 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	$2,0 \cdot 10^{-7}$ – $3,3 \cdot 10^{-2}$

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
бобовые	стебли и листья	$1,1 \cdot 10^{-4}$ – $2,9 \cdot 10^{-3}$	—	$3,0 \cdot 10^{-3}$ – $1,3 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	$1,10 \cdot 10^{-4}$ – $1,30 \cdot 10^{-1}$
	листья	$2,5 \cdot 10^{-4}$ – $4,9 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$ – $6,9 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$2,50 \cdot 10^{-4}$ – $6,90 \cdot 10^{-2}$
	семена и стручки	$3,7 \cdot 10^{-5}$ – $1,5 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—	—	$3,7 \cdot 10^{-5}$ – $1,5 \cdot 10^{-4}$
кукуруза	побеги и листья	$2,0 \cdot 10^{-6}$ – $3,2 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—	—	$2,0 \cdot 10^{-6}$ – $3,2 \cdot 10^{-4}$
	зерно	$3,0 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	—	—	—	$3,0 \cdot 10^{-6}$
ягодные	стебли и листья	—	—	$8,7 \cdot 10^{-4}$ – $2,4 \cdot 10^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$ – $3,4 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	$7,4 \cdot 10^{-4}$ – $2,4 \cdot 10^{-1}$
	ягоды	$2,7 \cdot 10^{-5}$ – $8,3 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$ – $8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$ – $3,3 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	$2,7 \cdot 10^{-5}$ – $3,3 \cdot 10^{-1}$
листовые овощи	листья	$1,0 \cdot 10^{-5}$ – $2,0 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,2 \cdot 10^{-3}$ – $7,1 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	$1,0 \cdot 10^{-5}$ – $7,1 \cdot 10^{-3}$
нелистовые овощи	корни	—	—	—	$9,0 \cdot 10^{-3}$ – $2,9 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	$9,0 \cdot 10^{-3}$ – $2,9 \cdot 10^{-1}$
	стебли и листья	—	$3,0 \cdot 10^{-5}$ – $3,0 \cdot 10^{-4}$	—	$9,5 \cdot 10^{-4}$ – $5,1 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$3,0 \cdot 10^{-5}$ – $5,1 \cdot 10^{-2}$
	плоды	$6,0 \cdot 10^{-6}$ – $1,2 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,1 \cdot 10^{-4}$ – $5,5 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$6,0 \cdot 10^{-6}$ – $5,5 \cdot 10^{-2}$
корнеплодные	корнеплоды	$7,0 \cdot 10^{-5}$ – $8,6 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,6 \cdot 10^{-3}$ – $3,9 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$7,0 \cdot 10^{-5}$ – $3,9 \cdot 10^{-2}$
	листья	$2,5 \cdot 10^{-4}$ – $4,9 \cdot 10^{-3}$	—	—	$1,0 \cdot 10^{-2}$ – $6,9 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$2,5 \cdot 10^{-4}$ – $6,9 \cdot 10^{-2}$
клубневые	клубни	$3,8 \cdot 10^{-6}$ – $5,0 \cdot 10^{-3}$	—	—	$4,3 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	$3,8 \cdot 10^{-6}$ – $5,0 \cdot 10^{-3}$
	надземная часть	—	—	—	$8,0 \cdot 10^{-3}$ – $2,2 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	$8,0 \cdot 10^{-3}$ – $2,2 \cdot 10^{-2}$

Для территории чернобыльских выпадений также наблюдается превышение полученных  $K_n$  травянистой растительностью на 2 порядка в сравнении с рекомендованными значениями  $K_n(Pu)$  в публикациях МАГАТЭ. Однако коэффициенты накопления мхами и лишайниками сопоставимы и находятся на уровне  $n \cdot 10^{-1}$ .

Накопление изотопов плутония корневой системой растений в отчетах МАГАТЭ не представлено, но хорошо изучено на загрязненных территориях. В целом фиксируется существенное превышение коэффициентов накопления плутония корневой системой.

Таким образом, значения коэффициента накопления изотопов плутония растительностью весьма изменчивы и охватывают семь порядков величины. При этом для территории, подверженной глобальным выпадениям коэффициент накопления существенно ниже, чем для загрязненной.

На основе имеющегося набора данных трудно определить степень зависимости  $K_n$  плутония от вида растений. Однако, наблюдается неодинаковое распределение изотопов плутония по вегетативным органам.

Кроме того, анализ литературных данных свидетельствует, что накопление изотопов плутония растениями зависит и от условий их выращивания. Однако, обобщенные данные не позволяют выявить почвенно-климатические факторы, влияющие на изменение величины накопления плутония растениями.

### **1.5. Факторы, влияющие на накопление плутония растительностью**

На коэффициент накопления плутония растительностью может оказывать влияние множество факторов. Например физиология растений (водный обмен, процессы фотосинтеза и дыхания, рассматриваемый вегетативный орган и др.), почвенно-климатические факторы, такие как почва и ее свойства (температура, концентрация кислорода, водный баланс, рН, взаимодействие ионов и др.), климат, методы ведения сельского хозяйства, физико-химические свойства радионуклидов, включая формы их поступления в окружающую среду [109 – 111].

Химическая форма изотопов плутония существенно влияет на его миграционную способность, поскольку от формы связи плутония с почвенными частицами зависит его количество, способное перейти в почвенный раствор, что определяет долю, которая может включаться в трофические цепи. На формы нахождения плутония в почвах и их относительное количество существенную роль оказывает тип почвы. Например, исходя из представленных обобщенных данных, представленных в специальных публикациях МАГАТЭ по содержанию мобильных форм плутония почвы могут быть ранжированы в следующем ряду: дерново-подзолистые > дерновые > торфяно-болотные [35, 36].

В исследованиях  $K_n(\text{Pu})$  для наиболее представительных почв Великобритании и Западной Европы (суглинки, песчаные и торфяные почвы) показано, что коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  для зерна ячменя составили  $2,5 \cdot 10^{-6}$ – $1,2 \cdot 10^{-5}$ , капусты —  $4,3 \cdot 10^{-6}$ – $4,6 \cdot 10^{-5}$ , моркови —  $1,1 \cdot 10^{-5}$ – $1,5 \cdot 10^{-4}$ . При этом наименьшие  $K_n$  отмечены для почв с максимальным количеством органического вещества, что объясняется высокой степенью связанности  $^{239+240}\text{Pu}$  с высокомолекулярными органическими соединениями недоступными для растений [112, 113].

Значительную роль играет и форма поступления плутония в окружающую среду. При этом химическая форма плутония, поступающего в природную среду, в зависимости от источника может меняться от труднорастворимых соединений до относительно легкорастворимых форм [114]. Например, в зарядах атомных бомб использовались сплавы плутония с другими металлами. При этом растворимость двойных сплавов плутония с металлами побочных подгрупп очень ограничена; исключением являются твердые растворы с алюминием [115].

В результате масштабных исследований вариативности коэффициентов накопления плутония и на разных участках Семипалатинского испытательного полигона для ковыля (*Stipa capillata*) установлено, что наиболее высокие  $K_n(\text{Pu})$ , достигающие величины в  $n \cdot 10^0$  фиксировались на участках проведения испытаний БРВ, в то время как минимальные значения, составляющие  $n \cdot 10^{-3}$ , наблюдались для участков наземных ядерных испытаний. При этом вариабельность



коэффициентов накопления плутония в пределах одного участка достигала 3 порядков величины [100]. Данное исследование свидетельствует о существенном влиянии индивидуальных особенностей растений на процесс накопления плутония, а также о влиянии форм нахождения плутония в почвах.

Методы ведения сельского хозяйства могут оказывать влияние на свойства почв (орошение, вспашка, известкование и внесение удобрений) и привести к перераспределению радионуклидов, изменению рН почв, формы нахождения радионуклидов, а, следовательно, к способности поглощения их растительностью [37, 38]. Результаты работы [116] по исследованию влияния минеральных удобрений на Кн показывают, что добавление азотно-калийно-фосфорных (до 600 кг/га), а также  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (до 450 кг/га) удобрений увеличивало количество  $^{239}\text{Pu}$  во всех органах пшеницы, однако не более чем в 2,5 раза. В работе [117] не выявлено значимого влияния применения калийных удобрений на Кн $^{239+240}\text{Pu}$  для фасоли, кукурузы и репы.

В литературе имеется ряд данных о зависимости поведения радионуклидов от климатических условий, таких как влажность и температура [118]. Однако, данные факторы не изучены в отношении изотопов плутония.

Таким образом, имеющихся данных пока недостаточно для полного понимания процессов и факторов, влияющих на накопление плутония растительностью.

## ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 изотопов плутония в отобранных образцах.

Оценку коэффициентов накопления сельскохозяйственными культурами, а также исследование факторов влияющих на накопление плутония растениями проводили посредством вегетационных экспериментов.

### 2.1. Методы отбора почвенных и растительных образцов

Отбор образцов почво-грунтов и растительности производили согласно [119–123]. Непосредственно перед отбором почвенного материала удаляли слой травянистой растительности, опавшей листвы, а для лесных территорий слой подстилки. В работе использовали точечный отбор почвенных образцов и метод конверта. Послойные образцы почвы (до 25 см) отбирали при помощи совка. Для этого в земле делали прикопку на глубину более 30 сантиметров, после чего с почвы срезали равномерный слой, определяя глубину отбора рулеткой.

Послойный пробоотбор почвогрунтов на глубину проводили с использованием специального бура диаметром 10 см, позволяющего проводить отбор образцов с шагом 5 и 10 см. Глубина отбора почвенных образцов определялась характером поступления плутония в окружающую среду и его возможным вертикальным распределением в почвенном профиле. Максимальная глубина отбора составила 95 см.

Для исключения перекрестного загрязнения поверхности пробоотбирающего оборудования промывали водой и протирали бумажным полотенцем перед каждым отбором. Отобранные образцы помещали в герметичные полиэтиленовые пакеты,

маркировали соответствующим образом. Для каждой точки отбора определяли координаты местоположения при помощи GPS навигатора RGK NV-64.

Отбор проб растительности осуществляли в один день с отбором образцов почво-грунтов сопряженно. Образцы наземной части травянистой растительности срезали ножницами. Вес отобранных образцов составлял приблизительно 2 кг свежей массы. Смешанную пробу растительности помещали в полиэтиленовый мешок и маркировали соответствующим образом.

Корневую часть выкапывали лопатой вместе с грунтом и проводили первичную очистку путем встряхивания. Образцы упаковывали и маркировали. Ножницы промывали водой и обтирали бумажным полотенцем перед последующим отбором растительных образцов.

Сбор проб кустарниковой и древесной растительности осуществляли с разделением по вегетативным органам. Образцы листвы отбирали в период завершения их интенсивного роста и до начала периода опадания. Отбор образцов листвы проводили совместно с черешками с максимального количества доступных веток, растущих в разном направлении. Аналогично выполняли отбор проб хвои.

Отбор проб побегов и мелких ветвей осуществляли при помощи секатора с разных сторон растения. Образцы крупных ветвей спиливали пилой в единственном экземпляре во избежание травмирования деревьев.

Отбор древесины и коры выполняли с использованием соответствующих инструментов. Отобранные образцы были упакованы в полиэтиленовые пакеты и промаркированы. Все оборудование, используемое при отборе образцов растительности, промывали водой и вытирали досуха перед последующим отбором.

## **2.2. Методика проведения вегетационных опытов**

Исследование накопления плутония сельскохозяйственными культурами в вегетационных опытах проводили согласно [124, 125]. Для проведения вегетационных опытов использовали почвы, наиболее распространенные на

территории России, такие как дерново-подзолистая, серая лесная, чернозем типичный, болотная торфяная низинная. Исследование проводили для сельскохозяйственных растений, наиболее часто употребляемых в пищу населением или сельскохозяйственными животными (ячмень, бобы, лук, томат, картофель, редис, патиссон).

Отобранные для проведения вегетационных опытов почвы высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с размером отверстий диаметром в 3 мм. Просеянную почву помещали в пластиковую емкость и добавляли водные растворы солей ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) из расчета конечной концентрации элементов питания 200 (N), 100 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и 100 ( $\text{K}_2\text{O}$ ) мг/кг воздушно-сухой почвы.

Далее при тщательном перемешивании вносили водный раствор  $^{239}\text{Pu}$ , приготовленный методом разбавления стандартного раствора плутония-239. После внесения плутония почвы инкубировали 45 суток с поддержанием 60 % влажности от полной влагоемкости при периодическом перемешивании. По истечении срока инкубирования почву высушивали до воздушно-сухого состояния. В подготовленной почве измеряли концентрацию  $^{239+240}\text{Pu}$ .

При набивке сосудов на дно помещали дренаж в виде пластиковых гранул диаметром 5 мм, сверху размещали водопроницаемый инертный материал, поверх которого уставили дренажную трубку. Сверху насыпали воздушно-сухую почву, содержащую изотопы плутония, массой 3,5 кг. Посев культур осуществляли пророщенными семенами на глубину до 5 мм. Вегетационные опыты проводили под навесом и в вегетационном домике.

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.

По завершении вегетационного периода надземную часть растений срезали ножницами на расстоянии 5 мм от поверхности почвы. Сразу после отбора промывали водой и ополаскивали дистиллированной водой. Почву с корневой

системой аккуратно переносили на сито диаметром 3 мм, частицы почвы отмучивали в водопроводной воде до визуального отсутствия частиц почвы. После отмучивания корневую систему отмывали проточной водой, потирая поверхность корней пальцами рук до визуального отсутствия частиц минеральной составляющей почвы в воде. Отмытую корневую часть растений помещали в емкость с дистиллированной водой и перемешивали в течение 1 минуты. После перемешивания визуально оценивали отмытие корневой системы посредством наличия или отсутствия почвенных частиц на дне. При обнаружении частиц почвы осуществляли дополнительную отмывку.

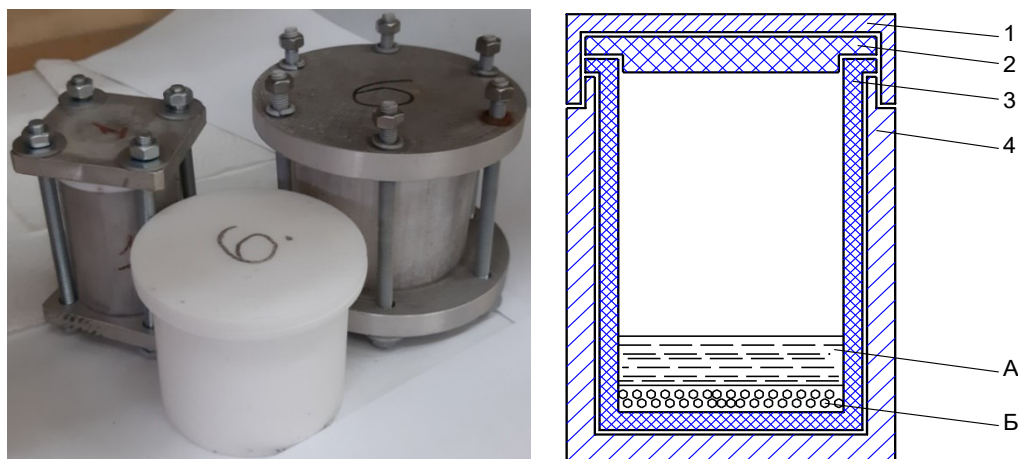
### **2.3. Модифицированная методика определения содержания плутония в образцах почвы, донных отложениях и растительности**

Определение концентрации изотопов плутония в образцах почвы и растительности проводили методом альфа-спектрометрии с предварительным радиохимическим выделением.

В рамках настоящей работы проведена модификация методики выполнения измерений «Определение удельной активности искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» [126] с целью сокращения времени разложения, увеличения навесок разлагаемых образцов, а также снижения перекрестного загрязнения [127, 128]:

- разработана конструкция тефлоновых автоклавов, позволяющая выполнять разложение навески почвы массой до 20 г при температуре 150 °С (рисунок 2);
- Экспериментально подобраны минеральные кислоты и их необходимое количество для разложения почво-грунтов и образцов растительности;
- предложено использование 72% HF с целью уменьшения объема реагентов;

- предложен метод фильтрации под давлением при помощи специальной шприцевой насадки, позволяющей минимизировать перекрестное загрязнение образцов (рисунок 3).



1 – крышка корпуса (металл), 2 – крышка вкладыша (тефлон),  
3 – вкладыш (тефлон), 4 – корпус автоклава (металл);  
А – реагент для разложения, Б – навеска образца

Рисунок 2 — Конструкция тефлонового автоклава для разложения больших навесок, массой до 20 г



Рисунок 3 — Фильтродержатель шприцевой для мембранных фильтров

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 [129].

Функциональная схема предложенной методической схемы определения удельной активности плутония представлена на рисунке 4.

Предел обнаружения используемой методики зависит от ряда параметров, таких как масса навески анализируемого образца, время альфа-

спектрометрического измерения, радиохимического выхода и степени озоления образцов. При условии анализа 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  $^{238}\text{Pu}$ .

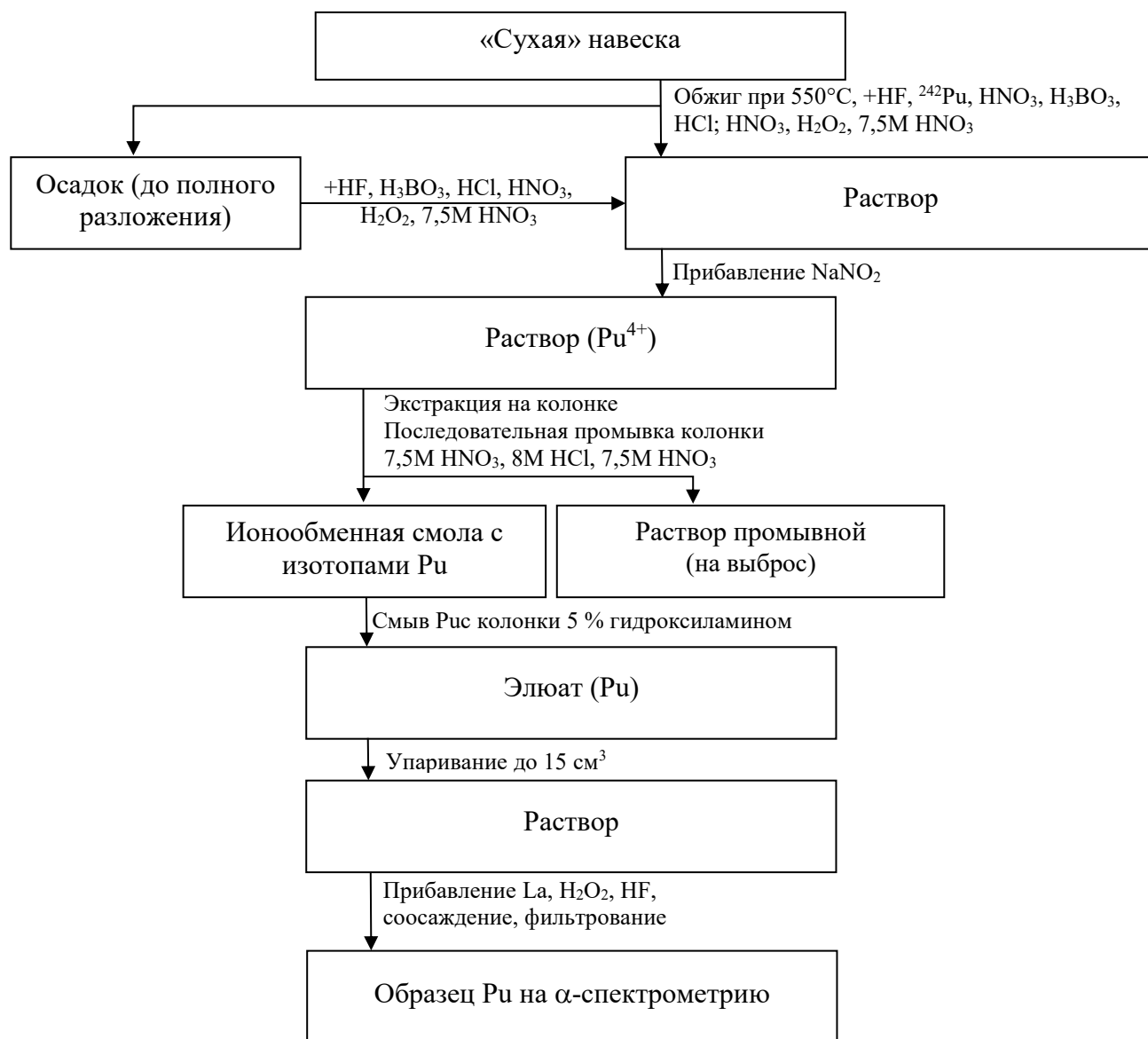


Рисунок 4 — Функциональная схема определения удельной активности плутония в почвах, грунтах, донных отложениях и растениях

### Первичная пробоподготовка и разложение образцов

Образцы почво-грунтов высушивали до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре  $75\text{ }^\circ\text{C}$  до постоянного веса. Проводили механическое удаление неразложившихся органических составляющих, крупных

камней и других включений. Образцы почвы не менее 150 г. истирали в ступке и просеивали через сито диаметром отверстий 1 мм. Просеянные образцы тщательно перемешивали [119, 122, 129, 130].

Навеску не менее 50 г. озоляли в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 7–8 часов при периодическом перемешивании с целью разрушения органической составляющей образца.

Образцы растительности промывали, подсушивали на воздухе для удаления влаги с поверхности после промывания и высушивали в сушильном шкафу при температуре 75 °С до постоянного веса. Сухие образцы измельчали и озоляли в муфельной печи при температуре 550 °С при периодическом перемешивании до исчезновения черного окраса золы.

Образцы почв с ожидаемыми концентрациями, близкими к фоновым значениям, разлагали автоклавным методом. Озоленную навеску пробы не менее 10 г помещали в реакционный сосуд автоклава, вносили рассчитанное количество изотопной метки  $^{242}\text{Pu}$  и смесь кислот из расчета 5 см<sup>3</sup> 70% фтористоводородной и 0,5 см<sup>3</sup> азотной кислот на 1 г пробы. Автоклав закрывали и помещали в металлический корпус. Процесс кислотного разложения осуществляли в сушильном шкафу в течение 2,5 часов при температуре 150 °С.

Полученные после разложения образцы выпаривали на плитке до влажных солей. Далее последовательно вносили 40 см<sup>3</sup> смеси 70 % фтористоводородной и азотной кислот (1:3), 2–3 г борной кислоты и 25 см<sup>3</sup> концентрированной соляной кислоты, 50 см<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты, 1–2 см<sup>3</sup> перекиси водорода, 5–10 см<sup>3</sup> 7,5 моль/л азотной кислоты, упаривая до влажных солей после каждого добавления. К влажным солям добавляли 50–80 см<sup>3</sup> 7,5 моль/л азотной кислоты и нагревали в течение 10–15 минут. При неполном растворении образца пробу центрифугировали и повторяли процедуру разложения осадка до полного разложения. Полученные растворы объединяли.

Образцы почв загрязненных территорий (до 3 г) и растительности разлагали открытым методом на плитке. Озоленную пробу помещали во фторопластовый стакан вместимостью 100 см<sup>3</sup>, вносили рассчитанное количество изотопной метки



$^{242}\text{Pu}$  и  $30 \text{ см}^3$  концентрированной азотной кислоты и  $10 \text{ см}^3$  70 % фтористоводородной кислоты, стакан накрывали фторопластовой крышкой и выпаривали до влажных солей.

Далее последовательно вносили  $\sim 1 \text{ г}$  борной кислоты и  $20 \text{ см}^3$  концентрированной соляной кислоты,  $30 \text{ см}^3$  концентрированной азотной кислоты,  $1\text{--}2 \text{ см}^3$  перекиси водорода,  $5\text{--}10 \text{ см}^3$  7,5 моль/л азотной кислоты, упаривая до влажных солей после каждого добавления. К влажным солям добавляли  $40\text{--}50 \text{ см}^3$  7,5 моль/л азотной кислоты и нагревали в течение  $10\text{--}15$  минут.

### **Радиохимическое выделение плутония**

В полученный после разложения раствор непосредственно перед выделением изотопов плутония вносили  $0,2\text{--}0,3 \text{ г}$  нитрита натрия для стабилизации плутония в состоянии  $\text{Pu}^{4+}$ . Радиохимическое выделение плутония проводилось методом ионообменной хроматографии на анионите АВ-17х8.

Раствор пробы пропускали через хроматографическую колонку, заполненную ионообменной смолой АВ-17х8, со скоростью  $\sim 0,4\text{--}0,5 \text{ см}^3/\text{мин}$  (из расчета 1 капля в течение  $6\text{--}8$  секунд). После пропускания раствора колонку последовательно промывали  $50\text{--}80 \text{ см}^3$  7,5 моль/л азотной кислоты,  $25\text{--}50 \text{ см}^3$  9 моль/л соляной кислоты,  $25\text{--}50 \text{ см}^3$  7,5 моль/л азотной кислоты,  $20\text{--}25 \text{ см}^3$  дистиллированной воды со скоростью  $\sim 0,6 \text{ см}^3/\text{мин}$  (примерно 1 капля в течение  $3\text{--}4$  секунд). Для десорбции изотопов плутония пропускали нагретый до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  5 % раствор солянокислого гидроксиламина со скоростью  $\sim 0,35\text{--}0,4 \text{ см}^3/\text{мин}$  (примерно 1 капля в течение  $8\text{--}10$  секунд).

Собранный элюат упаривали до  $\sim 15 \text{ см}^3$ , вносили  $1 \text{ см}^3$  раствора азотнокислого лантана,  $0,5 \text{ см}^3$  перекиси водорода и  $1 \text{ см}^3$  фтористоводородной кислоты. Раствор выдерживали в течение  $30\text{--}45$  мин для полного соосаждения изотопов плутония со фторидом лантана.

Спектрометрический источник получали путем фильтрования осадка через мембранный фильтр из полиэфирсульфона с максимальным размером пор  $0,1 \text{ мкм}$ .

Контроль радиохимического выхода изотопов плутония осуществлялся по внесенной изотопной метке  $^{242}\text{Pu}$ .

### **Анализ удельной активности плутония в полученных источниках**

Измерение удельной активности изотопов плутония в полученных источниках выполняли альфа-спектрометрическим методом, основанным на регистрации альфа-излучения изотопов плутония, в течение 24 часов в альфа-спектрометрах ООО «НТЦ Амплитуда», Россия, и Alpha Duo, ORTEC.

Счетный образец располагали на расстоянии 5–10 мм от поверхности детектора. Расчет удельной активности изотопов плутония выполняли из соотношения регистрируемых импульсов, по известной активности внесенной изотопной метки  $^{242}\text{Pu}$ .

## **2.4. Расчет и форма представления данных**

Результаты определения содержания изотопов плутония в образцах почвы и растительности выражали в единицах удельной активности в Бк/кг в воздушно-сухом образце.

Удельную активность  $^{239+240}\text{Pu}$  (на сухую навеску) в Бк/кг вычисляли по формуле:

$$A_{\text{уд}} = \frac{S_{\text{Pu}} \cdot A_{\text{м}}}{S_{\text{м}} \cdot M}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{Pu}}$ ,  $S_{\text{м}}$  – площади (количество импульсов) аналитических пиков определяемой суммы изотопов  $^{239+240}\text{Pu}$  и изотопной метки ( $^{242}\text{Pu}$ ) за вычетом фона, соответственно;

$A_{\text{м}}$  – активность изотопной метки ( $^{242}\text{Pu}$ ), введенной в пробу, Бк;

$M$  – навеска анализируемой пробы, кг.

Результаты анализа представляли в следующем виде:

$$X \pm \Delta \quad (2)$$

где  $X$  — значение удельной активности, Бк/кг;

$\Delta$  — значение приписанной характеристики погрешности определения удельной активности, соответствующее результату анализа в соответствии со значениями по [129], Бк/кг;

Расчет коэффициента накопления плутония растениями рассчитывали как отношение удельной активности плутония в растительном образце к удельной активности почвы:

$$K_H = \frac{A_{\text{раст}}}{A_{\text{поч}}} \quad (3)$$

где  $A_{\text{раст}}$  — удельная активность плутония в сухой пробе растительности, Бк/кг,

$A_{\text{поч}}$  — удельная активность плутония в воздушно-сухой почве, Бк/кг.

Средние значения рассчитывались как среднее арифметическое.

## 2.5. Контроль качества измерений

Процедуры контроля качества выполняли в соответствии с международными стандартами [131, 132].

Для каждой партии (8–10) анализируемых стандартных образцов выполняли контроль повторяемости результатов измерений (параллельные шифрованные пробы). Пример результатов анализа параллельных проб почвы на содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  представлен в таблице 7.

Таблица 7 — Контроль повторяемости анализа образцов на содержание  $^{239+240}\text{Pu}$ 

Образец	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	
	анализ 1	анализ 2
Образец 1	$0,18 \pm 0,07$	$0,12 \pm 0,05$
Образец 2	$0,21 \pm 0,07$	$0,19 \pm 0,07$
Образец 3	$0,19 \pm 0,07$	$0,23 \pm 0,08$
Образец 4	$0,22 \pm 0,07$	$0,27 \pm 0,08$
Образец 5	$0,26 \pm 0,08$	$0,25 \pm 0,08$
Образец 6	$0,22 \pm 0,07$	$0,29 \pm 0,09$
Образец 7	$0,22 \pm 0,07$	$0,20 \pm 0,07$

Анализ полученных параллельных определений концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в стандартных образцах почвы показал приемлемую повторяемость результатов на уровне погрешности анализа со средним значением расхождения в 15 %.

Контроль правильности анализов выполнялся с использованием стандартных образцов «Радионуклиды в почве, МАГАТЭ-Soil-6» и «Радионуклиды микроэлементы в почве, МАГАТЭ-375» (таблица 8).

Таблица 8 — Результаты анализа стандартных образцов почвы

Стандартный образец	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	
	Аттестованное значение	Измеренное значение
МАГАТЭ-Soil-6	0,96–1,11	$0,99 \pm 0,10$ (n=3)
МАГАТЭ-375	0,26–0,34	$0,27 \pm 0,03$ (n=3)
n — количество измерений		

Результаты анализа показали, что расхождение между измеренным значением и аттестованным находится в пределах погрешности анализа и не превышает 4 %.

Для оценки воспроизводимости результатов анализа часть агрохимических стандартных образцов почв были направлены в «Лабораторию низкофоновых измерений» Регионального государственного предприятия «Институт ядерной физики» Республики Казахстан (ИЯФ). Лаборатория аккредитована на соответствие требованиям СТ РК ИСО/МЭК 17025–2007, имеет международный знак ILAC MRA. Оценка воспроизводимости между результатами анализа

содержания  $^{239+240}\text{Pu}$ , полученных во ФГБНУ ВНИИРАЭ и РГП ИЯФ представлена на рисунке 5.

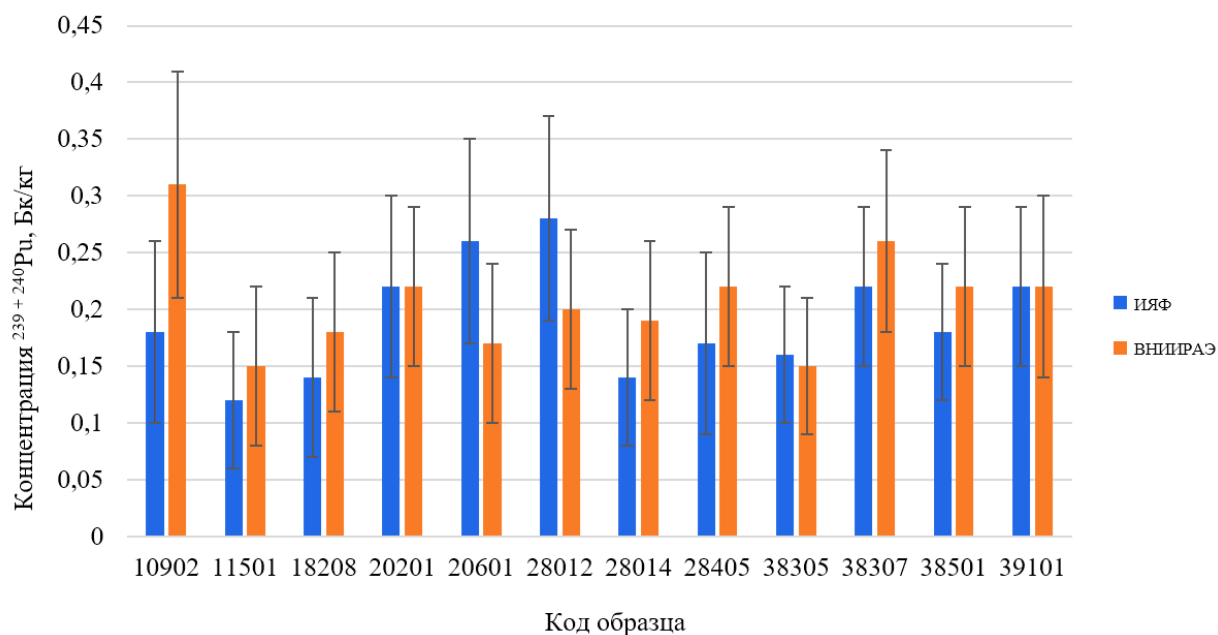


Рисунок 5 — Воспроизводимость результатов анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в агрохимических стандартных образцах почвы, выполненных в ФГБНУ ВНИИРАЭ и РГП ИЯФ

Обработка полученных данных не выявила систематических ошибок в анализах и показала удовлетворительную воспроизводимость результатов в пределах погрешности измерений.

Результаты межлабораторного контроля наряду с внутренним контролем качества измерений позволили обеспечить надежность полученных данных.

## ГЛАВА 3. СОДЕРЖАНИЕ ПЛУТОНИЯ В ПОЧВАХ

### 3.1. Оценка уровня глобальных выпадений плутония в почвах территории Восточно-Европейской равнины

При оценке воздействия радиационно-опасных объектов огромное значение имеет выбор фоновых территорий. Значение уровней глобальных выпадений позволяет дать оценку правильности выбора таких территорий, а также позволяет выявить границы территорий локальных загрязнений, дать оценку степени этих загрязнений. До сих пор существуют определенные сложности в определении локальных и фоновых величин содержания радиоактивных элементов. Это связано с недостатком первичных и обобщающих данных по содержанию искусственных радионуклидов в окружающей среде для больших территорий. Анализ литературных данных показал отсутствие точных оценок уровня глобальных выпадений плутония на территории России.

Таким образом, проблема оценки уровней глобальных выпадений для больших территорий, включающих в себя территории, подвергшиеся локальному радиоактивному загрязнению, является весьма актуальной. Настоящая работа направлена на оценку уровня глобальных выпадений изотопов плутония в почвах территории Восточно-Европейской равнины.

#### **Описание используемых агрохимических стандартных образцов почв**

Данная работа проведена с использованием научной коллекции образцов разных типов почв, собранной ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова», представленной в виде агрохимических стандартных образцов почвы (СО). Для создания СО образцы почв были отобраны в разных почвенно-климатических зонах постсоветского пространства в период с 1978 по 2018 гг. Общее количество образцов почвы составило 58 шт. Места пробоотбора представлены на рисунке 6.



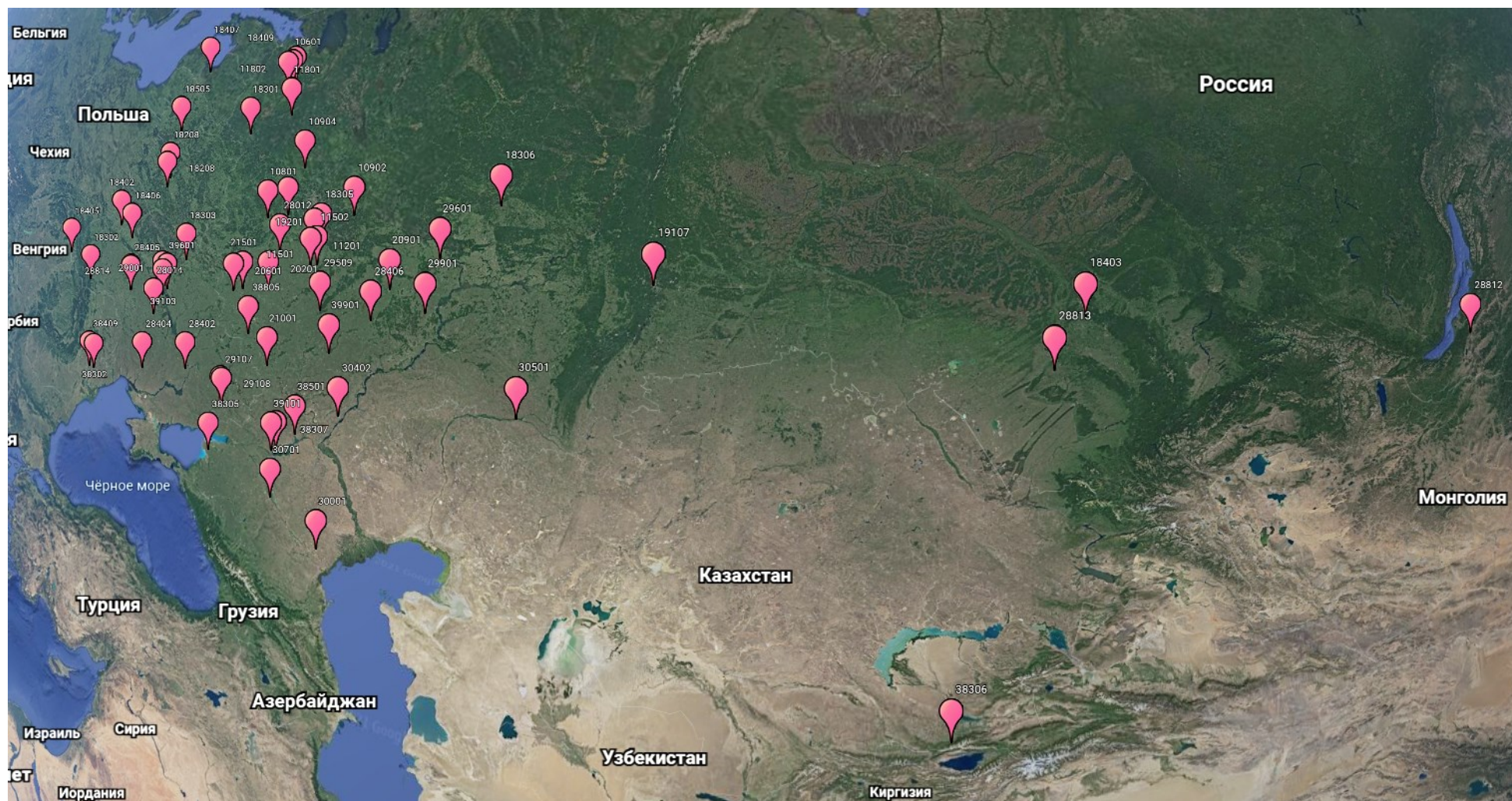


Рисунок 6 — Места отбора образцов почвы для создания агрохимических стандартных образцов

Территория, на которой были отобраны образцы отличается большим разнообразием почвенного покрова и представлена основными типами почв: дерново-подзолистые и серые лесные; черноземы выщелоченные, типичные, южные, карбонатные; каштановые почвы. Все почвы разного гранулометрического состава (легко-, средне и тяжелосуглинистые, супесчаные).

При создании данной коллекции агрохимических стандартных образцов почвы отбор почвенного материала массой ~500 кг проводили на глубину 20 см с участков площадью в 8 м<sup>2</sup> без антропогенного вмешательства.

Почвенный материал высушивался на воздухе при температуре не выше +30 °С, измельчался на размольной машине с просеиванием через сито диаметром 2 мм. Оставшиеся на сите органические остатки, камни и другие включения отбрасывались. Усреднение почвенного материала проводилось по методике «ручного усреднения». Полного усреднения достигали после 20 циклов смешивания. После усреднения материал СО расфасовывали во избежание вторичного разусреднения.

В течение 2,5 лет агрохимические стандартные образцы исследовались на стабильность и однородность по ряду агрохимических показателей и показателей токсикологического загрязнения, при участии не менее 50 аккредитованных испытательных лабораторий.

Агрохимические стандартные образцы после аттестации хранились в условиях, исключающих воздействие химических веществ при температуре (20 ± 5) °С и относительной влажности не более 70 %. На каждый СО имеется паспорт стандартного образца утвержденного типа с аттестованными агрохимическими характеристиками.

### **Уровень глобальных выпадений плутония в почвах территории Восточно-Европейской равнины**

Результаты определения содержания <sup>239+240</sup>Pu в агрохимических стандартных образцах почвы представлены в таблице 9.



Таблица 9 — Концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах Восточно-Европейской равнины

№ пп	Образец	Год отбора	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	№ пп	Образец	Год отбора	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг
1	10601	2006	$0,34 \pm 0,11$	30	28014	1978	$0,21 \pm 0,07$
2	10801	2008	<0,1	31	28402	1984	$0,25 \pm 0,08$
3	10902	2009	$0,26 \pm 0,08$	32	28404	1984	<0,1
4	10904	2009	<0,1	33	28405	1984	$0,20 \pm 0,07$
5	11201	2012	$0,20 \pm 0,06$	34	28406	1984	$0,50 \pm 0,13$
6	11501	2015	$0,14 \pm 0,06$	35	28812	1988	<0,1
7	11502	2015	<0,1	36	28813	1988	$0,12 \pm 0,06$
8	11801	2018	$0,18 \pm 0,08$	37	28814	1988	<0,1
9	11802	2018	$0,17 \pm 0,07$	38	29001	1990	$0,48 \pm 0,13$
10	18208	1982	$0,16 \pm 0,07$	39	29107	1991	$0,12 \pm 0,06$
11	18301	1983	<0,1	40	29108	1991	<0,1
12	18302	1983	$0,23 \pm 0,07$	41	29509	1995	<0,1
13	18303	1983	$0,15 \pm 0,07$	42	29601	1996	$0,16 \pm 0,09$
14	18305	1983	$0,13 \pm 0,06$	43	29901	1999	$0,16 \pm 0,08$
15	18306	1983	$0,30 \pm 0,09$	44	30001	2000	$0,18 \pm 0,09$
16	18403	1984	$0,25 \pm 0,08$	45	30402	2004	<0,1
17	18405	1984	<0,1	46	30501	2005	$0,12 \pm 0,06$
18	18406	1984	<0,1	47	30701	2007	<0,1
19	18407	1984	<0,1	48	38302	1983	$0,14 \pm 0,06$
20	18409	1984	$0,20 \pm 0,07$	49	38305	1983	$0,16 \pm 0,06$
21	18505	1985	$0,22 \pm 0,07$	50	38306	1983	$0,32 \pm 0,10$
22	19107	1991	$0,13 \pm 0,06$	51	38307	1983	$0,22 \pm 0,07$
23	19201	1992	$0,15 \pm 0,06$	52	38409	1984	$0,20 \pm 0,07$
24	20201	2002	$0,22 \pm 0,07$	53	38501	1985	$0,26 \pm 0,08$
25	20601	2006	$0,22 \pm 0,07$	54	38805	1999	$0,15 \pm 0,06$
26	20901	2009	$0,12 \pm 0,06$	55	39101	1991	$0,22 \pm 0,07$
27	21001	2010	$0,23 \pm 0,08$	56	39103	1991	$0,25 \pm 0,08$
28	21501	2015	$0,16 \pm 0,07$	57	39601	1996	$0,18 \pm 0,07$
29	28012	1980	$0,24 \pm 0,08$	58	39901	1999	$0,16 \pm 0,08$

Оценка уровня глобальных выпадений плутония осложнялась выбором подхода учета образцов с содержанием  $^{239+240}\text{Pu}$  ниже предела обнаружения. Поэтому при обработке данных средние значения рассчитаны тремя способами:

- с использованием значения предела обнаружения в качестве истинной концентрации с погрешностью в 100%,
- с приравниванием концентраций ниже предела обнаружения к нулю (оценка снизу),

- без учета образцов, со значением ниже предела обнаружения (оценка сверху).

Результаты расчета концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах почвы, обусловленных глобальными выпадениями представлены в таблице 10. Приведенные погрешности среднего значения рассчитаны как среднеквадратические отклонения.

Таблица 10 — Уровень глобальных выпадений  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах Восточно-Европейской равнины

Радионуклид	$^{239+240}\text{Pu}$	
	Бк/кг	Бк/м <sup>2</sup>
Единицы измерения		
Диапазон (min–max)	<0,1–0,5	<30–150
Среднее геометрическое, рассчитанное с использованием значение предела обнаружения, как истинная концентрация	$0,17 \pm 0,09$	$52 \pm 26$
Среднее арифметическое, рассчитанное с использованием значение предела обнаружения, как истинная концентрация	$0,18 \pm 0,09$	$55 \pm 26$
Среднее арифметическое, рассчитанное с приравниванием данных меньше предела обнаружения к нулю	$0,16 \pm 0,11$	$49 \pm 33$
Среднее арифметическое, рассчитанное без учета данных ниже предела обнаружения	$0,21 \pm 0,08$	$64 \pm 25$

Из таблицы 10 следует, что, несмотря на три разных способа расчета средних концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах почвы, величины средних значений находятся в пределах погрешности. Следовательно, можно считать, что концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах Восточно-Европейской равнины, обусловленная глобальными выпадениями составляет  $0,18 \pm 0,09$  Бк/кг, что с учетом 95 % содержания плутония в 20 см слое почв (рисунок 1) и плотности почвы соответствует  $55 \pm 26$  Бк/м<sup>2</sup>.

Таким образом, несмотря на некоторую неоднородность глобальных выпадений плутония, связанную с широтной зависимостью, ландшафтно-геохимическими особенностями территории и возможное перераспределение радионуклидов в почве, в ходе настоящей работы установлены уровни глобальных выпадений для территории Восточно-Европейской равнины. Полученные значения

уровня глобальных выпадений плутония позволяют дать оценку о правильности выбора фоновых территорий, а также определить границы территорий, находящихся под влиянием дополнительных источников поступления радионуклидов.

При оценке содержания изотопов плутония в зонах влияния радиационно опасных объектов следует учитывать, что концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  превышающая 0,27 Бк/кг или плотности выпадений свыше 81 Бк/м<sup>2</sup> могут свидетельствовать как о наличии пространственного перераспределения плутония, так и о наличии дополнительного привноса плутония от локальных источников и требуют более внимательного изучения.

Полученный в ходе настоящего исследования уровень глобальных выпадений плутония для территории Восточно-Европейской равнины в  $55 \pm 26$  Бк/м<sup>2</sup> является близким по значению к величине глобального выпадения плутония для северного полушария, полученного в ходе литературного анализа в 65 Бк/м<sup>2</sup> (таблица 2).

Основные результаты данной работы были опубликованы в [133, 134].

### **3.2. 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 аварии на Чернобыльской АЭС**

#### **3.2.1. Содержание плутония в почвах зон влияния Билибинской и Белоярской атомных станций**

Анализ литературных данных свидетельствует о крайне малых количествах плутония в выбросах атомных станций, а для некоторых АЭС о полном отсутствии информации по его выбросам. Некоторое количество его изотопов могут поступать со сбросами АЭС, однако территории загрязнения в данном случае локализованы

и сопряжены с водными объектами. Однако, поступление плутония может также происходить при аварийных ситуациях на АЭС, в том числе аварийных выбросов и сбросов.

Например, на Билибинской атомной теплоэлектростанции (АТЭС) был зафиксирован ряд инцидентов, включая:

- 1991 год — авария с массовым выходом из строя опускных труб барабана-сепаратора;
- 10.07.1991 года — утечка жидких радиоактивных отходов при транспортировке в хранилище (3-й уровень по шкале INES);
- 20.09.1991 года — повторная утечка РАО.

Во время работы Белоярской атомной станции были также зафиксированы инциденты:

- 31.12 1978 года произошёл пожар в машинном зале энергоблока № 2;
- 22.12.1992 года произошла утечка радиоактивных вод, которая попала в грунт и пруд-охладитель;
- 7.10.1993 года на третьем энергоблоке произошла разгерметизация вспомогательной системы первого контура в необслуживаемом помещении. За пределы технологического помещения энергоблока радиоактивные вещества не вышли.

По официальным данным, описанные инциденты не привели к серьезному загрязнению окружающей среды. Тем не менее, можно предположить, что некоторое количество плутония могло поступить в окружающую среду.

### **3.2.1.1. Содержание плутония в почвах зоны влияния Билибинской атомной станции**

#### **Общая радиозэкологическая характеристика территории**

Билибинская атомная станция расположена за полярным кругом в зоне вечной мерзлоты на территории Чукотского автономного округа, северо-востока Российской Федерации. Почвенный покров территории расположения атомной

станции характеризуются сочетанием горно-тундровых почв каменистых россыпей [135].

Билибинская АЭС является единственным источником теплоснабжения промышленных предприятий г. Билибино и жилого массива города. Кроме теплоснабжения Билибинская АЭС вырабатывает порядка 80 % электроэнергии, поставляемой потребителям Чаунского и Билибинского районов, а также Нижнеколымского улуса (Саха-Якутия). Количество выбросов и сбросов Билибинской атомной станции отражено в ежегодных экологических отчетах АО «Концерн Росэнергоатом», представленных в открытом доступе на сайте компании [136]. В представленных отчетах за последние 5 лет отсутствует информация о выбросах или сбросах плутония.

На территории размещения Билибинской АЭС и прилегающей территории радиусом до 100 км от станции регулярно проводится мониторинг, включая оценку содержания радионуклидов в объектах окружающей среды. Результаты многолетних мониторингов свидетельствуют, что радиоактивное загрязнение 100 км зоны влияния АЭС определяется в основном уровнями глобальных выпадений радионуклидов. Тем не менее, относительно высокие концентрации  $^{90}\text{Sr}$  были зафиксированы в ягеле (30 Бк/кг) и костях оленей (150 Бк/кг) [137].

По результатам шестилетних исследований территории Арктики отмечено, что в образцах почвы, лишайников и однолетней растительности Билибинского района фиксировались  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{108}\text{Ag}$ ,  $^{59}\text{Fe}$  [138]. В пробах лишайников и однолетней растительности в районе расположения Билибинской АЭС были зафиксированы концентрации  $^{137}\text{Cs}$ , превышающее в 2–4 раза его концентрации в пробах, отобранных на территории Чаунского района. Данные превышения авторы связывают с возможным влиянием выбросов Билибинской АЭС, из-за обнаруженных продуктов нейтронной активации, таких как  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  и другие, что свидетельствует о возможно пониженной эффективности систем фильтрации и очистки.

В отношении трансурановых элементов дать полноценную оценку в исследовании не представлялось возможным в связи с фиксированием следовых их

концентраций на уровне предела обнаружения, который в данных работах составлял 3-20 Бк/кг [138]. Однако, такой высокий предел обнаружения не обеспечивает возможность полноценной оценки в отношении изотопов плутония, поскольку превышает его уровень глобальных выпадений в десятки раз.

В литературе, описывающей исследования содержания радионуклидов в объектах окружающей среды для всей арктической территории, включая территорию размещения Билибинской АЭС, отсутствует информация о загрязнении изотопами плутония.

### Плутоний в почвах зоны влияния Билибинской АЭС

Отбор проб почвы и растительности в виде надземной части разнотравья был выполнен в 5 км зоне влияния Билибинской атомной станции. Отбор почвенных образцов проводили на глубину 10 см. Содержание плутония в образцах почвы 5 км зоны влияния Билибинской АЭС представлены таблице 11.

Таблица 11 — Концентрации изотопов плутония в почвах 5 км зоны влияния Билибинской АЭС

№ пп	Код образца	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	№ пп	Код образца	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг
1	БАЭС-2020-П-1-	$3,9 \pm 0,6$	7	БАЭС-2022-П-7	$28,0 \pm 4,0$
2	БАЭС-2020-П-2	$6,1 \pm 0,9$	8	БАЭС-2022-П-8	$34,0 \pm 5,0$
3	БАЭС-2020-П-3	$0,58 \pm 0,11$	9	БАЭС-2020-П-9	$0,71 \pm 0,13$
4	БАЭС-2020-П-4	$2,3 \pm 0,4$	10	БАЭС-2022-П-10	$1,0 \pm 0,25$
5	БАЭС-2020-П-5	$2,2 \pm 0,4$	11	БАЭС-2022-П-11	$0,60 \pm 0,15$
6	БАЭС-2020-П-6	$1,7 \pm 0,3$	<b>Диапазон</b>		<b>0,58–34,0</b>

В ходе исследования установлено, что диапазон концентраций изотопов плутония в образцах почвы 5 км зоны влияния Билибинской АЭС составляет 0,58–34,0 Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ . В среднем концентрация изотопов плутония в почве 5 км зоны влияния Билибинской АЭС оценивается в 2,1 Бк/кг  $^{239+240}\text{Pu}$ , что превышает уровень его глобальных выпадений. При этом выпадения плутония на рассматриваемой территории являются крайне неоднородными. Например, в двух

точках отбора в юго-западном направлении от Билибинской АЭС фиксировались концентрации плутония, превышающие уровень глобальных выпадений более чем в 10 раз, составляя 28 и 34 Бк/кг. Вероятнее всего данные концентрации не связаны со сбросами и выбросами Билибинской АЭС. Установление происхождения данных спорадических пятен требует дополнительных исследований.

Основные результаты данного исследования были представлены в работе [139]

### **3.2.1.2. Содержание плутония в почвах зоны влияния Белоярской атомной станции**

#### **Общая радиозэкологическая характеристика территории**

Белоярская АЭС (БАЭС) им. И. В. Курчатова — первенец большой ядерной энергетики СССР, является единственной в России атомной станцией с энергоблоками разных типов. БАЭС пущена в эксплуатацию в 1964 г.

К промышленной площадке Белоярской АЭС примыкает территория АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ). В связи со схожим составом выбросов и сбросов, при оценке воздействия на окружающую среду, указанные радиационно-опасные объекты, как правило, рассматриваются совместно.

Несмотря на отсутствие информации о количестве выбросов и сбросов изотопов плутония БАЭС в ежегодных экологических отчетах АО «Концерн Росэнергоатом» [136], в литературе имеется ряд работ, посвященных оценке содержания радионуклидов, включая изотопы плутония, в объектах окружающей среды [140–145].

Почвенный покров 30-км зоны влияния Белоярской АЭС представлен дерново-подзолистыми и подзолистыми почвами на севере и центральной части, чернозёмами выщелоченными, чернозёмами оподзоленными и тёмно-серыми лесными почвами на юге. В долинах рек развиты аллювиальные луговые почвы и аллювиальные болотные почвы [146].

Территория 30-км зоны Белоярской АЭС ранжирована по уровню содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в объектах окружающей среды. Зона влияния БАЭС, включает в себя территории с максимальными концентрациями радионуклидов и буферную зону, на территории которой наблюдается падение концентраций радионуклидов в объектах окружающей среды. К зоне с максимальными концентрациями радионуклидов относится территория Ольховской болотно-речной системы, расположенной в 5 км к юго-востоку, в которую в течение длительного времени БАЭС сбрасывала слаборадиоактивные воды.

Исследования Ольховской болотно-речной системы свидетельствуют, что ее донные отложения загрязнены преимущественно радиоцезием. Большая часть 30-км зоны влияния БАЭС условно отнесена к фоновой территории. Исследования, проведенные на данной территории демонстрируют, что выбросы БАЭС не вносят ощутимого вклада в загрязнение наземных экосистем радионуклидами [141].

В среднем уровни загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  почв 30-км зоны влияния Белоярской АЭС оцениваются в  $0,9\text{--}5,2$  кБк/м<sup>2</sup>. Однако, на территории отмечаются два населенных пункта с повышенным содержанием цезия в образцах почвы — Режик с концентрацией  $^{137}\text{Cs}$  в  $7,6$  кБк/м<sup>2</sup> и Изумруд, для которого содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве оценивается в  $7,7$  кБк/м<sup>2</sup>, расположенных на расстоянии 5 и 24 км от БАЭС, соответственно [140].

Содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах г. Заречный находятся в пределах  $12\text{--}129$  Бк/м<sup>2</sup>, а 30-км зоны в  $8\text{--}165$  Бк/м<sup>2</sup> [141, 144]. Концентрация изотопов плутония в 0–5 см слое донных отложений Ольховской болотно-речной системы составляет  $0,1\text{--}8,9$  Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$  и  $0,4\text{--}12,8$  Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$  [145].

В исследовании [142] отмечается, что по состоянию на 1989 г. концентрации плутония в 5 см слое донных отложений Ольховской болотно-речной системы составляла  $<0,1\text{--}114,6$  Бк/кг, а в 2005  $<0,1\text{--}21,6$  Бк/кг. Авторы не дают объяснения снижения концентрации плутония. Также проведен анализ распределения плутония по глубине донных отложений в двух точках отбора до глубин 10 и 20 см. Установлено, что в илистых отложениях, для которых проведен анализ до глубины 10 см, около 90 % приходится на 0-5 см слой, составляя  $439$  Бк/м<sup>2</sup>, в то время как в



5-10 см слое содержание плутония оценивается в 49,6 Бк/м<sup>2</sup>. Для торфянистых образований проведенный анализ до глубины 20 см свидетельствует, что максимум содержания плутония смещен на глубину 5-10 см, составляя 70,2 Бк/м<sup>2</sup>.

Проведенный анализ распределения плутония по глубине в переувлажненных торфянисто-болотных почвах на глубину 20-25 см показал, что его содержание варьирует от 6,2 до 25,2 Бк/м<sup>2</sup> при достаточно равномерном его распределении по глубине до 25 см [142]. Для почвы плакора, представленного буроземом типичным минимальная концентрация плутония в 6,5 Бк/м<sup>2</sup> фиксировалась в 5 см слое. С увеличением глубины отмечается увеличение его концентрации. Максимальные значения в 60 Бк/м<sup>2</sup> наблюдаются на максимальной глубине отбора, которая составила 20 см.

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует, что содержание <sup>239+240</sup>Pu в 30-км зон Белоярской АЭС близко к фоновым значениям и варьирует в пределах 8–165 Бк/м<sup>2</sup>. Концентрации изотопов плутония в донных отложениях Ольховской болотно-речной системы характеризуются существенной изменчивостью величин во времени.

### **Плутоний в почвах зоны влияния Белоярской атомной станции**

Отбор образцов почв, донных отложений и наземной части растительности был выполнен в 30-км зоне влияния Белоярской атомной станции. Результаты анализа содержания изотопов плутония в почвах фоновых территорий 30-км зоны Белоярской АЭС представлены в таблице 12.

Данные таблицы 12 показывают, что в почвах фоновых территорий 30-км зоны влияния Белоярской атомной станции содержание <sup>239+240</sup>Pu составило <0,1–2,9 Бк/кг при среднеарифметическом значении равным ~0,36 Бк/кг.

Полученные в ходе настоящего исследования максимальные значения концентраций плутония в почве соответствуют ранее опубликованным значениям в 8–165 Бк/м<sup>2</sup> для территории г. Заречный, что с учетом средней плотности почвы и среднего распределения плутония по глубине почвенного горизонта (рисунок 1) составляет 0,1–2,0 Бк/кг [141, 144].

Таблица 12 — Концентрации изотопов плутония в почвах фоновых территорий 30-км зоны Белоярской АЭС

№ пп	Образец	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	№ пп	Образец	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг
1	Бл-П-1	$0,60 \pm 0,25$	10	Бл-П-10	$1,16 \pm 0,65$
2	Бл-П-2	$< 0,1$	11	Бл-П-11	$0,34 \pm 0,18$
3	Бл-П-3	$< 0,1$	12	Бл-П-12	$< 0,1$
4	Бл-П-4	$< 0,1$	13	Бл-П-13	$1,2 \pm 0,5$
5	Бл-П-5	$1,25 \pm 0,85$	14	Бл-П-14	$0,45 \pm 0,25$
6	Бл-П-6	$< 0,1$	15	Бл-П-15	$< 0,1$
7	Бл-П-7	$< 0,1$	16	Бл-П-16	$2,9 \pm 1,5$
8	Бл-П-8	$< 0,1$	17	Бл-П-17	$2,7 \pm 1,2$
9	Бл-П-9	$0,2 \pm 0,1$	18	Бл-П-18	$0,80 \pm 0,23$

Концентрации плутония в почве условно фоновых территорий 30-км зоны влияния Белоярской АЭС в целом имеют близкие значения к его уровню глобальных выпадений. Однако, присутствуют спорадические пятна повышенных концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$ , составляющие 2,7 и 2,9 Бк/кг. Следует отметить, что рассматриваемая территория характеризуется зоной влияния, помимо БАЭС, влиянием АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) и ФГУП «ПО «Маяк». В связи с этим достоверно определить источник происхождения выявленных спорадических пятен плутониевого загрязнения почв не представляется возможным.

Результаты анализа содержания плутония в 2 см слое почв и донных отложениях Ольховской болотно-речной системы представлены в таблице 13.

Данные таблицы 13 свидетельствуют, что диапазон концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах территории Ольховской болотно-речной системы составляет  $<0,1-33$  Бк/кг, при среднем содержании 5,5 Бк/кг, а в донных отложениях  $<0,1-26$  Бк/кг, при среднем значении 2,2 Бк/кг, что превышает уровень глобальных выпадений более чем в 10 раз.

Полученные в ходе настоящего исследования концентрации плутония в 2 см слое почв и донных отложений Ольховской болотно-речной системы более чем в

два раза превышают значения, представленные в публикации [142] и соответствуют данным за 2005 г публикации [145].

Таблица 13 — Концентрации изотопов плутония в 2 см слое почв и донных отложениях Ольховской болотно-речной системы

№ п/п	Образец	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	
		Донные отложения	Почва
1	ОБС-1	$26,0 \pm 3,6$	$26,0 \pm 3,6$
2	ОБС-3	$2,1 \pm 0,3$	$33,0 \pm 4,6$
3	ОБС-5	–	$2,7 \pm 0,4$
4	ОБС-6	$0,70 \pm 0,13$	$0,54 \pm 0,10$
5	ОБС-7	$0,35 \pm 0,12$	$2,6 \pm 0,4$
6	ОБС-8	$0,34 \pm 0,09$	$0,32 \pm 0,06$
7	ОБС-10	$0,16 \pm 0,05$	–
8	ОБС-11	–	$1,3 \pm 0,2$
9	ОБС-12	$<0,1$	–
10	ОБС-13	–	$1,5 \pm 0,2$
11	ОБС-14	$0,22 \pm 0,06$	$1,4 \pm 0,2$
12	ОБС-16	$0,34 \pm 0,09$	$1,7 \pm 0,3$
13	ОБС-18	$0,44 \pm 0,12$	$<0,1$
14	ОБС-19	–	$6,1 \pm 0,9$
15	ОБС-20	$0,55 \pm 0,09$	$2,5 \pm 0,4$
16	ОБС-21	–	$2,2 \pm 0,3$
17	ОБС-22	$0,61 \pm 0,11$	–
18	ОБС-23	$0,40 \pm 0,12$	$<0,1$
19	ОБС-25	$0,31 \pm 0,09$	–
20	ОБС-27	$<0,1$	–

В ходе работ проведен анализ распределения изотопов плутония по глубине керна донных отложений в двух точках Ольховского болота (рисунок 7).

В результате анализа распределения изотопов плутония по глубине керна донных отложений Ольховского болота (рисунок 7) установлено, что концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$ , превышающие уровень глобальных выпадений плутония, фиксируются вплоть до глубины 35–40 см в точке отбора ОБ-1. При этом наблюдается его нетипичное распределение по глубине. Например, максимальные значения концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в 94 Бк/кг наблюдаются на глубине 10–15 см, в то время как поверхностный слой 0–5 см характеризуется концентрацией плутония в

29 Бк/кг. Вероятнее всего, это связано с величиной его поступления в разные периоды, образованием нового слоя донных отложений и параметрами зоны повышенной инфильтрации вод [147].

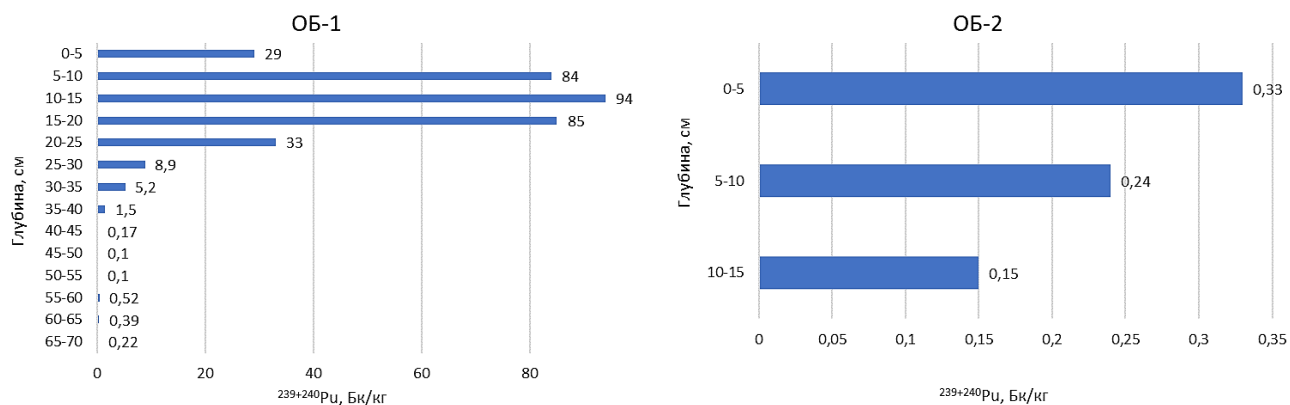


Рисунок 7 — Распределение плутония по глубине керна донных отложений Ольховского болота

В точке отбора ОБ-2 концентрация плутония находится на уровне фоновых значений, при этом наблюдается типичное для фоновых значений снижение его концентраций с глубиной.

Распределение плутония по глубине донных отложений в точке отбора ОБ-1 схоже с его распределением для торфянистых образований, представленных в [142], для которых более высокие концентрации наблюдаются с увеличением глубины отбора. Однако, в работе [142] проведен анализ до глубины 20 см, при этом максимальные концентрации наблюдались на глубине 5–10 см по состоянию на 2005 год. Полученные в ходе настоящего исследования данные свидетельствуют о смещении максимального содержания плутония в керна донных отложений на глубину 10–15 см, а его концентрации, превышающие уровень глобальных выпадений, фиксируются вплоть до глубины 35–40 см.

В точке отбора ОБ-2 максимальные концентрации плутония отмечаются в 5 см слое, как в случае илистых отложений работы [143].

Таким образом, в ходе исследования содержания изотопов плутония в почвах зоны влияния Белоярской АЭС установлено, что уровень концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в

почве условно фоновых территорий 30-км зоны влияния Белоярской АЭС близкий к уровню фоновых значений.

Содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах Ольховской болотно-речной системы варьирует от фоновых значений до значений, превышающих уровень глобальных выпадений более чем в 300 раз, составляя  $<0,1-33$  Бк/кг.

Установлено смещение максимальных значений концентраций плутония по глубине керна донных отложений (94 Бк/кг в 10-15 см слое), связанное с величиной его поступления в разные периоды, образованием новых слоев донных отложений и повышенной инфильтрацией вод.

Основные результаты данной работы были представлены в [139]

### **3.2.2. Содержание плутония в почвах территорий, подвергшихся чернобыльским выпадениям.**

Одним из наиболее значимых источников поступления искусственных радионуклидов являются выпадения вследствие аварии 1986 г на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Приблизительно 3,2 % территории постсоветского пространства были загрязнены в результате аварии  $^{137}\text{Cs}$  с плотностью, превышающей 37 кБк/м<sup>2</sup>. Большинство из загрязненных территорий вследствие аварии на ЧАЭС являются территориями сельскохозяйственного назначения.

Степень опасности чернобыльских выпадений в большей степени определяется  $^{137}\text{Cs}$ , в меньшей —  $^{90}\text{Sr}$  и в еще меньшей степени трансурановыми элементами, при этом соотношение  $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$  составляет  $(n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3)$  [8]. Следовательно, в настоящее время радиационную обстановку на загрязненных вследствие аварии на чернобыльской АЭС сельскохозяйственных угодьях России определяет  $^{137}\text{Cs}$  [148]. Вместе с тем авария на ЧАЭС привела к выбросу приблизительно 20 ТБк  $^{238}\text{Pu}$ , 15 ТБк  $^{239}\text{Pu}$ , 23 ТБк  $^{240}\text{Pu}$ , 3000 ТБк  $^{241}\text{Pu}$  и 0,04 ТБк  $^{242}\text{Pu}$  [47].

### **3.2.2.1. Содержание плутония в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, Республика Беларусь (ближняя зона чернобыльских выпадений)**

#### **Общая радиозэкологическая характеристика территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника**

Для исследования долгосрочных последствий аварии на территории белорусского сектора 30-километровой зоны Чернобыльской АЭС в 1988 году был создан Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, включающий части трех наиболее пострадавших районов — Брагинского, Наровлянского и Хойникского, общей площадью порядка 217 тыс. га, которая характеризуется высокими уровнями радиоактивного загрязнения [149]. Территория заповедника в основном представлена дерново-подзолистыми и низинными торфяно-болотными почвами [150].

Исследованию содержания плутония в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника посвящен ряд работ [8, 150-154]. Однако, большинство из них описывают территории, прилегающие к бывшим населенным пунктам Радин и Масаны. Более детальное исследование содержания плутония в почвах для всей территории заповедника приведено в [155]. Анализ данных литературных источников указывает на неоднородность выпадений плутония на всей территории ПГРЗ. В целом, концентрация плутония в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, на основе литературных данных, варьирует от  $n \cdot 10^{-1}$  Бк/кг для северных территорий, до  $n \cdot 10^2$  Бк/кг в южных частях заповедника.

#### **Плутоний в почвах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника**

Образцы почвы отбирали на участках сосновых насаждений искусственного происхождения территории ПГРЗ вблизи бывших населенных пунктов Масаны (Мс), Радин (Рн), Гнездинка (Гн), Кулажин (Кл), Ломыш (Лм), Бабчин (Бч),

а также за пределами заповедника на участках сосновых насаждений искусственного происхождения Козелужского лесничества Хойникского лесхоза. Места отбора проб представлены на рисунке 8.

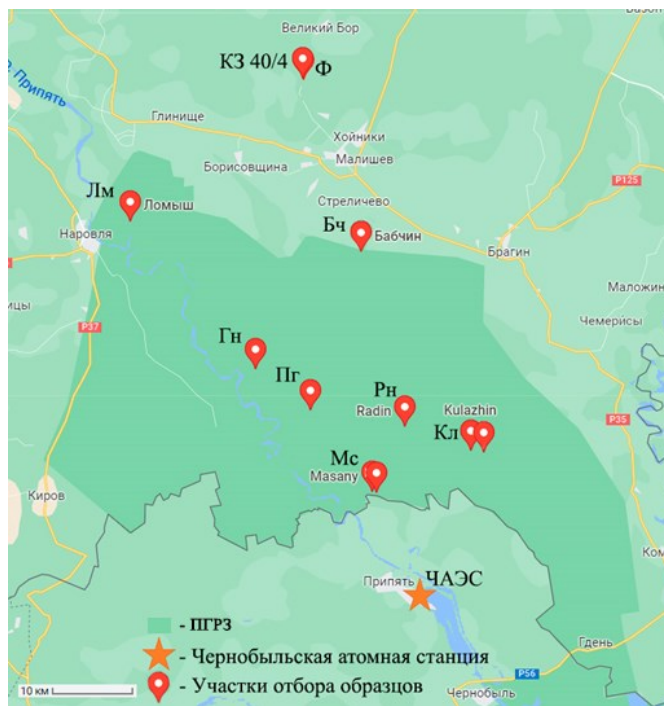


Рисунок 8 — Расположение участков отбора образцов почв и шишек сосны на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Расстояние между ближайшими участками отбора образцов на территории ПГРЗ составило ~10 км, а между дальними около 50 км. Каждый участок имел прямоугольную форму (50x50 м) с равнинным рельефом, расположен не менее 50 м от квартальной просеки, дороги, открытой стены леса, с характерным составом древесной растительности и почвенного покрова для исследуемого типа лесного насаждения. Почва на экспериментальных участках дерново-подзолистая, слабоподзоленная, развивающаяся на рыхлом мелкозернистом песке, подстилаемая рыхлым средне- или мелкозернистым песком. На каждом экспериментальном участке были отобраны образцы почвы на глубину 20 см.

Содержание плутония в образцах почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника и Козелужского лесничества Хойникского лесхоза представлены в таблице 14.

Таблица 14 — Концентрации изотопов плутония в почвах территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника и Козелужского лесничества Хойникского лесхоза

№ пп	Код образца	Концентрация Бк/кг				$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
		$^{239+240}\text{Pu}$	Среднее	$^{238}\text{Pu}$	Среднее	
1	КЗ 40/4	$4,0 \pm 0,6$	4,0	$1,4 \pm 0,2$	1,4	0,35
2	Ф	$5,2 \pm 0,8$	5,2	$2,0 \pm 0,3$	2,0	0,38
3	Бч	$8,1 \pm 1,2$	8,1	$0,82 \pm 0,15$	0,82	0,10
4	Лм	$22,0 \pm 3,3$	11,0	–	–	–
5		$1,8 \pm 0,3$		–		
6		$9,7 \pm 1,4$		–		
7	ГН	$6,7 \pm 1,0$	6,7	$2,0 \pm 0,3$	2,0	0,30
9	РН	$18,0 \pm 2,5$	27	$4,6 \pm 0,7$	12	0,44
10		$24,0 \pm 3,4$		$12,0 \pm 1,7$		
11		$38,0 \pm 5,3$		$19,0 \pm 2,7$		
12	Мс	$87 \pm 12$	110	$34,0 \pm 4,8$	45	0,41
13		$140 \pm 19$		$55,0 \pm 7,5$		
14	Кл	$6,4 \pm 1,0$	28	$1,5 \pm 0,2$	11	0,39
15		$40,0 \pm 5,6$		$15,0 \pm 2,1$		
16		$33,0 \pm 4,6$		$13,0 \pm 1,8$		
17		$20,0 \pm 2,8$		$6,6 \pm 1,0$		
18		$41,0 \pm 5,7$		$17,0 \pm 4,5$		

Концентрация изотопов плутония в образцах почвы территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника находится в пределах 1,8–141 Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$  и <0,82–55 Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$ .

Результаты анализа содержания изотопов плутония в почвах ПГРЗ свидетельствуют об неоднородности его выпадений на рассматриваемой территории, даже внутри обозначенных участков. Например, диапазон концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$  1,8–22 Бк/кг наблюдался на участке вблизи населенного пункта Ломыш, концентрации от 6,4 до 41 Бк/кг фиксируются на участке Кулажин



и 87–140 Бк/кг — на участке Масаны. Диапазон концентраций  $^{238}\text{Pu}$ , составляющий 4,6–19 Бк/кг наблюдался на участке вблизи бывшего населенного пункта Радин, 1,5–17 Бк/кг — на участке Кулажин и 34–55 Бк/кг — на участке Масаны.

На участках Козелужского лесничества Хойникского лесхоза, находящегося за пределами заповедника, концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  находится на уровне  $n \cdot 10^0$  Бк/кг, что на порядок превышает уровень глобальных выпадений, который составляет  $n \cdot 10^{-1}$  Бк/кг.

Среднее значение изотопного соотношения  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  для рассматриваемой территории составляет 0,35, что свидетельствует о существенном превышении  $^{238}\text{Pu}$  в почвах по сравнению с его присутствием в глобальных выпадениях, равном от 2 до 5 % от  $^{239+240}\text{Pu}$ .

Таким образом, в ходе исследования установлено, что уровень концентраций изотопов плутония в почвах ПГРЗ составляет 1,8–141 Бк/кг для  $^{239+240}\text{Pu}$  и <0,82–55 Бк/кг для  $^{238}\text{Pu}$ . Выпадения плутония для данной территории характеризуются как неоднородные. На участках Козелужского лесничества Хойникского лесхоза, находящегося за пределами Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  на порядок превышает уровень глобальных выпадений. Следовательно, повышенные концентрации плутония можно ожидать и на более отдаленных территориях чернобыльских выпадений.

Основные результаты работ представлены в [139, 155, 156].

### **3.2.2.2. Содержание плутония в почвах Калужской области (дальняя зона чернобыльских выпадений)**

#### **Общая радиозэкологическая характеристика территории**

На территории 9 административных районов Калужской области (Думиничский, Жиздринский, Кировский, Козельский, Куйбышевский, Людиновский, Мещовский, Ульяновский, Хвостовичский) выпали радиоактивные осадки чернобыльских выпадений. Преобладающими почвами области являются дерново-подзолистые почвы, в долинах рек развиты аллювиальные [157]. Площадь

загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  составляет более 16 % всей территории Калужской области. Наиболее сильному радиационному загрязнению подверглись южные территории области [158]. При этом отмечается «пятнистый» характер радиоактивных выпадений [159].

Плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  оценивается в 60–270 кБк/м<sup>2</sup>, что остается намного выше, чем на условно «фоновых» территориях области, которая составляет 37 кБк/м<sup>2</sup>. Наибольшая степень плотности выпадений фиксируется на территории лесных экосистем [160].

Оценка выпадения плутония чернобыльского происхождения на территории Калужской области [68, 161] выполнена расчетным методом, на основании отношения  $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$  для чернобыльских выпадений на европейской части России, которое в среднем оценивается в  $n \cdot 10^3$  [36]. Полноценной оценки содержания плутония в почвах Калужской области в литературных источниках не обнаружено.

### **Плутоний в почвах Калужской области**

Отбор образцов почвы проводили в 2021 г. вдоль Киевского шоссе (трасса М3) от границы Московской области до г. Калуга и далее вдоль автодороги 29К до границы с Брянской областью. Отдельно произведен отбор по трассе М3 в районе пятна чернобыльских выпадений [68]. Таким образом, территория отбора проб включает в себя территории глобальных выпадений (северные районы Калужской области) и территории чернобыльских выпадений (преимущественно южные районы). Координаты точек отбора представлены в таблице 15.

Отбор образцов почвы проводили на глубину 5 см. В 4 точках отбора выполнен послыйный отбор на глубину до 25 см с шагом в 5 см. Результаты анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах почвы территории Калужской области представлены в таблице 15.

Диапазон содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в 0–5 см слое почв Калужской области составляет от <0,1 до 0,47 Бк/кг.

Таблица 15 — Концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвах территории Калужской области

Код образца	Координаты	Глубина отбора	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг
1	2	3	4
КлП-21-1	55°15'46.8"N; 36°41'38.1"E	0–5	0,21 ± 0,066
КлП-21-3	54°52'39.41"N; 36°22'42.39"E	0–5	<0,1
КлП-21-4	54°44'42.6"N; 36°17'51.6"E	0–5	<0,1
КлП-21-5	54°36'41.8"N; 36°18'26.6"E	0–5	0,16 ± 0,05
КлП-21-6	54°21'09.1"N; 36°11'54.1"E	0–5	0,47 ± 0,15
КлП-21-7	54°23'26.6"N; 35°41'53.1"E	0–5	0,43 ± 0,13
		5–10	0,29 ± 0,09
		10–15	0,15 ± 0,047
		15–20	<0,1
		20–25	<0,1
КлП-21-8	54°19'22.0"N; 35°30'18.4"E	0–5	0,26 ± 0,081
КлП-21-9	54°16'52.2"N; 35°28'13.7"E	0–5	0,21 ± 0,066
КлП-21-10	54°16'12.55"N; 35°27'37.93"E	0–5	0,20 ± 0,062
		5–10	0,23 ± 0,072
		10–15	0,25 ± 0,078
		15–20	0,20 ± 0,062
		20–25	<0,1
КлП-21-11	54°15'01.5"N; 35°26'25.9"E	0–5	0,19 ± 0,059
КлП-21-12	54°16'05.3"N; 36°08'05.3"E	0–5	0,15 ± 0,047
КлП-21-13	54°13'30.8"N; 36°02'25.4"E	0–5	0,14 ± 0,044
КлП-21-14	54°12'36.0"N; 35°58'47.5"E	0–5	<0,1
КлП-21-15	54°11'08.1"N; 35°56'35.3"E	0–5	<0,1
КлП-21-16	54°09'52.2"N; 35°54'54.0"E	0–5	<0,1
КлП-21-17	54°06'47.9"N; 35°51'28.0"E	0–5	0,37 ± 0,12
		5–10	0,35 ± 0,11
		10–15	0,38 ± 0,12
		15–20	<0,1
		20–25	0,38 ± 0,12
КлП-21-18	54°04'58.9"N; 35°49'23.1"E	0–5	<0,1
КлП-21-19	53°56'48.3"N; 35°41'02.9"E	0–5	0,17 ± 0,053
КлП-21-20	53°48'15.5"N; 35°32'20.3"E	0–5	0,19 ± 0,059
КлП-21-21	53°45'28.9"N; 35°26'47.0"E	0–5	0,18 ± 0,056
КлП-21-22	53°43'34.9"N; 35°27'32.9"E	0–5	0,36 ± 0,11
КлП-21-23	53°41'06.4"N; 35°24'24.6"E	0–5	<0,1
КлП-21-24	53°39'24.3"N; 35°19'44.8"E	0–5	0,23 ± 0,072
КлП-21-25	53°38'34.6"N; 35°16'09.8"E	0–5	<0,1
КлП-21-26	53°37'09.8"N; 35°11'59.0"E	0–5	<0,1
КлП-21-27	53°34'13.9"N; 35°11'30.7"E	0–5	0,19 ± 0,059

Окончание таблицы 15

1	2	3	4
КлП-21-28	54°04'58.9"N; 35°49'23.1"E	0–5	<0,1
		5–10	0,19 ± 0,059
		10–15	0,16 ± 0,05
		15–20	0,16 ± 0,05
		20–25	0,15 ± 0,047
КлП-21-29	53°31'24.4"N; 35°10'34.5"E	0–5	<0,1
КлП-21-30	53°29'45.8"N; 35°08'09.5"E	0–5	0,19 ± 0,059
КлП-21-31	53°28'47.6"N; 35°06'51.3"E	0–5	<0,1
КлП-21-32	53°25'41.5"N; 34°55'40.8"E	0–5	0,16 ± 0,05
КлП-21-33	53°25'03.6"N; 34°52'29.4"E	0–5	<0,1

Анализ распределения плутония по глубине почвенного горизонта свидетельствует, что в точке отбора КлП-21-7 концентрация плутония снижается с глубиной. Однако, данное снижение имеет линейный характер, что является нетипичным распределением плутония по глубине (рисунок 1).

Для точки отбора КлП-21-10 концентрация плутония в 0,2–0,25 Бк/кг равномерно распределена до глубины 15–20 см с последующим резким падением до <0,1 Бк/кг. Такое распределение может быть объяснено перераспределением плутония в почве или нарушением почвенного покрова. Аналогичное распределение плутония по глубине наблюдается в точке отбора КлП-21-17 с диапазоном концентраций от 0,37 Бк/кг в 0–5 см слое до 0,38 Бк/кг в слое 20–25 см, при этом для слоя 15–20 см концентрация плутония составила <0,1 Бк/кг.

В точке отбора КлП-21-28 минимальное значение концентрации плутония фиксируется в поверхностном слое 0–5 см, которое составило <0,1 Бк/кг. С увеличением глубины пробоотбора плутоний относительно равномерно распределен вплоть до 25 см с концентрацией в 0,15–0,19 Бк/кг. Такое распределение нетипично и свидетельствует о нарушении почвенного покрова или специфичном его перераспределении.

С учетом средней плотности почв наиболее представленных для Калужской области почв в 1200 кг/м<sup>3</sup> [162] и полученного среднего содержания плутония в

5 см слое почвы произведен расчет выпадений  $^{239+240}\text{Pu}$  в Бк/м<sup>2</sup>. Ранжированные результаты выпадений представлены на рисунке 9.

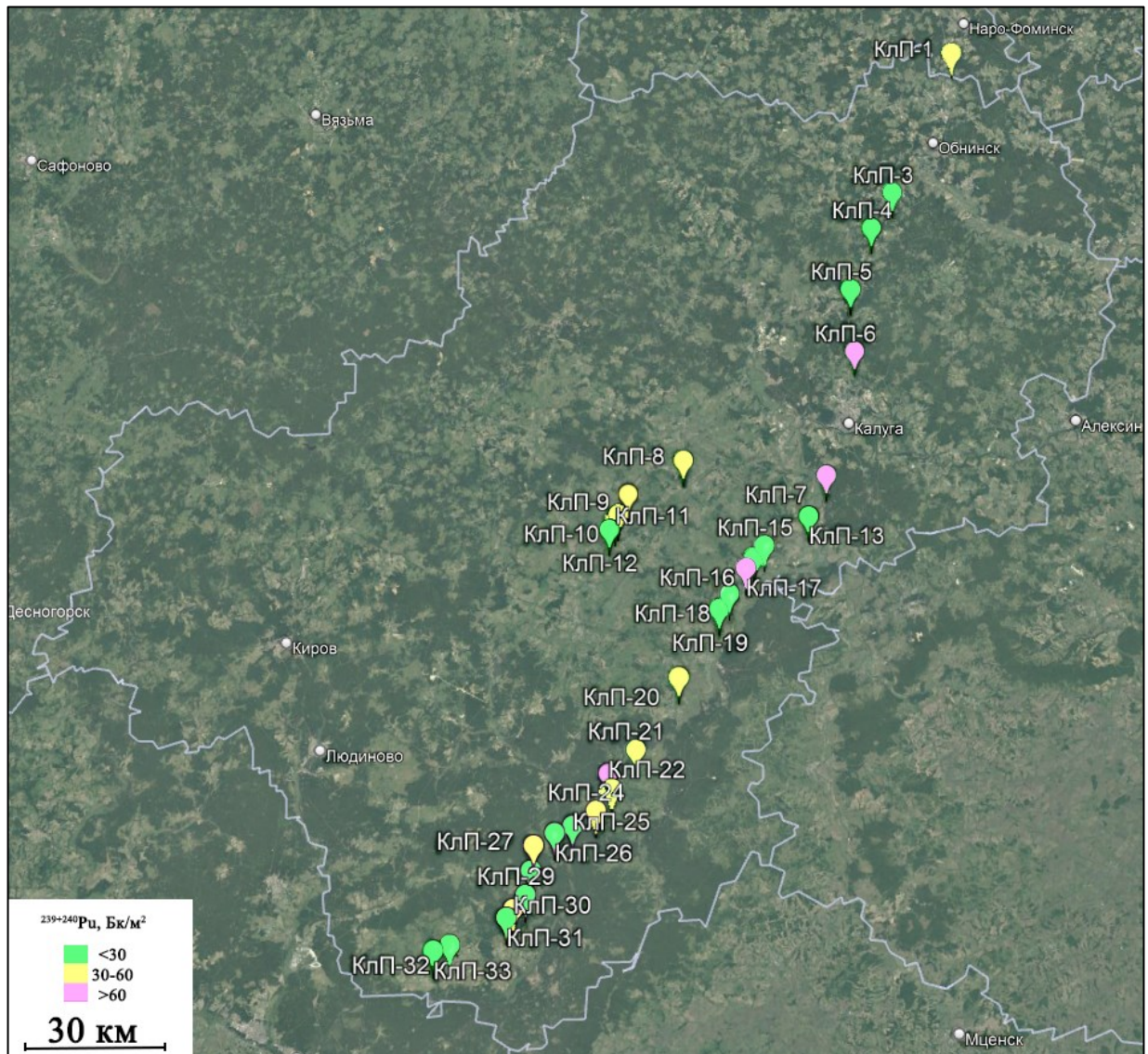


Рисунок 9 — Площадное загрязнение  $^{239+240}\text{Pu}$  территории Калужской области

По результатам расчета площадное загрязнение почв рассматриваемой территории изотопами плутония составляет 24–80 Бк/м<sup>2</sup>. Полученные значения площадного загрязнения близки к уровню его глобального выпадения в 55 Бк/м<sup>2</sup>. Таким образом, наиболее вероятно, что выявленные содержания обусловлены только глобальными выпадениями.

Основные результаты работ по оценке содержания плутония в почвенно-растительном покрове Калужской области представлены в [139, 163].

### **3.2.3. Содержание плутония в почвах территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск**

#### **Общая радиозэкологическая характеристика территории**

Одним из возможных источников поступления радионуклидов в окружающую среду являются хранилища радиоактивных отходов (РАО) и в особенности хранилища, созданные на заре развития атомной промышленности и не отвечающие современным требованиям радиационной безопасности [164]. В некоторых случаях на территориях таких хранилищ наблюдается утечка радиоактивных веществ из емкостей, что приводит к загрязнению радионуклидами объектов окружающей среды близлежащей территории [47].

Одним из первых хранилищ радиоактивных отходов на территории России является хранилище, расположенное в городе Обнинск, Калужская область, которое являлось пунктом захоронения с 1954 по 1961 гг. для предприятий ядерной промышленности, расположенных на территории Центрального региона [165]. На территории хранилища РАО размещены 4 емкости траншейного типа для хранения твердых радиоактивных отходов (ТРО), а также одна железобетонная емкость для сбора и хранения жидких радиоактивных отходов (ЖРО). С целью контроля за миграцией радионуклидов на близлежащей территории расположено 10 наблюдательных скважин [166].

В период с 1998 по 1999 гг. в пробах воды наблюдательных скважин фиксировалось увеличение активности  $^{90}\text{Sr}$ , что дало основание предположить утечку РАО из емкостей хранилища вследствие их разгерметизации. Частичное вскрытие емкостей хранения, подтвердило утечку радионуклидов из емкости № 4 за счет переполнения ее грунтовыми и поверхностными водами через разрушенное в гидроизоляции отверстие в боковой стенке, у дна [165]. В 1999 г. был проведен комплекс защитных инженерно-технических мероприятий по ликвидации обнаруженной утечки [167].

Дальнейший мониторинг показал наличие небольших локальных очагов загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  объектов окружающей среды прилегающей территории в радиусе

50 м от территории хранилища [165]. Например, в водах верховодки, выходящей из-под хранилища, фиксировался высокий уровень удельной активности  $^{90}\text{Sr}$ , который составлял 110 Бк/л. Значительное содержание  $^{90}\text{Sr}$  было обнаружено в почве и растительности до  $2,3 \cdot 10^4$  и 740 Бк/кг, соответственно.

На сегодняшний день отсутствует точная информация о составе радиоактивных отходов, захороненных на территории хранилища. Поскольку хранилище являлось пунктом захоронения для всего центрального региона России, где расположены предприятия, использующие плутоний содержащие материалы, можно предположить наличие загрязнения прилегающей к хранилищу территории и изотопами плутония.

### **Плутоний в почве территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО**

Отбор образцов почво-грунтов выполнен в период с 2020 по 2021 гг. между юго-восточной границей самого хранилища и заболоченной территорией вплоть до дороги улицы Дачная. Места отбора проб представлены на рисунке 10.

За пределами дороги в западном направлении от хранилища выбрана одна точка отбора для оценки самой дороги в качестве потенциального ландшафтно-геохимического барьера территории. Пробоотбор в южном направлении ограничен заболоченным притеррасным понижением, сильно обводненным в период отбора образцов.

Условия низинной территории не позволяли провести качественный отбор почвенных образцов как на глубину 5 см, так и до глубины 95 см в силу перекрестного загрязнения при перемешивании образцов с водой. Кроме того, к югу от болотистой местности доступ для отбора почвенного материала ограничивался закрытой территорией очистных сооружений (рисунок 10).





*Вся территория*



*50-м зона от границы хранилища*

Рисунок 10 — Места отбора проб почвы и растительности территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск

Результаты анализа содержания изотопов плутония в 5 см слое почв представлены в таблице 16.



Таблица 16 — Результаты определения плутония в образцах 5 см слоя почвы территории, прилегающей к хранилищу РАО

№	Точка	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	$^{238}\text{Pu}$ , Бк/кг	№	Точка	$^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	$^{238}\text{Pu}$ , Бк/кг
1	ХР-1	$8,6 \pm 1,5$	<0,1	10	ХР-10	$0,28 \pm 0,09$	<0,1
2	ХР-2	$7,9 \pm 1,6$	<0,1	11	ХР-11	$0,42 \pm 0,13$	<0,1
3	ХР-3	$5,3 \pm 0,8$	<0,1	12	ХР-12	$0,59 \pm 0,12$	<0,1
4	ХР-4	$6,1 \pm 2,4$	<0,1	13	ХР-13	<0,1	<0,1
5	ХР-5	$5,0 \pm 0,7$	0,46	14	ХР-14	<0,1	<0,1
6	ХР-6	$9,6 \pm 2,4$	0,45	15	ХР-15	$0,83 \pm 0,17$	<0,1
7	ХР-7	$3,7 \pm 0,4$	<0,1	16	ХР-16	$0,45 \pm 0,14$	<0,1
8	ХР-8	$0,48 \pm 0,15$	<0,1	17	ХР-17	<0,1	<0,1
9	ХР-9	$4,5 \pm 0,72$	<0,1	Среднее		3,8	–

Диапазон концентраций плутония в поверхностном слое почвы (0–5 см) территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО г. Обнинск, составил <0,15–9,6 Бк/кг, при среднем значении 3,8 Бк/кг (таблица 16), что значительно превышает уровень его глобальных выпадений. При этом высокие концентрации плутония в 5 см слое почв ограничиваются ~50 м зоной от границы хранилища РАО, для которой среднее содержание  $^{239+240}\text{Pu}$  оценивается в 6,7 Бк/кг, что свидетельствует о привнесении плутония от дополнительного источника.

За пределами 50 м зоны наблюдается резкое (до одного порядка величины) снижение концентраций плутония в 5 см слое почв до фоновых значений.

Кроме того, в образцах почвы точек отбора ХР-5 и ХР-6 фиксируется наличие  $^{238}\text{Pu}$  в количествах, относительное содержание которого достигает 10 % от содержания  $^{239+240}\text{Pu}$ . В то время как для глобальных выпадений процентное содержание  $^{238}\text{Pu}$  составляет от 2 до 5 % от  $^{239+240}\text{Pu}$ . Присутствие  $^{238}\text{Pu}$  в количествах в 2 раза превышающих глобальные уровни указывает, что обнаруженные изотопы  $^{238}\text{Pu}$  в почвах точках отбора ХР-5 и ХР-6 не могут быть отнесены к плутонию глобальных выпадений, что также свидетельствует о наличие дополнительного источника.

Таким образом, можно сделать вывод, что источником плутония на рассматриваемой территории является хранилище РАО. Территория плутониевого загрязнения поверхностных слоев почвы ограничивается 50 м зоной.

Для дополнительной оценки механизма поступления плутония проведено исследование распределения изотопов плутония по глубине почвенного горизонта. Распределение концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$  по глубине почв в точках отбора ХР-4, ХР-5, ХР-7, ХР-15, ХР-16 представлено на рисунке 11.

Анализ вертикального распределения концентраций изотопов плутония по профилю почвы показал, что для территории на расстоянии 50 м от границы хранилища РАО в юго-западном направлении наблюдаются концентрации плутония, превышающие его уровень глобальных выпадений более чем на порядок, вплоть до глубины 95 см. При этом распределение  $^{239+240}\text{Pu}$  по глубине почвенного горизонта носит рандомный характер.

Вместе с тем прослеживается изменение концентрации плутония на глубине  $> 80$  см в зависимости от расстояния от границы хранилища. Так в точке отбора ХР-4 (рисунок 10) пиковые значения концентраций плутония в почво-грунтах, равные 14 Бк/кг, наблюдаются на глубине отбора, составляющей 90 см. На порядок меньше его концентрации в почве на глубине 80-95 см, составляющие 1,3–2,7 Бк/кг в точке отбора ХР-5 и 0,96–1,1 Бк/кг в точке отбора ХР-7.

С последующим удалением точки отбора от границы хранилища РАО наблюдается снижение концентрации плутония по глубине почвенного горизонта. Так для точки отбора ХР-15 значимые величины концентрации плутония наблюдаются до глубины 35 см, а в точке отбора ХР-16 до 25 см.

В наиболее отдаленной точке отбора образцов ХР-17, находящейся за дорогой улицы Дачная, плутоний не обнаружен всему профилю почво-грунтов.

Необходимо подчеркнуть, что такое распределение по глубине почвенного горизонта нетипично для искусственных радионуклидов. Например, при глобальных выпадениях плутония как правило наблюдается резкое уменьшение по экспоненциальному закону его концентраций с глубиной, при этом около 95 % плутония приходится на 20 см слой почвы (рисунок 1). Для чернобыльских

выпадения на залежных землях ПГРЗ 80 % плутония приходится на верхний 5 сантиметровый слой [106]

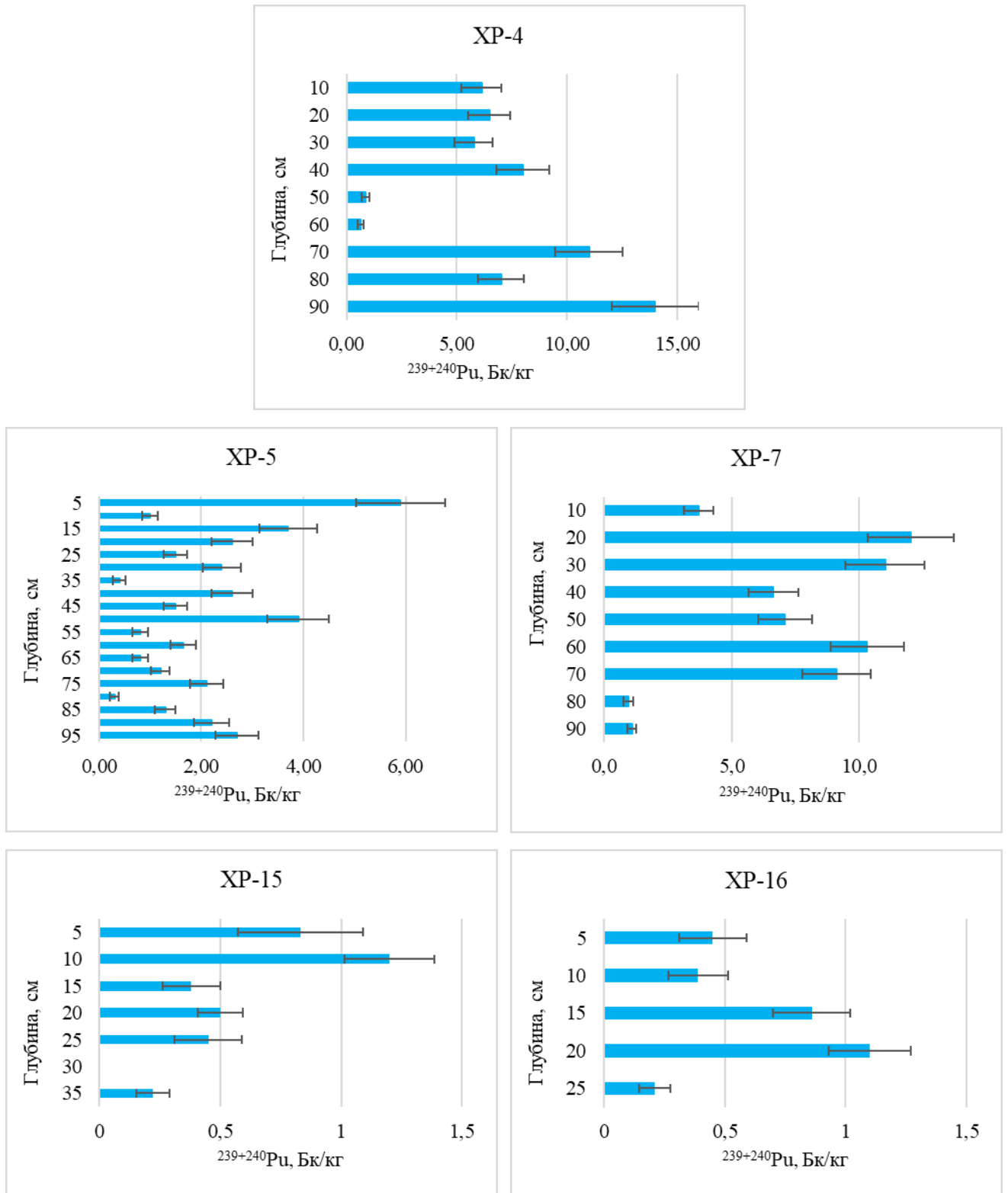


Рисунок 11 — Распределение концентраций  $^{239+240}\text{Pu}$  по глубине почве территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск

Хаотическое вертикальное распределение плутония по почвенному горизонту указывает на его поступление с грунтовыми водами. При этом участок распространения загрязнения, вероятнее всего, ограничивается 50-метровой территорией к юго-западу от границы хранилища РАО.

Таким образом, в ходе проведения работ установлено, что площадь загрязнения изотопами плутония ограничивается 50 м зоной к юго-западу от границы хранилища РАО г. Обнинск. В обозначенной зоне загрязнения наблюдаются концентрации изотопов плутония до глубины 95 см, превышающие уровень его глобальных выпадений более чем на порядок величины. Хаотическое вертикальное распределение указывает на его поступление с грунтовыми водами.

Основные результаты данной работы опубликованы в [139, 168–171].

## **ГЛАВА 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ РАСТЕНИЯМИ**

### **4.1. Закономерности накопление плутония дикорастущей растительностью**

#### **4.1.1. Накопление плутония разнотравьем в зоне влияния атомных станций**

Различия почвенно-геохимических и климатических условий, а также ландшафтных параметров территорий размещения атомных станций определяют характеристики накопления радионуклидов, включая изотопы плутония, в объектах окружающей среды, в том числе и в растительном покрове.

Различия климатических характеристик территорий, прилегающих к АЭС, обуславливают разные условия переноса радионуклидов, а также перераспределения вследствие накопления их растительностью. Например, в работе [172] проведено ранжирование территорий АЭС по сорбционной способности верхнего слоя почв, определяемой составом коллоидов, содержанием тонкодисперсных фракций, рН и др., в порядке убывания: Курская АЭС — Нововоронежская АЭС — Ростовская АЭС — Балаковская АЭС — Белоярская АЭС — Смоленская АЭС — Калининская АЭС — Ленинградская АЭС — Кольская АЭС — Билибинская АЭС.

Кроме того, помимо климатических факторов, на процесс накопления радионуклидов, включая плутоний, влияет состав выбросов и сбросов, который определяет формы поступления их в окружающую среду.

#### **Билибинская атомная станция**

Исследования радиационной обстановки на территории Арктической зоны Российской Федерации, на которой расположена Билибинская АЭС, показало, что радиоэкологическая ситуация по состоянию на 2019 год в целом была стабильной. Однако, в литературе представлен ряд работ, описывающих радиоактивное загрязнение Арктической зоны [137, 138, 173–175]. Большую роль в этом процессе играют размещенные на территории полигоны по испытанию

ядерного оружия, пункты захоронения радиоактивных отходов, атомные военно-морские базы, Северный флот, атомные электростанции, в том числе плавучие.

Билибинская АЭС является атомной электростанцией, расположенной за Полярным кругом в регионе с самыми суровыми климатическими условиями, аналогов которой нет. Регион отличается экстремальными климатическими условиями. Зима длится более 10 месяцев в году, зимняя температура иногда достигает – 55. Кроме того в зимний период темно круглые сутки. Территория, окружена сотнями километров огромных озер и болот.

Многочисленные исследования показывают, что в зоне многолетней мерзлоты арктические экосистемы, вследствие низких температур, ограниченных осадков, а также длительной полярной ночи, характеризуются низкой скоростью биологических процессов, что в свою очередь приводит к ее уязвимости от антропогенного воздействия. При этом после завершения или снижения антропогенного воздействия арктические экосистемы очень медленно восстанавливаются.

Отбор образцов растительности в виде надземной части разнотравья, сопряженный с отбором проб почвы, был выполнен в 5 км зоне влияния Билибинской АЭС. Содержание и расчетные коэффициенты накопления плутония в образцах разнотравья представлены таблице 17.

Таблица 17 — Коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  разнотравьем 5 км зоны влияния Билибинской атомной станции

Образец	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в почве мест отбора, Бк/кг	Кн
БАТЭЦ-2022-Р-10	<0,001	1,0±0,25	<1,0·10 <sup>-3</sup>
БАТЭЦ-2022-Р-11	<0,001	0,60±0,15	<1,6·10 <sup>-3</sup>

Из таблицы 17 следует, что концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах надземной части разнотравья рассматриваемой территории ниже предела обнаружения и оценивается в <0,001 Бк/кг. А значения коэффициента накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  оцениваются в < n·10<sup>-3</sup>.

### Белоярская атомная станция

Климат региона Белоярской АЭС умеренно-континентальный с характерной резкой изменчивостью погодных условий, хорошо выраженными сезонами года. Рассматриваемый район относится к зоне достаточного увлажнения. Территория характеризуется обширными площадями водораздельных пространств, представляющих собой денудационную холмисто-увалистую поверхность выравнивания.

Ольховское болото и река Ольховка расположенные восточнее г. Заречный, являются местом произрастания лекарственных растений. Территория местами труднопроходима. На территории исследования доминируют дерново-подзолистые почвы с пятнами тёмно-серых лесных [140].

Результаты опубликованных исследований свидетельствуют, что в зоне влияния Белоярской АЭС распространены сосновые и сосново-березовые леса, территория которых составляет 85 %. Площадь агроэкосистем составляет 5,3 % [137, 140].

Отбор проб наземной растительности проводили на территории Ольховской болотно-речной системы. Содержание плутония в образцах растительности зоны влияния БАЭС представлены таблице 18.

Таблица 18 — Коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  растительностью территории Ольховской болотно-речной системы

Образец	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг		Кн
	Растительность	Почва	
<b>Надземная растительность</b>			
ОБС-1	<0,1	26	$<3,8 \cdot 10^{-3}$
ОБС-3	<0,1	33	$<3,0 \cdot 10^{-3}$

Данные таблицы 18 показывают, что концентрация изотопов плутония в образцах надземной части разнотравья территории Ольховской болотно-речной системы составляет <0,1 Бк/кг. А значения коэффициента накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  оценивается в  $<n \cdot 10^{-3}$ .

Таким образом, в ходе исследования установлено, что коэффициенты накопления надземной частью разнотравья зоны влияния атомных станций оцениваются в  $<n \cdot 10^{-3}$ .

#### **4.1.2. Накопление плутония дикорастущей растительностью территории, подвергшейся загрязнению в результате чернобыльских выпадений**

##### **Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (зона ближних чернобыльских выпадений)**

Территория Полесского государственного радиационно-экологического заповедника расположена в южной теплой агроклиматической области. Климат умеренно-континентальный, теплый, с достаточным количеством осадков, относительно мягкой зимой и теплым летом. Рельеф представляет плоскую низменную равнину с островными участками моренных и эоловых бугорков, в значительной мере заболоченную.

Продолжительность вегетационного периода (выше 5 °С) составляет 190–230 дней, начинается в первой-второй декаде апреля, а заканчивается в конце октября. В соответствии с лесорастительным районированием территории Республики Беларусь, леса заповедника относятся к южной подзоне широколиственно-сосновых лесов. Лесопокрытые земли составляют 110,4 тыс. га (51,1 % территории), из них сосновые леса занимают 43,9 %, березовые — 30,7 %, черноольшаники — 12,4 %, дубравы — 6,3 %, остальные лесонасаждения — 6,7 % [154].

Исследование накопления плутония выполнено для образцов шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), как наиболее распространенной древесной растительности, на участках сосновых насаждений искусственного происхождения территории ПГРЗ вблизи бывших населенных пунктов Масаны (Мс), Гнездинка (Гн), Кулажин (Кл), а также за пределами заповедника на участках сосновых насаждений искусственного происхождения Козелужского лесничества



Хойникского лесхоза (рисунок 8). Шишки сосны собирали по 18–20 шишек с дерева с 15–20 деревьев на каждом участке.

Концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах сосновых шишек ПГРЗ и Козелужского лесничества, а также расчетные значения  $K_n$  плутония (из соотношения к среднему значению его концентрации в почве, таблица 14) представлены в таблице 19.

Таблица 19 — Коэффициенты накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  сосновыми шишками

Код образца	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в сосновых шишках, Бк/кг	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в почве, Бк/кг	$K_n$
Козелужское лесничество Хойникского лесхоза			
КЗ 40/4	<0,001	4,0	$<2,5 \cdot 10^{-4}$
Ф	<0,001	5,2	$<1,9 \cdot 10^{-4}$
Полесский государственный радиационно-экологический заповедник			
ГН	$0,0013 \pm 0,00052$	6,7	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Кл	$0,0024 \pm 0,00096$	28	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Мс	$0,0041 \pm 0,0014$	110	$3,7 \cdot 10^{-5}$
		Среднее	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Из таблицы 19 следует, что коэффициент накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  шишками сосны обыкновенной ПГРЗ варьируется в диапазоне от  $1,9 \cdot 10^{-4}$  до  $3,7 \cdot 10^{-5}$ , при среднем значении  $1,0 \cdot 10^{-4}$ .

### **Калужская область (зона дальних чернобыльских выпадений)**

Климат Калужской области относится к умеренному климату с хорошо выраженными переходными сезонами, с теплым летом и умеренно холодной зимой, характеризующейся устойчивым снежным покровом. Калужская область относится к зоне достаточного увлажнения, с годовой суммой осадков около 550–650 мм, с колебанием в отдельные годы примерно от 270 до 900 мм. Область расположена на стыке лесной и лесостепной зон. Травянистая растительность, характеризуется большой разнообразностью.

Отбор образцов растительности в виде разнотравья (вместе с корневой системой) проводили сопряженно с четырьмя точками послыйного отбора образцов

(таблица 15). Результаты анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  и рассчитанные  $\text{Kn}(\text{Pu})$  в образцах разнотравья территории Калужской области представлены в таблице 20.

Таблица 20 — Концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  и рассчитанные  $\text{Kn}(\text{Pu})$  в образцах разнотравья территории Калужской области

№ пп	Код образца	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в образцах разнотравья, Бк/кг	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в 25 см слое почвы, Бк/кг	$\text{Kn}(\text{Pu})$
1	КлП-21-7	$0,0045 \pm 0,0020$	$0,21 \pm 0,065$	$(2,1 \pm 0,9) \cdot 10^{-2}$
2	КлП-21-10	$0,0055 \pm 0,0025$	$0,20 \pm 0,065$	$(2,7 \pm 1,2) \cdot 10^{-2}$
3	КлП-21-17	$0,0075 \pm 0,0034$	$0,32 \pm 0,099$	$(2,3 \pm 1,0) \cdot 10^{-2}$
4	КлП-21-28	$0,0066 \pm 0,0030$	$0,15 \pm 0,053$	$(4,4 \pm 2,0) \cdot 10^{-2}$
Среднее				$2,9 \cdot 10^{-2}$

В результате полученных данных, установлено, что диапазон  $\text{Kn}$  плутония разнотравьем (растение в целом) территории Калужской области составляет  $2,1 \cdot 10^{-2} - 4,4 \cdot 10^{-2}$ , при среднем значении  $2,9 \cdot 10^{-2}$ .

Основные результаты данной работы представлены в [163].

#### **4.1.3. Накопление плутония дикорастущей растительностью территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов, расположенному в г. Обнинск**

##### **Геоботаническое описание территории**

Рассматриваемая территория представлена склоном с лесной растительностью. На севере территория ограничена забором хранилища РАО, в 50 м на юг от хранилища находится заболоченное притеррасное понижение, за которыми расположены очистные сооружения, на западе смешанный лес вплоть до улицы Дачная.

Микрорельеф местности представляет собой склон с небольшими буграми. Почвенный покров территории представлен слабо развитыми дерновыми почвами. Мертвый покров характеризуется покрытием в 10 %, неравномерный, состоит из сухих листьев деревьев, сухой хвои, веток, полуразложившийся, мощностью в 1 см.

Фитоценоз территории представлен на рисунке 12.



А-Г – фотографии описываемой площадки, сделанные с нескольких ракурсов

Рисунок 12 — Фитоценоз территории, прилегающей к хранилищу РАО

Ассоциация: снытно-копытенево-зеленчуковая (*Galeobdolon luteum* L. + *Asarum europaeum* L. + *Aegopodium podagraria* L.) с древесным ярусом с преобладанием берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.) и вяза гладкого (*Ulmus laevis* Pall.). Степень сомкнутости крон древостоя 80 %, характеризуется равномерной густотой ярусов с небольшими окнами, с преобладанием следующих пород: Берёза повислая (*Betula pendula* Roth.), Ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H.Karst.), Ива ломкая (*Salix fragilis* L.). Состояние возобновляемого древостоя хорошее. Возобновление древостоя: клён остролистный (*Acer platanoides* L.), клён

ясенелистный (*Acer negundo* L.), черёмуха обыкновенная (*Prunus padus* L.), ель обыкновенная (*Picea abies* (L.) H.Karst.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), тополь дрожащий (*Populus tremula* L.).

Сомкнутость полога подлеска составляет 30 %. Преобладающими видами являются: лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H.Karst.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), смородина белая (*Ribes niveum* Lindl.), яблоня лесная (*Malus sylvestris* (L.) Mill.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), жимолость настоящая (*Lonicera xylosteum* L.), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.)

Общее проективное покрытие почвы травостоем 90 %, Высота травостоя составляет 41 см. Состояние травостоя характеризуется 3 ярусами. Средняя высота растений подъяруса: I подъярус — 78 см; II подъярус — 35 см; III подъярус — 10 см. Аспект ярко-зелёный от хорошо развитых вегетативных побегов трав, достаточно однородный, с редкими включениями жёлтых пятен от цветущей недотроги обыкновенной; преобладающие виды: Зеленчук жёлтый (*Galeobdolon luteum* L.), Копытень европейский (*Asarum europaeum* L.), Сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.). Общее число травянистых видов — 25.

### **Накопление плутония растительностью**

Отбор образцов растительности выполнен в 2021–2022 годах в пределах 50-м зоны от границы хранилища. Условно территория отбора растительного материала поделена на 2 микроучастка с центрами отбора в точках ХР-4 и ХР-7 (рисунок 10).

На территории обоих микроучастков отобраны образцы древесной, кустарниковой и травянистой растительности наиболее представительных видов.

Отбор образцов растительности осуществляли с разделением на вегетативные органы растений. Травянистую растительность разделяли на надземную часть и корневую систему. Для кустарников проведен отбор образцов листвы, ветвей разной толщины и корневой системы. Отбор образцов древесной растительности разделяли на хвою/листья, побеги и ветви разного диаметра.

Отдельно для ивы ломкой проведен отбор структурных элементов ствола дерева (древесина, кора), а также отобраны образцы мха со ствола дерева.

Результаты анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах травянистой, кустарниковой и древесной растительности представлены в таблицах 22, 23 и 24, соответственно.

Таблица 22 — Концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  и рассчитанные коэффициенты накопления плутония травянистой растительностью

Вид	Год отбора	Точка отбора	Сухая масса, г	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг		Кн
				растение	почва	
Надземная часть						
Бурда плющевидная	2022	ХР-7	39,4	$0,041 \pm 0,008$	$7,9 \pm 1,2$	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Копытень европейский	2022	ХР-4	59,2	$0,051 \pm 0,010$	$6,3 \pm 0,9$	$8,1 \cdot 10^{-3}$
	2021	ХР-4	69,3	$0,046 \pm 0,009$	$6,3 \pm 0,9$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
Лопух большой	2021	ХР-4	53,3	$0,005 \pm 0,001$	$6,3 \pm 0,9$	$7,9 \cdot 10^{-4}$
Папоротник кочедыжник	2022	ХР-7	35,2	$0,05 \pm 0,01$	$7,9 \pm 1,2$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
Сныть обыкновенная	2022	ХР-4	53,5	$0,034 \pm 0,007$	$6,3 \pm 0,9$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Тысячелистник обыкновенный	2021	ХР-7	85,1	$0,025 \pm 0,005$	$7,9 \pm 1,2$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Хвощ зимующий	2022	ХР-7	138,1	$0,12 \pm 0,02$	$7,9 \pm 1,2$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
					Диапазон	$7,9 \cdot 10^{-4}$ – $1,5 \cdot 10^{-2}$
					Среднее	$7,3 \cdot 10^{-3}$
Корневая система						
Бурда плющевидная	2022	ХР-7	10,9	$0,21 \pm 0,04$	$7,9 \pm 1,2$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
Копытень европейский	2022	ХР-4	49,5	$0,079 \pm 0,016$	$6,3 \pm 0,9$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	2021	ХР-4	25,8	$0,067 \pm 0,013$	$6,3 \pm 0,9$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Хвощ зимующий	2022	ХР-7	16,2	$0,17 \pm 0,03$	$7,9 \pm 1,2$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
					Диапазон	$1,1 \cdot 10^{-2}$ – $2,7 \cdot 10^{-2}$
					Среднее	$1,8 \cdot 10^{-2}$

Таблица 23 — Концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  и рассчитанные коэффициенты накопления плутония кустарниками

Вид	Часть растения	Год	Точка отбора	Сухая масса, г	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг		Кн
					растение	почва	
Смородина белая	листья	2022	ХР-4	17,1	$0,079 \pm 0,016$	$6,3 \pm 0,9$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	ветви			48,0	$0,06 \pm 0,01$		$9,5 \cdot 10^{-3}$
	корни			21,9	$0,19 \pm 0,04$		$3,0 \cdot 10^{-2}$
	кисти с ягодами		ХР-7	12,0	$0,90 \pm 0,18$	$7,9 \pm 1,2$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
	листья			32,6	$0,077 \pm 0,015$		$9,8 \cdot 10^{-3}$
	ветви			77,7	$0,027 \pm 0,005$		$3,4 \cdot 10^{-3}$
	корни	46,1		$0,21 \pm 0,05$	$2,7 \cdot 10^{-2}$		
Лещина обыкновенная	листья	2022	ХР-4	147	$0,56 \pm 0,11$	$6,3 \pm 0,9$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	ветви <0,5 см			161	$0,028 \pm 0,006$		$4,4 \cdot 10^{-3}$
	ветви 0,5-3 см			82	$0,065 \pm 0,01$		$1,0 \cdot 10^{-2}$
	ветви 3-6 см			114	$0,066 \pm 0,01$		$1,1 \cdot 10^{-2}$
	листья	ХР-7	33,6	$0,035 \pm 0,007$	$7,9 \pm 1,2$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	
	ветви <0,5 см		118	$0,054 \pm 0,011$		$6,8 \cdot 10^{-3}$	
	ветви 0,5-3 см		111	$0,027 \pm 0,006$		$3,4 \cdot 10^{-3}$	
	ветви и листья		2021	137		$0,033 \pm 0,007$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Кустарники	кисти с ягодами	среднее					$1,1 \cdot 10^{-1}$
	листья	диапазон					$4,4 \cdot 10^{-3}$ – $8,9 \cdot 10^{-2}$
		среднее					$2,9 \cdot 10^{-2}$
	ветви	диапазон					$3,4 \cdot 10^{-3}$ – $1,1 \cdot 10^{-2}$
		среднее					$6,9 \cdot 10^{-3}$
	корни	диапазон					$2,7 \cdot 10^{-2}$ – $3,0 \cdot 10^{-2}$
среднее					$2,9 \cdot 10^{-2}$		

Таблица 24 — Концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  и рассчитанные коэффициенты накопления плутония древесной растительностью

Вид	Часть растения	Год отбора	Точка отбора	Сухая масса, г	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	Кн
Береза повислая	ветви с листьями	2021	ХР-4	142	$0,031 \pm 0,0062$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	ветви 1-2 см	2022		118	$0,0084 \pm 0,0017$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	ветви 3-6 см			288	$0,025 \pm 0,005$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
	ветви в среднем					$2,5 \cdot 10^{-3}$
Ель обыкновенная	ветви с хвоей	2021	ХР-4	146	$0,13 \pm 0,026$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
	хвоя	2022		215	$0,09 \pm 0,02$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	побеги			6,4	$0,14 \pm 0,03$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
	ветви <0,5 см			190	$0,19 \pm 0,04$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
	ветви 0,5-3 см			101	$0,13 \pm 0,03$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
	ветви 3-6 см			353	$0,038 \pm 0,008$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
	ветви в среднем					$1,8 \cdot 10^{-2}$
Рябина обыкновенная	ветви с листьями	2021	ХР-4	171	$0,031 \pm 0,006$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	ветви <0,5 см	2022		191	$0,018 \pm 0,004$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
	ветви 0,5-3 см			108	$0,032 \pm 0,006$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
	ветви 3-6 см			25,6	$0,10 \pm 0,02$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	ветви в среднем					$7,4 \cdot 10^{-3}$
Ива ломкая	листья	2022	ХР-7	129	$0,46 \pm 0,10$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
	побеги			80,6	$0,048 \pm 0,010$	$7,1 \cdot 10^{-3}$
	ветви <0,5 см			189	$0,0034 \pm 0,0007$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
	ветви 0,5-3 см			224	$0,010 \pm 0,002$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	ветви 3-6 см			223	$0,020 \pm 0,004$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	ветви > 10 см			222	$0,016 \pm 0,003$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	ветви в среднем					$1,8 \cdot 10^{-3}$
	древесина	2022	ХР-7	145	<0,0001	$<1,5 \cdot 10^{-5}$
	кора			116	$0,054 \pm 0,011$	$7,9 \cdot 10^{-3}$
	мох (на коре)			29,1	$0,27 \pm 0,05$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Деревья	листья/ хвоя				диапазон	$1,3 \cdot 10^{-2}$ – $6,8 \cdot 10^{-2}$
					среднее	$4,1 \cdot 10^{-2}$
	ветви				диапазон	$5,0 \cdot 10^{-4}$ – $2,8 \cdot 10^{-2}$
					среднее	$8,2 \cdot 10^{-3}$

Поскольку для рассматриваемой территории зафиксировано нетипичное распределение содержания плутония по глубине почвенного горизонта, расчет коэффициентов накопления для травянистой растительности и кустарников проводили по отношению к среднему значению концентрации  $^{239+240}\text{Pu}$  в 20 см слое почвы рассматриваемых микроучастков.

В отношении древесной растительности, для которой характерна более сложная корневая система, вследствие чего отсутствует возможность точного определения места питания конкретного дерева, расчет  $K_n$  плутония проведен по отношению к средней концентрации плутония по всей глубине обоих микроучастков, которая составила 6,8 Бк/кг (рисунок 11).

Анализ данных таблицы 22 свидетельствует, что для травянистой растительности территории, прилегающей к хранилищу радиоактивных отходов г. Обнинск, наблюдается существенное различие коэффициентов накопления плутония для надземной части растений, диапазон значений которых составил  $7,9 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-2}$ , при среднем значении, равном  $7,3 \cdot 10^{-3}$ .

Наиболее сильно накапливает изотопы плутония из проанализированных видов травянистой растительности хвощ зимующий, для которого коэффициент накопления плутония составил  $1,5 \cdot 10^{-2}$ . Самая маленькая величина  $K_n(\text{Pu})$  фиксируются для надземной части лопуха большого, составляющая  $7,9 \cdot 10^{-4}$ .

Необходимо отметить, что полученные  $K_n$  плутония для копытеня европейского в ходе настоящего исследования за 2021 и 2022 гг. имеют очень близкие значения, составляющие  $8,1 \cdot 10^{-3}$  и  $7,3 \cdot 10^{-3}$  для надземной части,  $1,3 \cdot 10^{-2}$  и  $1,1 \cdot 10^{-2}$  для корней, соответственно. Следовательно, разброс величин  $K_n(\text{Pu})$  копытнем европейским, полученных по результатам анализа за 2021 и 2022 год, не превышает 10 % для надземной части и 15 % для корневой системы. Малый разброс полученных  $K_n$  плутония для копытеня европейского в разные годы свидетельствует о достоверности полученных результатов.

В целом коэффициенты накопления плутония надземной частью травянистой растительности рассматриваемой территории находятся на уровне  $n \cdot 10^{-3}$ . При этом



наблюдается значительный разброс значений  $K_n(Pu)$  для наземной части травянистой растительности, который составляет два порядка.

Для корневой части травянистой растительности фиксируется меньший разброс значений  $K_n$  плутония. Полученные значения варьируются в пределах одного порядка величин — от  $1,1 \cdot 10^{-2}$  для копытня европейского до  $2,7 \cdot 10^{-2}$  для бурды плющевидной. В среднем величина  $K_n$  плутония корневой системой травянистой растительности оценивается в  $1,8 \cdot 10^{-2}$ .

Анализ накопления плутония рассматриваемыми видами кустарников показал хорошую сходимость полученных  $K_n$  разными частями смородины белой (таблица 23). Например, разброс величин коэффициентов накопления плутония для листьев и корневой системы составил 25 % и 10 %, соответственно. Однако для ветвей смородины белой разброс  $K_n(Pu)$  составил 60%. При этом накопление плутония как наземной частью так и корневой системой смородины белой микроучастка ХР-4 выше, чем микроучастка ХР-7.

Более интенсивное накопление плутония лещиной обыкновенной, как и для смородины белой, наблюдается на микроучастке ХР-4. При этом для лещины обыкновенной фиксируется достаточно большое расхождение в значениях  $K_n(Pu)$ . Например, для листьев кустарника данное расхождение составляет 95 %. Среднее значение расхождения  $K_n$  плутония для ветвей лещины обыкновенной оценивается в 60 %.

Наибольший  $K_n(Pu)$  у смородины белой наблюдается для кистей с ягодами, который составил  $1,1 \cdot 10^{-1}$ . В целом 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 ( $6,5 \cdot 10^{-3}$ ).

Аналогичное распределение  $K_n$  плутония наблюдалось для смородины черной территории пойменных участков р. Енисей: ягоды ( $5,6 \cdot 10^{-2}$ ) > корневая система ( $2,7 \cdot 10^{-2}$ ) > листья ( $2,6 \cdot 10^{-2}$ ) > ветви ( $1,0 \cdot 10^{-2}$ ) [109]. Вместе с тем, полученные в ходе исследования значения коэффициенты накопления плутония кистями с ягодами смородины белой на порядок превышает значение  $K_n(Pu)$  для ягод смородины черной, произрастающей на участке «Атаманово (остров)»

территории р. Енисей, а величина коэффициента накопления плутония ветвями на порядок ниже. В целом для территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск наблюдается более широкий диапазон накопления плутония разными частями смородины белой от  $n \cdot 10^{-3}$  до  $n \cdot 10^{-1}$ , в то время как для смородины черной территории участка «Атаманово (остров)» диапазон  $K_n(\text{Pu})$  находится в одном порядке величин, составляя  $n \cdot 10^{-2}$ .

Наиболее интенсивное накопление плутония в надземной части лещины обыкновенной наблюдаются у листьев с диапазоном величин  $K_n$  в  $4,4 \cdot 10^{-3}$ – $8,9 \cdot 10^{-2}$ , при среднем значении  $6,6 \cdot 10^{-2}$ . Коэффициент накопления ветвями варьирует от  $3,4 \cdot 10^{-3}$  до  $1,1 \cdot 10^{-2}$  со средним значением в  $7,1 \cdot 10^{-3}$ .

Анализ накопления плутония ветвями разного диаметра свидетельствует, что с увеличением диаметра ветвей наблюдается снижение величин  $K_n(\text{Pu})$ . Например, для лещины обыкновенной с микроучастка ХР-4  $K_n$  ветвями < 0,5 см составили  $4,4 \cdot 10^{-3}$ , что на 44 % ниже коэффициентов накопления ветвями в 0,5–3 и 3–6 см, составляющих  $1,0 \cdot 10^{-2}$  и  $1,1 \cdot 10^{-2}$ , соответственно. Для микроучастка ХР-7 разница в значениях  $K_n$  плутония ветвями < 0,5 см в  $6,8 \cdot 10^{-3}$  и 0,5–3 см в  $3,4 \cdot 10^{-3}$  составляет 50 %.

Результаты оценки накопления рассмотренными видами кустарников свидетельствуют, что диапазон коэффициентов накопления плутония варьируется от тысячных до сотых долей величины со средними значениями в  $n \cdot 10^{-2}$  для листьев и  $n \cdot 10^{-3}$  для ветвей. Для корневой системы диапазон накопления более узкий и находится в пределах сотых долей величины, составляя  $n \cdot 10^{-2}$ .

Анализ содержания плутония в древесной растительности (таблица 24), отобранной в 2021 году на микроучастке ХР-4 показал, что наибольшие коэффициенты накопления плутония наблюдаются у ели обыкновенной, которые составили  $n \cdot 10^{-2}$  для ветвей с хвоей.  $K_n(\text{Pu})$  ветвей с листьями березы повислой и рябины обыкновенной на порядок меньше и оцениваются в  $n \cdot 10^{-3}$ .

Последующее исследование с более детальным анализом накопления плутония надземной частью деревьев, проведенное в 2022 году свидетельствует, что коэффициент накопления плутония хвоей и ветвями ели обыкновенной

толщиной до 3 см варьируется в диапазоне  $1,3 \cdot 10^{-2}$ – $2,8 \cdot 10^{-2}$  (таблица 24). Для ветвей диаметром 3–6 см Кн плутония на порядок ниже и составляет  $5,6 \cdot 10^{-3}$ .

В противоположность зависимости величин накопления ветвями разного диаметра ели обыкновенной для ветвей лиственных деревьев просматривается увеличение накопления плутония с увеличением диаметра ветвей. Например, Кн плутония ветвями рябины обыкновенной диаметром 3–6 см составляет  $1,5 \cdot 10^{-2}$ , а ветвями <0,5 и 0,5–3 см на порядок меньше, составляя  $2,6 \cdot 10^{-3}$  и  $4,7 \cdot 10^{-3}$ , соответственно. Коэффициенты накопления вегетативными частями ивы ломкой оцениваются в  $5,0 \cdot 10^{-4}$  для ветвей <0,5 см,  $1,5 \cdot 10^{-3}$  для ветвей 0,5–3 см и  $2,9 \cdot 10^{-3}$  для ветвей 3–6 см.

Вариативность коэффициента накопления ветвями лиственных деревьев на порядок меньше, чем полученные Кн для ели обыкновенной, и определяются тысячными долями величины. Рассматриваемые виды лиственных деревьев территории, прилегающей к хранилищу РАО по средней величине Кн плутония ветвями можно ранжировать в следующем ряду: ива ломкая ( $1,8 \cdot 10^{-3}$ ) < береза повислая ( $2,5 \cdot 10^{-3}$ ) < рябина обыкновенная ( $7,4 \cdot 10^{-3}$ ).

Более детальный анализ накопления плутония органами и тканями проведен для ивы ломкой (таблица 24). Установлено, что максимальное накопление плутония из рассматриваемых частях наблюдается для листвы и побегов дерева, Кн плутония у которых составили  $6,8 \cdot 10^{-2}$  и  $7,1 \cdot 10^{-3}$ , соответственно. Коэффициент накопления плутония ветвями варьирует в пределах от  $5,0 \cdot 10^{-4}$  до  $2,9 \cdot 10^{-3}$  с увеличением его величины с увеличением диаметра ветвей от <0,5 до 3–6 см. С последующим увеличением диаметра ветви роста значения Кн не наблюдается.

Анализ распределения значений Кн плутония для разных частей древесной растительности свидетельствует, что наибольшее накопление плутония происходит в листьях и хвое рассматриваемых видов. Хотя более детальный анализ проведен только для ивы ломкой, данное утверждение можно подтвердить более высокими значениями Кн для ветвей с листьями березы повислой и рябины обыкновенной в сравнении с Кн плутония ветвями деревьев. Вероятнее всего данное превышение связано со вкладом в значения Кн(Pu) листвы деревьев.

Распределение величин  $K_n$  плутония структурными элементами ствола дерева свидетельствует, что накопление плутония наблюдается преимущественно в коре ивы ломкой ( $7,9 \cdot 10^{-3}$ ), и практически не накапливает плутоний древесина дерева ( $< 1,5 \cdot 10^{-5}$ ). Учитывая большую разницу в накоплении плутония структурными элементами ствола дерева можно дать объяснение изменчивости  $K_n$  ветвями разного диаметра, для которых процентное соотношение коры и древесины существенно разное.

В дополнение к анализу накопления плутония надземной частью ивы ломкой проведена оценка накопления плутония мхом, произрастающим на коре дерева. Значение  $K_n$  плутония мхом оценивается в  $4,0 \cdot 10^{-2}$ .

Таким образом, установлено, что коэффициенты накопления плутония для травянистой растительности территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск составили  $7,9 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-2}$ , при среднем значении, равном  $7,3 \cdot 10^{-3}$  для надземной части растений 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 коэффициент накопления плутония варьирует в диапазоне величин от  $4,4 \cdot 10^{-3}$  до  $8,9 \cdot 10^{-2}$ , при среднем значении в  $2,9 \cdot 10^{-2}$ . Стебли и ветви рассмотренных видов кустарников характеризуются  $K_n$  в диапазоне от  $3,4 \cdot 10^{-3}$  до  $1,0 \cdot 10^{-2}$  со средней величиной  $K_n$ , равной  $6,9 \cdot 10^{-3}$ . Накопление плутония корневой системой кустарников, характеризуется величиной  $K_n$  в  $2,9 \cdot 10^{-2}$ .

Максимальное накопление плутония для древесной растительности отмечается в листьях и хвое, для которых  $K_n$  составляет  $6,8 \cdot 10^{-2}$  и  $1,3 \cdot 10^{-2}$ , соответственно. Вариативность  $K_n(\text{Pu})$  ветвями составляет 2 порядка и находится в пределах от  $5,0 \cdot 10^{-4}$  до  $2,8 \cdot 10^{-2}$ .

Из исследованных видов древесной растительности высокие  $K_n$  плутония наблюдаются у ели обыкновенной.

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 ( $< 1,5 \cdot 10^{-5}$ ).

#### **4.2. Закономерности накопления плутония сельскохозяйственными растениями (вегетационные опыты)**

Растительность играет ключевую роль в процессе миграции и перераспределения радионуклидов, включая изотопы плутония. Являясь доминирующей частью общей биомассы и первой ступенью пищевых цепочек, растения определяют величину их включения в биологический круговорот. Поэтому изучению количественных показателей накопления радионуклидов растениями посвящено множество работ. Однако, как описывалось ранее, для изотопов плутония наблюдается недостаток первичных данных по количественным показателям накопления плутония растительностью, особенно для сельскохозяйственных культур.

Поскольку исследование накопления плутония сельскохозяйственными растениями на рассмотренных территориях затруднено в силу малых концентраций в почве, отдаленности рассматриваемых территорий друг от друга и др., исследование проведено в условиях вегетационных опытов.

Необходимо отметить, что вегетационные методы исследования существенно отличаются от полевых. Например, ограниченностью объёма почвы, в котором выращивают растения, что приводит к более скученному росту корневой системы. Кроме того, разрушение почвенной структуры, вследствие сушки и просеивания почвы перед набивкой сосудов, внесение исследуемых элементов в определенных формах, иногда отличных от форм их поступления в окружающую среду, влияют на результаты исследования. Однако такие исследования позволяют оценить величины поглощения элементов, включая изотопы плутония, для разных видов сельскохозяйственных культур в одинаковых условиях выращивания, а также выявить факторы, влияющие на величину накопления, что невозможно в условиях полевых опытов.

#### 4.2.1. Влияние типа почвы на накопление плутония сельскохозяйственными растениями

Исследование накопления плутония сельскохозяйственными культурами на разных типах почв проводили для ячменя (*Hordeum*) сорта «Зазерский-85» и бобов (*Fabaceae*) сорта «Янтарный». Культуры выращивали на следующих типах почв: дерново-подзолистая супесчаная, чернозем типичный тяжелосуглинистый, болотная торфяная низинная и серая лесная пылевато-суглинистая.

Исходные физико-химические показатели почв представлены в таблице 25.

Таблица 25 — Основные характеристики почв

Показатель	Тип почвы			
	Дерново-подзолистая супесчаная	Чернозем типичный тяжелосуглинистый	Болотная торфяная низинная	Серая лесная пылевато-суглинистая
$pH_{H_2O}$	$6,0 \pm 0,01$	$6,2 \pm 0,02$	$4,7 \pm 0,01$	—
$pH_{KCl}$	$5,0 \pm 0,01$	$5,5 \pm 0,01$	$4,4 \pm 0,01$	$5,7 \pm 0,01$
Органический углерод, %	$1,0 \pm 0,01$	$4,3 \pm 0,08$	$21,0 \pm 0,9$	$2,2 \pm 0,19$
$H_r$ , мг - экв/100 г почвы	$1,9 \pm 0,02$	$3,2 \pm 0,01$	$44 \pm 1,9$	—
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	$5,3 \pm 0,1$	$34 \pm 0,2$	$11,0 \pm 1,0$	—
Обменный $K_2O$ , мг/кг (по Масловой)	$78 \pm 1,3$	$120 \pm 2,0$	$37,0 \pm 4,0$	$93 \pm 3,3$
Подвижный $P_2O_5$ , мг/кг (по Кирсанову)	$130 \pm 2,0$	$120 \pm 1,0$	$28 \pm 0,6$	$200 \pm 23$

Расчетная концентрация плутония в почве составляла 425 Бк/кг для чернозема типичного и болотной торфяной низинной почв, 375 Бк/кг для дерново-подзолистой почвы и 490 Бк/кг для серой лесной почвы.

После инкубирования почвы проводили контрольный анализ содержания плутония в почве. Результат контрольного анализа представлен в таблице 26.

Таблица 26 — Результаты контрольного анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в подготовленных почвах

Тип почвы	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг		Разница, %
	Расчетное количество	Полученное в ходе анализа	
Болотная торфяная низинная	425	$424 \pm 42$	<1 %
		$410 \pm 62$	4 %
		Среднее — 417	Среднее — 2 %
Чернозем типичный	425	$423 \pm 63$	<1 %
		$470 \pm 71$	10 %
		Среднее — 447	Среднее — 5 %
Дерново-подзолистая	375	$343 \pm 48$	8 %
		$386 \pm 54$	3 %
		$368 \pm 52$	2 %
		Среднее — 366	Среднее — 2 %
Серая лесная	490	$481 \pm 72$	2 %
		$500 \pm 75$	2 %
		Среднее — 491	Среднее — <1 %

Анализ образцов почвы показывает, что расхождение между расчетным и измеренным содержанием  $^{239+240}\text{Pu}$  в почве не превышает 10 %, при среднем расхождении 3,7 %.

Выращивание сельскохозяйственных культур проводили в хорошо проветриваемом вегетационном домике, защищенном от внешних осадков. Диапазон температур воздуха вегетационного периода составил от +7 °С до +33 °С, при среднем значении +16 °С. Влажность воздуха находилась в пределах 12–96 %, при средней влажности в 65 %. Вегетационный период составлял 38 дней.

Результаты анализа содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  в образцах сельскохозяйственных растений, выращенных в ходе вегетационных опытов, представлены в таблице 27.

Результаты вегетационных опытов свидетельствуют, что  $K_n(\text{Pu})$  находятся в диапазоне от  $3,1 \cdot 10^{-4}$  до  $6,8 \cdot 10^{-3}$  для надземной части ячменя и  $9,2 \cdot 10^{-3}$ – $7,6 \cdot 10^{-2}$  для корневой системы.  $K_n(\text{Pu})$  бобами варьировали в пределах  $1,5 \cdot 10^{-3}$ – $5,7 \cdot 10^{-3}$  и  $5,8 \cdot 10^{-2}$ – $6,5 \cdot 10^{-2}$  для надземной и корневой частей, соответственно.

Средние значения коэффициентов накопления плутония для надземной части бобов и ячменя составили  $3,8 \cdot 10^{-3}$  и  $3,7 \cdot 10^{-3}$ , соответственно. Для корневой системы

средние значения коэффициента накопления плутония составили  $3,8 \cdot 10^{-2}$  для ячменя и  $6,2 \cdot 10^{-2}$  для бобов.

Таблица 27 — Содержание плутония в образцах бобов и ячменя

Тип почвы	Части растений	Сухая масса образца, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в образце, Бк	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг
<b>Бобы сорт «Янтарные»</b>				
Болотная торфяная низинная	Надземная часть	7,50	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$1,4 \pm 0,3$
Чернозем типичный		9,77	$(6,2 \pm 1,2) \cdot 10^{-3}$	$0,63 \pm 0,13$
Дерново-подзолистая		1,88	$(3,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$	$2,0 \pm 0,4$
Серая лесная		4,94	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$2,2 \pm 0,4$
Болотная торфяная низинная	Корни	2,80	$(7,7 \pm 1,5) \cdot 10^{-2}$	$28 \pm 6$
Чернозем типичный		2,56	$(6,5 \pm 1,3) \cdot 10^{-2}$	$25 \pm 5$
Дерново-подзолистая		1,69	$(3,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-2}$	$21 \pm 4$
Серая лесная		2,16	$(6,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-2}$	$31 \pm 6$
<b>Ячмень сорт «Зазерский-85»</b>				
Болотная торфяная низинная	Надземная часть	0,41	$(3,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-4}$	$0,8 \pm 0,2$
Чернозем типичный		0,41	$(5,5 \pm 1,1) \cdot 10^{-5}$	$0,13 \pm 0,03$
Дерново-подзолистая		0,53	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$2,2 \pm 0,4$
Серая лесная		0,29	$(9,7 \pm 1,9) \cdot 10^{-4}$	$3,3 \pm 0,7$
Болотная торфяная низинная	Корни	0,29	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$3,9 \pm 0,8$
Чернозем типичный		0,17	$(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$	$13 \pm 3$
Дерново-подзолистая		0,43	$(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$27 \pm 5$
Серая лесная		0,10	—	—



Рассчитанные  $K_n(Pu)$  представлены на рисунке 13.

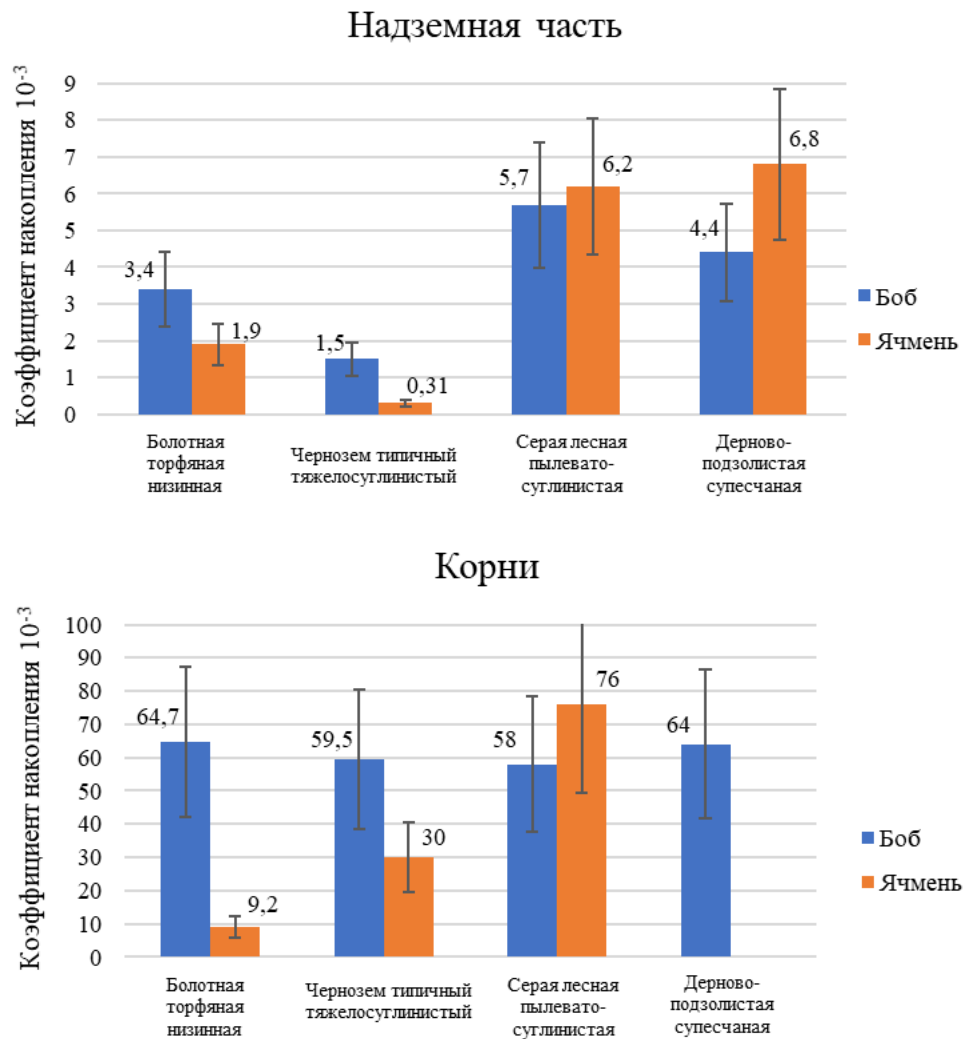


Рисунок 13 — Коэффициенты накопления плутония для ячменя сорта «Зазерский-85» и бобов сорта «Янтарные»

Рисунок 13 свидетельствует, что накопление плутония надземной частью растений существенно ниже, чем корневой, достигая разницы в несколько порядков. Так коэффициент накопления плутония корневой системой больше  $K_n$  надземной частью в  $\sim 15$  раз для бобов и  $\sim 10$  раз для ячменя.

В ходе вегетационных опытов по исследованию накопления плутония ячменем и бобами, выращенными на разных типах почв, установлено, что коэффициенты накопления плутония надземной частью можно ранжировать следующим образом:

- $6,8 \cdot 10^{-3}$  (дерново-подзолистая супесчаная)  $>$   $6,2 \cdot 10^{-3}$  (серая лесная пылевато-суглинистая)  $>$   $1,9 \cdot 10^{-3}$  (болотная торфяная низинная)  $>$   $3,1 \cdot 10^{-4}$  (чернозем типичный тяжелосуглинистый) для ячменя сорта «Зазерский-85»;
- $5,7 \cdot 10^{-3}$  (серая лесная пылевато-суглинистая)  $>$   $4,4 \cdot 10^{-3}$  (дерново-подзолистая супесчаная)  $>$   $3,4 \cdot 10^{-3}$  (болотная торфяная низинная)  $>$   $1,5 \cdot 10^{-4}$  (чернозем типичный тяжелосуглинистый) для бобов сорта «Янтарные».

В целом, по величине накопления изотопов плутония бобами и ячменем, рассмотренные типы почв можно ранжировать в следующий ряд: дерново-подзолистая супесчаная и серая лесная пылевато-суглинистая  $>$  болотная торфяная низинная  $\gg$  чернозем типичный тяжелосуглинистый. При этом максимальные и минимальные значения различаются более чем на порядок (в  $\sim 30$  раз).

Зависимость коэффициента накопления корневой системой от типа почв для бобов не выявлена, в среднем значение  $K_n$  плутония составило  $\sim 0,060$ .  $K_n(Pu)$  корневой частью для ячменя можно ранжировать в следующем ряду:  $7,6 \cdot 10^{-2}$  (серая лесная пылевато-суглинистая)  $>$   $3,0 \cdot 10^{-2}$  (чернозем типичный тяжелосуглинистый)  $>$   $9,2 \cdot 10^{-2}$  болотная торфяная низинная.

Анализ результатов вегетационных экспериментов для корневой системы растений показал неоднозначные данные о зависимости накопления плутония корнями от типа почв, на которых выращено растение.

Основные результаты данной работы представлены в [176, 177].

#### **4.2.2. Влияние влажности почвы на накопление плутония растительностью**

Одним из важнейших факторов, влияющих на химическое состояние минеральных и органических компонентов почв, является режим увлажнения. Окислительно-восстановительные процессы, а также изменение рН почвы в результате ее высыхания или избыточного увлажнения влияют на подвижность металлов, вследствие их растворения/осаждения, образования комплексных соединений с почвенными компонентами. В наибольшей степени таким изменениям подвержены элементы с переменной валентностью.

Исследование зависимости  $K_n^{239+240}\text{Pu}$  сельскохозяйственными культурами от влажности почв проводили в 2021–2022 гг. для бобов сорта «Янтарные», лука сорта «Центурион» и ячменя сорта «Зазерский-85», выращенных на дерново-подзолистой супесчаной почве. Основные характеристики почвы и концентрация плутония в почве приведены в таблицах 25 и 26, соответственно.

Растения выращивали в сосудах с разной влажностью почвы в диапазоне от 15 до 40 % абсолютной влажности. Контроль влажности почвы осуществляли весовым методом. Подготовленные сосуды с разной влажностью перед посевом выдерживали 10 дней с ежедневным доливом воды на весах до соответствующей массы для достижения равномерного увлажнения почвы в сосуде.

Вегетационные опыты 2021 года проводили в вегетационном домике. Условия проведения вегетационного опыта контролировались с помощью Регистратора температуры и влажности Elitech GSP-6 с автоматической записью каждый час. Диапазон температурного режима и влажности воздуха проведения вегетационных опытов представлен в таблице 28. Вегетационные опыты 2022 г. проводили в теплице в контролируемых условиях при температуре воздуха в 20–27 °С, относительной влажности воздуха в 60–70 %.

Таблица 28 — Условия проведения вегетационных опытов 2021 г.

Культура	Период вегетации	Стадия сбора урожая	Температура воздуха			Влажность воздуха		
			Мин.	Макс.	Сред.	Мин.	Макс.	Сред.
Ячмень	05.04.21– 13.05.21	«Кущение»	+2	+30	+16	+12	+96	+60
Бобы	05.04.21– 13.05.21	«образование бобов»	+2	+33	+16	+13	+99	+69
Лук	11.05.21– 13.06.21	начало засыхания пера	+22	+27	+25	+41	+78	+65

Во время вегетационного периода ежедневно проводился контроль массы сосудов с растениями и их долив водой до соответствующей влажности в каждом сосуде. Увеличением массы сосудов за счет прироста массы растений

пренебрегали. Для установления потребления влаги растениями для каждой точки дублировался сосуд с «черным паром» (рисунок 14). Расчет потребляемой влаги растениями рассчитывали как разницу между потерей массы в сосудах с растениями и «черным паром» одинаковой влажности. Поскольку масса растений в сосудах отличалась, проведен перерасчет потребления влаги к единице сухой массы растения (рисунок 15).

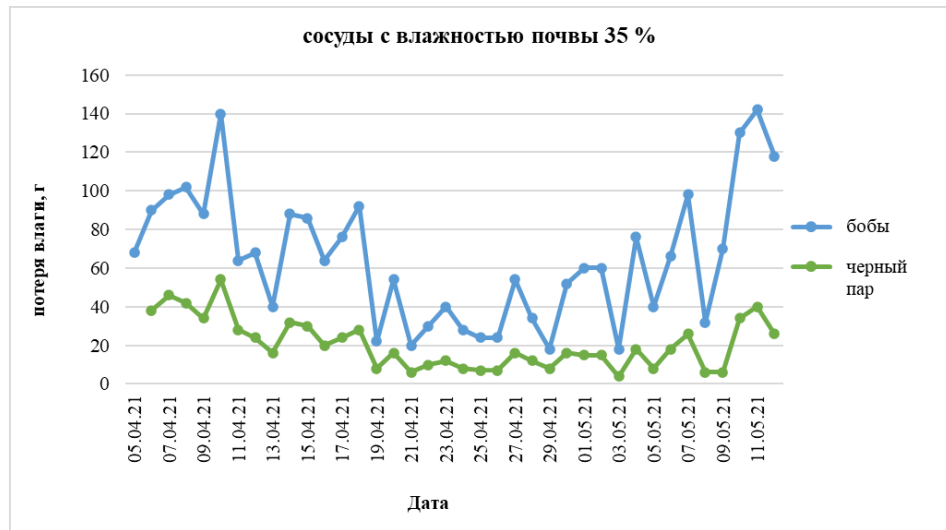


Рисунок 14 — Пример контроля потребления влаги

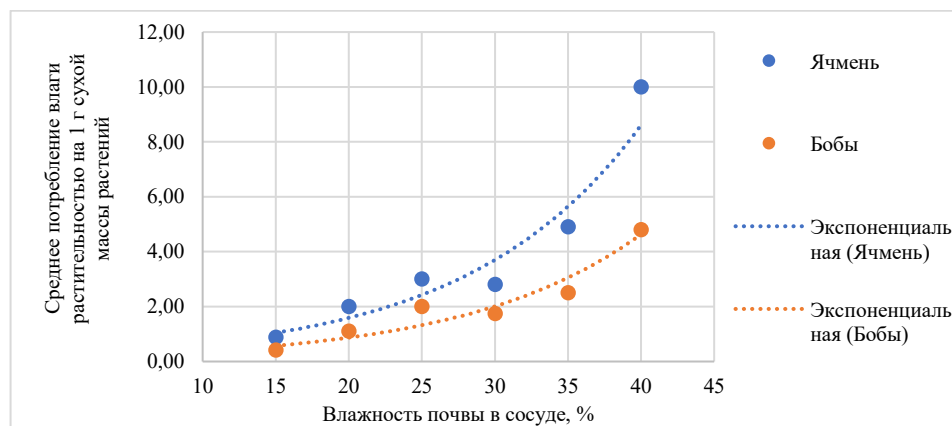


Рисунок 15 — Среднее потребление влаги растениями в течение вегетационного периода

Экспериментальные данные, полученные в 2021 и 2022 годах о содержании плутония в образцах растений и рассчитанные коэффициенты накопления представлены в таблицах 29 и 30.

Таблица 29 — Содержание плутония в образцах растений и расчетные коэффициенты накопления, полученные по результатам вегетационных опытов 2021 года

Влажность почвы, %	Часть растения	Вегетационный период, день	Сухая масса, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в образце, Бк	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	Кн
бобы сорт «Янтарные»						
15	Надземная часть	40	3,34	$(12\pm 2)\cdot 10^{-3}$	$3,6\pm 0,7$	$1,0\cdot 10^{-2}$
20			4,85	$(25\pm 5)\cdot 10^{-3}$	$5,2\pm 1,0$	$1,5\cdot 10^{-2}$
25			5,67	$(11\pm 2)\cdot 10^{-3}$	$1,9\pm 0,4$	$5,3\cdot 10^{-3}$
30			11,1	$(5,0\pm 1,0)\cdot 10^{-3}$	$0,45\pm 0,09$	$1,3\cdot 10^{-3}$
35			14,5	$(4,4\pm 0,9)\cdot 10^{-3}$	$0,31\pm 0,06$	$8,7\cdot 10^{-4}$
40			11,6	$(2,5\pm 0,5)\cdot 10^{-3}$	$0,19\pm 0,04$	$5,3\cdot 10^{-4}$
Среднее арифметическое						$5,4\cdot 10^{-3}$
15	Корни	40	1,28	$(9,4\pm 1,9)\cdot 10^{-3}$	$74\pm 15$	$2,1\cdot 10^{-1}$
20			1,10	$(7,5\pm 1,5)\cdot 10^{-3}$	$68\pm 14$	$1,9\cdot 10^{-1}$
25			1,68	$(9,9\pm 1,8)\cdot 10^{-3}$	$59\pm 12$	$1,7\cdot 10^{-1}$
30			4,16	$(16\pm 3)\cdot 10^{-3}$	$39\pm 8$	$1,1\cdot 10^{-1}$
35			2,50	$(4,0\pm 0,8)\cdot 10^{-3}$	$16\pm 3$	$4,5\cdot 10^{-2}$
40			1,20	$(12\pm 2,4)\cdot 10^{-3}$	$96\pm 19$	$2,7\cdot 10^{-1}$
Среднее арифметическое						$1,6\cdot 10^{-1}$
лук сорта «Центурион»						
15	Перо	33	1,19	—	—	—
20			2,07	$(31\pm 6,2)\cdot 10^{-3}$	$15\pm 3$	$2,0\cdot 10^{-2}$
25			2,85	$(0,35\pm 0,07)\cdot 10^{-3}$	$0,13\pm 0,03$	$1,7\cdot 10^{-4}$
30			1,34	$(0,80\pm 0,16)\cdot 10^{-3}$	$0,60\pm 0,12$	$8,0\cdot 10^{-4}$
35			0,80	$(0,65\pm 0,13)\cdot 10^{-3}$	$0,81\pm 0,16$	$1,1\cdot 10^{-3}$
40			1,23	$(0,78\pm 0,15)\cdot 10^{-3}$	$0,63\pm 0,13$	$8,4\cdot 10^{-4}$
Среднее арифметическое						$4,5\cdot 10^{-3}$
15	Луковицы	33	6,61	$(3,7\pm 0,7)\cdot 10^{-3}$	$0,56\pm 0,11$	$7,5\cdot 10^{-4}$
20			4,51	$(15\pm 3)\cdot 10^{-3}$	$3,2\pm 0,6$	$4,3\cdot 10^{-3}$
25			2,36	$(1,5\pm 0,3)\cdot 10^{-3}$	$0,64\pm 0,12$	$8,5\cdot 10^{-4}$
30			3,55	$(1,1\pm 0,2)\cdot 10^{-3}$	$0,31\pm 0,06$	$4,1\cdot 10^{-4}$
35			4,10	$(0,79\pm 0,16)\cdot 10^{-3}$	$0,19\pm 0,04$	$2,5\cdot 10^{-4}$
40			4,38	$(0,28\pm 0,06)\cdot 10^{-3}$	$0,06\pm 0,01$	$8,0\cdot 10^{-5}$
Среднее арифметическое						$1,1\cdot 10^{-3}$
15	Корни	33	0,61	$(31\pm 6)\cdot 10^{-3}$	$50\pm 10$	$6,7\cdot 10^{-2}$
20			0,80	$(50\pm 10)\cdot 10^{-3}$	$62\pm 13$	$8,3\cdot 10^{-2}$
25			0,65	$(55\pm 11)\cdot 10^{-3}$	$85\pm 16$	$1,1\cdot 10^{-1}$
30			0,69	$(41\pm 8)\cdot 10^{-3}$	$59\pm 12$	$7,9\cdot 10^{-2}$
35			0,64	$(50\pm 10)\cdot 10^{-3}$	$78\pm 16$	$1,0\cdot 10^{-1}$
40			0,83	$(56\pm 11)\cdot 10^{-3}$	$68\pm 17$	$9,1\cdot 10^{-2}$
Среднее арифметическое						$8,9\cdot 10^{-2}$

Таблица 30 — Содержание плутония в образцах растений и расчетные данные по коэффициентам накопления, полученные по результатам вегетационных опытов 2022 года

Влажность почвы, %	Часть растения	Вегетационный период, день	Сухая масса, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в образце, Бк	Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг	Кн
ячмень, сорт «Зазерский-85»						
15	Надземная часть	44	0,99	$(1,1\pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	$0,011\pm 0,002$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
18			1,95	$(1,5\pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	$0,011\pm 0,002$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
21			2,35	$(3,4\pm 0,6) \cdot 10^{-4}$	$0,15\pm 0,03$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
25			6,21	$(1,1\pm 0,2) \cdot 10^{-4}$	$0,019\pm 0,004$	$5,3 \cdot 10^{-5}$
30			5,02	$(6,7\pm 1,3) \cdot 10^{-4}$	$0,13\pm 0,03$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
35			14,39	$(1,5\pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$0,11\pm 0,02$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Среднее арифметическое						$2,0 \cdot 10^{-4}$
15	Корни	44	0,44	$(8,8\pm 1,8) 10^{-2}$	$200\pm 40$	$5,6 \cdot 10^{-1}$
18			0,59	$(7,0\pm 1,4) 10^{-2}$	$120\pm 24$	$3,4 \cdot 10^{-1}$
21			0,67	$(1,0\pm 0,2) 10^{-1}$	$150\pm 30$	$4,2 \cdot 10^{-1}$
25			0,89	$(1,4\pm 0,3) 10^{-1}$	$160\pm 32$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
30			0,55	$(9,2\pm 1,8) 10^{-2}$	$170\pm 34$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
35			1,58	$(2,5\pm 0,5) 10^{-1}$	$160\pm 32$	$4,5 \cdot 10^{-1}$
Среднее арифметическое						$4,4 \cdot 10^{-1}$
бобы сорт «Янтарные»						
15	Надземная часть	44	0,52	$(6,1\pm 1,2) \cdot 10^{-4}$	$1,2\pm 0,2$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
18			0,98	$(1,3\pm 0,3) \cdot 10^{-3}$	$1,3\pm 0,3$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
21			0,84	$(8,7\pm 1,7) \cdot 10^{-3}$	$10\pm 2$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
25			8,87	$(3,7\pm 0,7) \cdot 10^{-3}$	$0,43\pm 0,09$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
30			6,58	$(9,9\pm 2,0) \cdot 10^{-4}$	$0,15\pm 0,03$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
35			6,12	$(2,9\pm 0,6) \cdot 10^{-3}$	$0,47\pm 0,09$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Среднее арифметическое						$6,3 \cdot 10^{-3}$
15	Корни	44	0,65	$(6,9\pm 1,4) 10^{-2}$	$110\pm 22$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
18			2,19	$(2,5\pm 0,5) 10^{-1}$	$110\pm 22$	$3,1 \cdot 10^{-1}$
21			1,53	$(6,5\pm 1,3) 10^{-2}$	$43\pm 9$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
25			2,04	$(3,5\pm 0,7) 10^{-1}$	$170\pm 34$	$4,8 \cdot 10^{-1}$
30			2,07	$(3,0\pm 0,96) 10^{-1}$	$140\pm 28$	$3,9 \cdot 10^{-1}$
35			1,05	$(1,3\pm 0,3) 10^{-1}$	$120\pm 24$	$3,4 \cdot 10^{-1}$
Среднее арифметическое						$3,2 \cdot 10^{-1}$

Двухгодичные экспериментальные данные по исследованию зависимости накопления плутония сельскохозяйственными растениями от влажности почв для ячменя, бобов и лука представлены на рисунках 16, 17 и 18, соответственно.

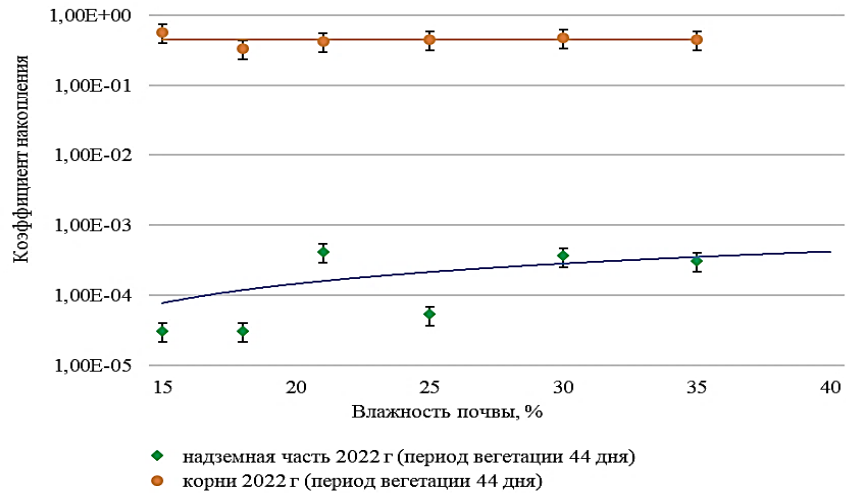


Рисунок 16 — Коэффициенты накопления плутония для ячменя, выращенного при разной влажности почвы (2022 г.)

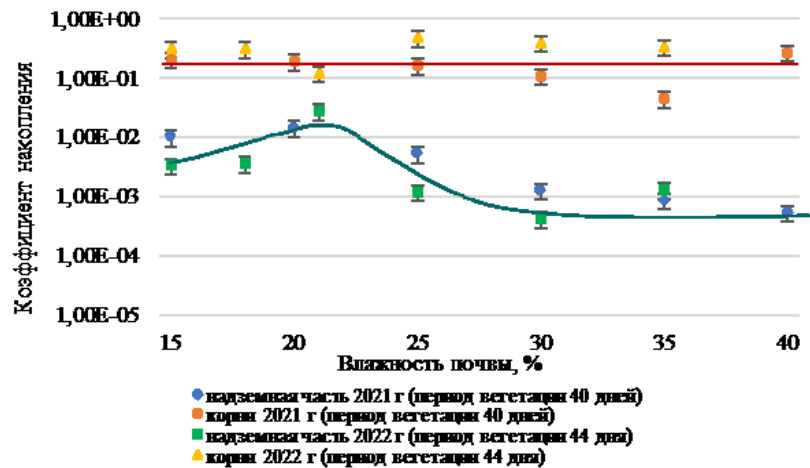


Рисунок 17 — Коэффициенты накопления плутония для бобов, выращенных при разной влажности почвы (2021–2022 гг.)

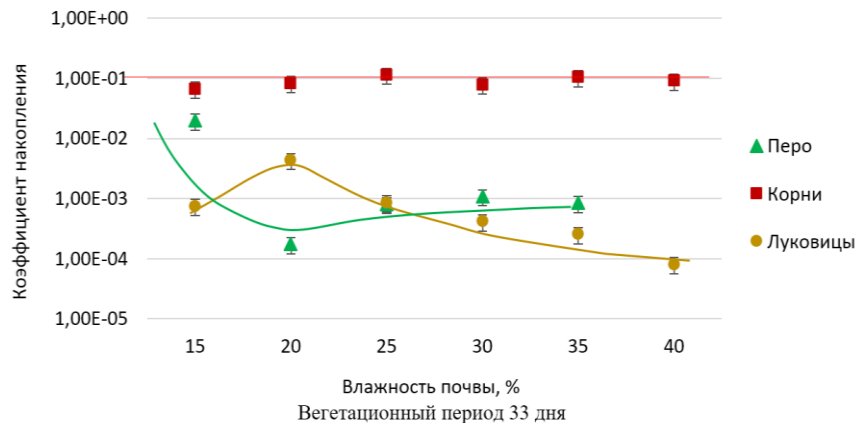


Рисунок 18 — Коэффициенты накопления плутония для лука, выращенного при разной влажности почвы (2021 г.)

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.

Например, для надземной части ячменя с увеличением влажности почвы на порядок увеличивается коэффициент накопления плутония (рисунок 16). Так при абсолютной влажности почвы 15 %  $K_n(\text{Pu})$  составил  $3,1 \cdot 10^{-5}$ , что в 10 раз меньше  $K_n$  плутония при влажности почвы 35 % в  $3,1 \cdot 10^{-4}$ .

Для надземной части бобов наблюдается обратная зависимость – снижение  $K_n$  до двух порядков с увеличением влажности почвы. Следует отметить, что полученные в ходе вегетационных опытов значения  $K_n$  в 2021 году выше полученных в 2022 г. Вероятно это связано с разными условиями выращивания (температура, освещенность, влажность воздуха и др.). Тем не менее, прослеживается общая тенденция изменения коэффициента накопления плутония от влажности почвы (рисунок 17). Так 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  $K_n(\text{Pu})$  не наблюдается.

По результатам двухгодичных экспериментов установлено, что максимальные и минимальные значения  $K_n$  плутония бобами, выращенными при разной влажности почвы отличаются в среднем в 45 раз.

Для пера и луковиц также наблюдается снижение  $K_n$  плутония по мере увеличения влажности почвы с  $2,0 \cdot 10^{-2}$  до  $8,4 \cdot 10^{-4}$  и с  $7,5 \cdot 10^{-4}$  до  $8,0 \cdot 10^{-5}$ , соответственно (рисунок 18).

Для корневой части рассматриваемых сельскохозяйственных культур зависимости коэффициентов накопления плутония от влажности почв не наблюдается.

Транспирационный ток считался одним из ключевых путей поступления веществ из почвы в корень, а затем в надземную часть растений. Однако более поздние опыты показали, что количество поступивших в растение веществ



непропорционально количеству прошедшей через него воды. Таким образом, существует несколько типов питания растений, независимых друг от друга с существенно различающимися механизмами [109].

Следует отметить, что экспериментальные данные потребления воды растениями (рисунок 15) показывают увеличение транспирации с увеличением влажности почвы. При этом наблюдается обратная зависимость в накоплении плутония для бобов и лука, что говорит об отсутствии связи между количеством поступающей воды в рассматриваемые сельскохозяйственные культуры и процессом накопления плутония в них. Вероятнее всего перенос плутония осуществляется другими механизмами питания, например, с использованием мембранных транспортных белков или в процессе эндоцитоза и экзоцитоза.

Изменчивость  $K_n$  плутония может быть обусловлена так называемым «разбавлением» за счет нарастания массы растений. Для оценки данного фактора проведен анализ значимости коэффициента корреляции показателей  $K_n(P_u)$  и масс сухих навесок.

Коэффициент корреляции рассчитывали по формуле:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

где  $x_i, y_i$  — значения выборок сухой массы растений и  $K_n$ ,  
 $\bar{x}, \bar{y}$  — средние значение параметров выборки.

Для оценки значимости коэффициента корреляции использовали t-критерий Стьюдента (t-статистику), вычисляемый по формуле:

$$t_p = r \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (5)$$

где  $t_p$  — расчетное значение t-критерия,  
 $n$  — размер выборки,  
 $r$  — коэффициент корреляции.

Расчетное значение t-критерия сравнивали с табличным значением. При превышении значения расчетного t-критерия, коэффициент корреляции признается значим, в ином случае — нет [178].

Результаты анализа значимости коэффициента корреляции показателей  $K_n(P_u)$  и масс сухих навесок (таблица 31) свидетельствуют об отсутствии влияния фактора «разбавления» за счет нарастания массы растений.

Таблица 31 — Оценка значимости коэффициента корреляции значений  $K_n(P_u)$  и масс сухих навесок для вегетационного опыта по исследованию влияния влажности почвы на накопление плутония сельскохозяйственными растениями

Культура	n	r	$t_p$	t	Оценка корреляции
Ячмень, сорт «Зазерский-85»	6	-0,58	1,61	2,57	Незначимая
Боб сорт «Янтарный»	12	-0,54	2,05	2,2	Незначимая
Лук сорта «Центурион» (перо)	5	0,25	0,51	2,77	Незначимая
Лук сорта «Центурион» (луковицы)	6	0,08	0,19	2,57	Незначимая
Примечание; n — размер выборки, r — коэффициент корреляции, $t_p$ — расчетное значение t-критерия, t — t-критерий Стьюдента					

Другими факторами, влияющими на процесс миграции плутония в системе почва-растение, являются процессы изменения в корнях растений при разном увлажнении почвы. Например, в условиях постоянной засухи стенки паренхимы корней становятся толще из-за усиления синтеза суберина, что замедляет отток поглощенных ионов в проводящие ткани и косвенно влияет на поглощение растениями новых ионов. С другой стороны, при избытке воды нарушается аэрация почвы. При этом недостаток кислорода влияет на дыхание корней, что приводит к нарушению поглощения солей. Кроме того, в условиях затопления корни плохо ветвятся и у них образуется мало корневых волосков, что также приводит к нарушению питания растений [110].

Основные результаты данной работы представлены в [176].

### 4.2.3. Вариативность накопления плутония сельскохозяйственными растениями, обусловленная видовыми различиями

В ходе вегетационных экспериментов, проведенных в 2020-2021 гг., изучены количественные показатели накопления и распределения плутония следующими сельскохозяйственными растениями, выращенными на дерново-подзолистой супесчаной окультуренной почве: 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.

Расчетная концентрация  $^{239}\text{Pu}$  в почве составила 750 Бк/кг для выращивания лука, 600 Бк/кг для выращивания бобов и томата и 375 Бк/кг для выращивания бобов, томата и остальных культур. Основные характеристики почвы и концентрация плутония в почве приведены в таблицах 25 и 26, соответственно.

Вегетационные опыты 2020 г проводили в закрытом вегетационном домике при температуре и влажности воздуха 25–33 °С и 65–70 %. В 2021 году растения выращивали под навесом на открытом воздухе. Температурный режим и количество ясных дней вегетационного периода представлены в таблице 32. Полив осуществляли по мере необходимости.

Таблица 32 — Погодные условия вегетационного периода по месяцам

Вегетационный период (месяц)	Температура воздуха (ночная)			Температура воздуха (дневная)			Ясные дни
	Мин.	Макс.	Средняя	Мин.	Макс.	Средняя	
май	+2	+14	+8	+7	+23	+15	1
июнь	+8	+19	+14	+10	+30	+23	10
июль	+9	+19	+15	+15	+29	+22	4
август	+8	+19	+13	+15	+29	+21	2
сентябрь	+5	+17	+11	+12	+24	+18	6
октябрь	+2	+14	+8	+2	+20	+12	2

Результаты экспериментальных данных, полученных в ходе вегетационных опытов и рассчитанные коэффициенты накопления плутония представлены в таблице 33.

Таблица 33 — Результаты анализа содержания плутония в пробах растительности вегетационных опытов 2020–2021 гг.

Вид растения	Часть растения	Вегетационный период, день	Год	Сухая масса образца, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ , Бк/кг		Кн	
					растение	почва		
картофель	надземная часть	94	2021	9,08	2,1 ± 0,4	375	5,6 · 10 <sup>-3</sup>	
	клубни			8,69			2,5 ± 0,5	6,7 · 10 <sup>-3</sup>
	корни			1,23			64 ± 13	1,7 · 10 <sup>-1</sup>
ячмень	все растение	128	2020	9,72	4,9 ± 1,0	375	1,3 · 10 <sup>-2</sup>	
	все растение	117	2021	3,95	1,7 ± 0,3		4,5 · 10 <sup>-3</sup>	
бобы	все растение	127	2020	3,46	13 ± 3	375	3,5 · 10 <sup>-2</sup>	
	все растение	94	2021	16,39	3,6 ± 0,7		9,6 · 10 <sup>-3</sup>	
	надземная часть	87		13,33	1,9 ± 0,4	600	3,2 · 10 <sup>-3</sup>	
	корни		3,92	23 ± 5	3,8 · 10 <sup>-2</sup>			
редис	все растение	94	2021	3,95	16 ± 3	375	4,3 · 10 <sup>-2</sup>	
патиссон	все растение	94		7,45	6,7 ± 1,3		1,8 · 10 <sup>-2</sup>	
лук	перо	31	2020	2,65	2,9 ± 0,6	750	3,8 · 10 <sup>-3</sup>	
	луковицы			9,70	24 ± 5		3,2 · 10 <sup>-2</sup>	
	корни			0,96	660 ± 130		8,8 · 10 <sup>-1</sup>	
томат	все растение	97	2021	12,86	11 ± 2	375	2,9 · 10 <sup>-2</sup>	
	надземная часть	90		14,35	2,1 ± 0,4		600	3,5 · 10 <sup>-3</sup>
	корни			1,56	150 ± 30	2,5 · 10 <sup>-1</sup>		

Результаты исследования свидетельствуют о существенном отличие в накоплении плутония разными частями рассматриваемых культур (рисунок 19).

Так  $K_n$  для клубней картофеля, равный  $6,8 \cdot 10^{-3}$  на 2 порядка меньше  $K_n$  для корней в  $1,7 \cdot 10^{-1}$ . Для бобов разница в значениях  $K_n(Pu)$  надземной частью в  $5,1 \cdot 10^{-3}$  и корневой в  $1,4 \cdot 10^{-2}$ , составляет один порядок величины, в то время как для томата на 2 порядка величины со значениями  $K_n$  в  $3,5 \cdot 10^{-3}$  и  $2,5 \cdot 10^{-1}$ , соответственно. Для лука максимальный  $K_n$  наблюдается в корнях, который составляет  $8,8 \cdot 10^{-1}$ , что на порядок больше  $K_n$  для лукович, который оценивается в  $3,2 \cdot 10^{-2}$ , и на два порядка больше  $K_n$  для пера лука —  $3,8 \cdot 10^{-3}$ .

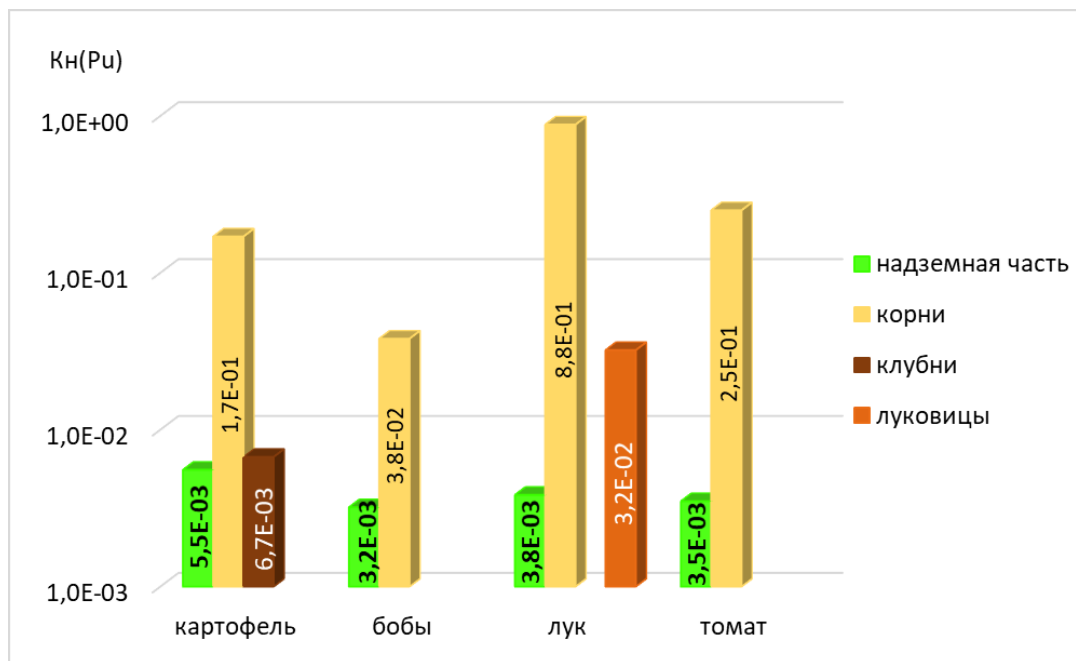


Рисунок 19 — Накопление плутония сельскохозяйственными культурами

Следует отметить, что полученные высокие  $K_n(Pu)$  для корневой системы исследуемых сельскохозяйственных культур не могут быть объяснены аналитической ошибкой, связанной с недостаточной промывкой образцов. Например, для корней картофеля содержание плутония в образце (1,23 г) составляло 0,079 Бк (64 Бк/кг). Если предположить, что данная активность привнесена исключительно из не отмытой почвы, то учитывая ее удельную активность в 375 Бк/кг, не отмытая масса почвы составит 0,2 г. Аналогичные расчеты для корней томата, с активностью в образце 0,24 Бк, показали, что для получения данной активности не отмытая масса почвы должна составлять 0,4 г, а

для лука — 0,9 г. Рассчитанные количества необходимой сухой массы почвы, для полученных значений активности в образцах, достаточно большие для визуального определения. Кроме того, навеска массы корневой системы лука в 0,96 г практически соответствует необходимому количеству почвы в 0,9 г для получения фиксируемых значений активности. Следовательно, полученные высокие Кн плутония в корневой системе сельскохозяйственных культур не могут быть объяснены недостаточным очищением корней от почвы, а являются особенностями распределения плутония по вегетативным органам рассматриваемых растений.

Основные результаты данной работы представлены в [179].

#### **4.2.4. Вариабельность коэффициента накопления плутония внутри одного сорта сельскохозяйственной культуры на примере бобов сорта «Янтарные»**

В мировой литературе представлен ряд работ по исследованию видовых особенностей в накоплении растениями радионуклидов. Однако для каждого растения, как и для всех живых организмов, характерны свои индивидуальные особенности, определяющие вариабельность накопления элементов внутри вида и даже сорта растения.

В вегетационных опытах исследована вариабельность коэффициента накопления плутония внутри одного сорта сельскохозяйственной культуры на примере бобов сорта «Янтарные», обусловленная индивидуальными особенностями организма. Выращивание растений проводили под навесом на дерново-подзолистой супесчаной почве. Основные характеристики почвы и концентрация плутония в почве приведены в таблицах 25 и 26, соответственно. Период вегетации 46 суток. Диапазон температур: 13–33 °С, при среднем значении 21 °С. Диапазон влажности воздуха: 33–95 %, при среднем значении 62 %.

Исследование вариабельности коэффициента накопления плутония бобами сорта «Янтарные» проводили без разделения растений на вегетативные органы.

Результат анализа содержания плутония в образцах бобов (для каждого растения) представлены в таблице 34.

Таблица 34 — Содержание плутония в образцах бобов сорта «Янтарные»

Образец	Сухая масса, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$		Образец	Сухая масса, г	Содержание $^{239+240}\text{Pu}$	
		в образце, Бк·10 <sup>-3</sup>	Бк/кг			в образце, Бк·10 <sup>-3</sup>	Бк/кг
ИО-2-1	0,60	1,5 ± 0,28	2,5 ± 0,47	ИО-2-32	0,66	3,8 ± 0,59	5,8 ± 0,89
ИО-2-2	0,80	9,8 ± 1,4	12 ± 1,8	ИО-2-33	0,48	7,5 ± 1,2	16 ± 2,5
ИО-2-3	0,71	15 ± 2,2	21 ± 3,1	ИО-2-34	0,67	22 ± 3,3	33 ± 4,9
ИО-2-4	1,28	25 ± 3,7	19 ± 2,8	ИО-2-35	0,49	3,2 ± 0,49	6,5 ± 1,0
ИО-2-5	1,26	10 ± 1,5	7,9 ± 1,2	ИО-2-36	0,42	6,3 ± 0,94	15 ± 2,2
ИО-2-6	0,88	5,9 ± 0,91	6,7 ± 1,0	ИО-2-37	0,47	6,9 ± 1,0	15 ± 2,2
ИО-2-7	0,71	22 ± 3,3	31 ± 4,6	ИО-2-38	0,34	2,9 ± 0,45	8,6 ± 1,3
ИО-2-8	0,77	23 ± 3,3	29 ± 4,3	ИО-2-39	0,47	7,6 ± 1,1	16 ± 2,4
ИО-2-9	0,82	14 ± 2,0	17 ± 2,5	ИО-2-40	0,51	8,7 ± 1,3	17 ± 2,5
ИО-2-10	0,55	9,9 ± 1,5	18 ± 2,7	ИО-2-41	0,82	12 ± 1,8	15 ± 2,2
ИО-2-11	0,47	7,5 ± 1,1	16 ± 2,4	ИО-2-42	0,55	21 ± 3,2	39 ± 5,8
ИО-2-12	1,20	14 ± 2,1	12 ± 1,8	ИО-2-43	0,47	6,1 ± 0,91	13 ± 1,9
ИО-2-13	0,97	15 ± 2,3	16 ± 2,4	ИО-2-44	0,40	5,8 ± 0,87	15 ± 2,2
ИО-2-14	0,48	4,4 ± 0,68	9,2 ± 1,4	ИО-2-45	1,15	14 ± 2,1	13 ± 1,9
ИО-2-15	0,79	0,44 ± 0,13	0,56 ± 0,17	ИО-2-46	0,42	13 ± 1,9	30 ± 4,4
ИО-2-16	0,73	0,60 ± 0,18	0,82 ± 0,25	ИО-2-47	0,53	10 ± 1,5	19 ± 2,8
ИО-2-17	0,70	2,7 ± 0,50	3,8 ± 0,71	ИО-2-48	0,62	11 ± 1,6	17 ± 2,5
ИО-2-18	0,44	6,4 ± 0,95	15 ± 2,2	ИО-2-49	0,39	5,8 ± 0,86	15 ± 2,2
ИО-2-19	0,53	5,1 ± 0,78	9,6 ± 1,5	ИО-2-50	0,57	10 ± 1,5	18 ± 2,7
ИО-2-20	0,89	6,7 ± 1,0	7,5 ± 1,2	ИО-2-51	0,55	8,2 ± 1,2	15 ± 2,2
ИО-2-21	0,38	16 ± 2,3	42 ± 6,2	ИО-2-52	0,41	4,6 ± 0,69	11 ± 1,6
ИО-2-22	0,71	6,3 ± 0,96	8,8 ± 1,4	ИО-2-53	0,61	5,6 ± 0,86	9,2 ± 1,4
ИО-2-23	0,99	4,7 ± 0,73	4,8 ± 0,74	ИО-2-54	0,44	3,3 ± 0,51	7,6 ± 1,2
ИО-2-24	0,64	5,6 ± 0,86	8,7 ± 1,3	ИО-2-55	0,79	9,6 ± 1,4	12 ± 1,8
ИО-2-25	0,58	11 ± 1,6	19 ± 2,8	ИО-2-56	0,67	10 ± 1,5	16 ± 2,4
ИО-2-26	0,77	7,8 ± 1,1	10 ± 1,5	ИО-2-57	0,59	3,7 ± 0,58	6,3 ± 0,97
ИО-2-27	0,55	7,8 ± 1,1	14 ± 2,1	ИО-2-58	0,37	3,5 ± 0,54	9,6 ± 1,5
ИО-2-28	0,50	9,7 ± 1,4	19 ± 2,8	ИО-2-59	0,37	2,0 ± 0,31	5,5 ± 0,85
ИО-2-29	0,39	3,2 ± 0,50	8,3 ± 1,3	ИО-2-60	0,34	4,0 ± 0,59	12 ± 1,8
ИО-2-30	0,83	9,0 ± 1,3	11 ± 1,6	ИО-2-61	0,50	3,1 ± 0,48	6,2 ± 0,95
ИО-2-31	0,73	7,4 ± 1,1	10 ± 1,5				

Разброс рассчитанных коэффициентов накопления плутония относительно среднего значения для каждого эксперимента представлен на рисунке 20.

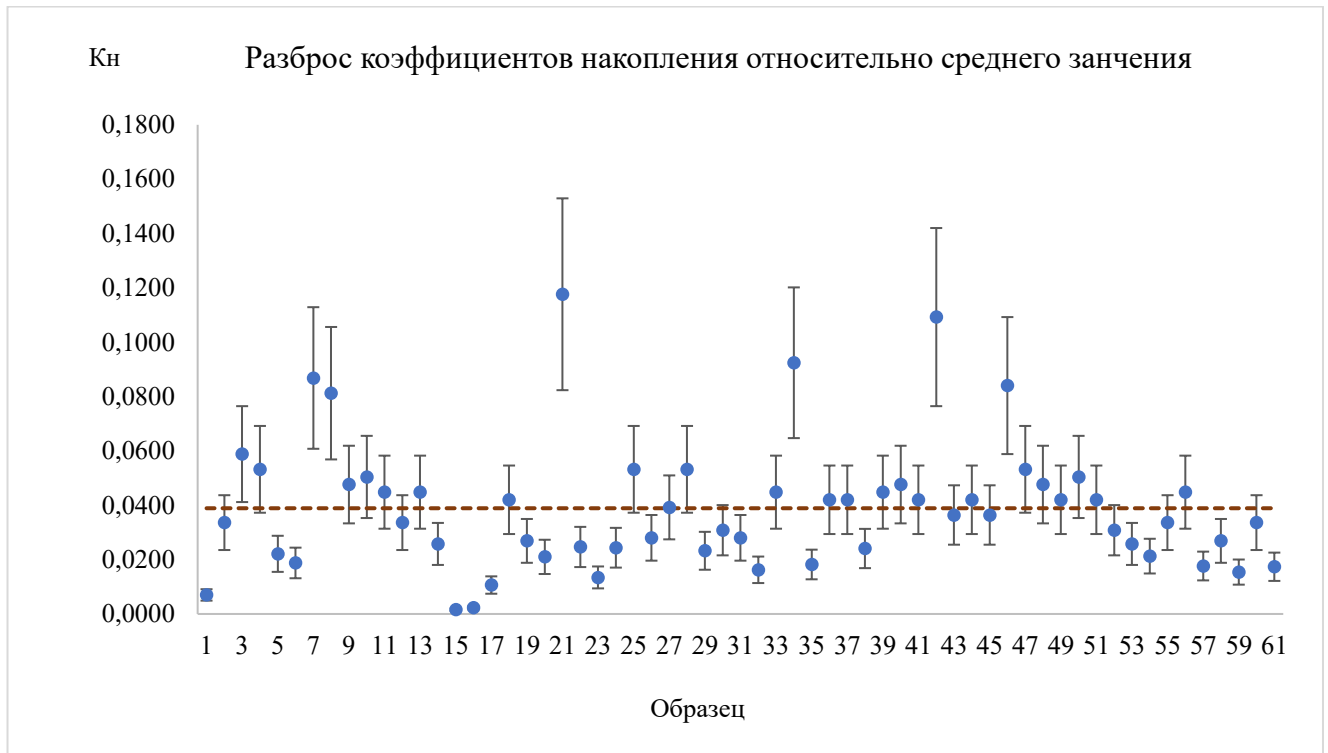


Рисунок 20 — Значения коэффициентов накопления плутония бобами сорта «Янтарные»

С целью оценки изменчивости  $K_n$  за счет нарастания массы растений проведен анализ значимости коэффициента корреляции показателей  $K_n(P_u)$  и масс сухих навесок (таблица 35).

Таблица 35 — Оценка значимости коэффициента корреляции значений  $K_n(P_u)$  и масс сухих навесок для вегетационного опыта по исследованию вариабельности коэффициента накопления плутония бобами сорта «Янтарные»

n	r	$t_p$	t	Оценка корреляции
61	-0,12	0,94	2,00	Незначимая
Примечание; n — размер выборки, r — коэффициент корреляции, $t_p$ — расчетное значение t-критерия, t — t-критерий Стьюдента				



Результаты анализа значимости коэффициента корреляции показателей  $K_n(Pu)$  и масс сухих навесок свидетельствуют об отсутствии влияния нарастания массы растений на величину значения  $K_n(Pu)$ .

Таким образом, диапазон коэффициента накопления (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 значений коэффициента накопления плутония составляет два порядка, а разница в максимальном и минимальном его значении достигает 75 раз.

Основные результаты данной работы представлены в [176, 180].

## ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ НАКОПЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ РАСТЕНИЯМИ

С целью оценки результатов исследования проведен сравнительный анализ полученных коэффициентов накопления плутония с  $K_n$  приведенными в литературных источниках. В таблице 36 представлено сравнение  $K_n$  плутония для дикорастущей растительности.

Полученные в ходе настоящего исследования коэффициенты накопления плутония разнотравьем зон влияния Билибинской и Белоярской АЭС, а также территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО, находятся в диапазоне от  $n \cdot 10^{-4}$  до  $n \cdot 10^{-2}$  для надземной части и  $n \cdot 10^{-4}$  до  $n \cdot 10^{-2}$  для корневой системы, что соответствует значениям  $K_n$ , опубликованным в литературных источниках. Вместе с тем, следует отметить, что более низкие значения  $K_n(Pu)$  представлены в специальных публикациях МАГАТЭ, наибольшие величины наблюдаются для территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

Коэффициенты накопления плутония разнотравьем Калужской области, рассчитанные на растение в целом, хорошо согласуются с  $K_n(Pu)$ , представленными в специальных публикациях МАГАТЭ и составляют  $n \cdot 10^{-2}$ .

Сравнительный анализ полученных коэффициентов накопления плутония с данными для территории ПГРЗ может носить условный характер, поскольку для территории ПГРЗ  $K_n(Pu)$  представлены для разных частей растений, а оценка  $K_n$  плутония для растения в целом отсутствует. Тем не менее, полученный в настоящей работе уровень  $K_n$  плутония в  $n \cdot 10^{-2}$  находятся между уровнями опубликованных значений коэффициента накопления плутония для надземной части и корневой системы разнотравья территории ПГРЗ (таблица 36).

Таблица 36 — 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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Деревья	хвоя	—	$3,2 \cdot 10^{-4}$	—	—	$5,2 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	$1,3 \cdot 10^{-2}$
	шишки	—	—	—	—	—	—	$3,7 \cdot 10^{-5}$ — $1,9 \cdot 10^{-4}$	—	—
	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	—	—	$1,6 \cdot 10^{-2}$ — $1,6 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—	—	$<1,5 \cdot 10^{-5}$

Окончание таблицы 36

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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 изотопов плутония сосновыми шишками найдено не было (таблица 6).

С целью сравнения полученных  $K_n(\text{Pu})$  рассмотрены  $K_n$  плутония для хвои сосны, произрастающей на территории ПГРЗ, которые оцениваются в  $3,2 \cdot 10^{-4}$  [8]. А также коэффициенты накопления плутония  $^{239+240}\text{Pu}$  структурными элементами ствола сосны с территории прохождения следа от наземного ядерного испытания, произведенного на территории Семипалатинского испытательного полигона, которые составляют  $1,8 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-1}$  для коры,  $4,0 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-2}$  для луба,  $1,6 \cdot 10^{-2} - 1,6 \cdot 10^{-1}$  для древесины и  $3,0 \cdot 10^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-2}$  для сердцевины [174]. Следовательно, коэффициент накопления плутония для ствола сосны в целом оценивается в  $n \cdot 10^{-3} - n \cdot 10^{-1}$  (таблица 36).

Полученное значение  $K_n(\text{Pu})$  сосновыми шишками сопоставимо с  $K_n$  плутония для хвои сосны с территории ПГРЗ, и меньше значений коэффициентов накопления плутония для ствола сосны, произрастающей на территории следа наземного взрыва, проведенного на территории Семипалатинского испытательного полигона, более чем на порядок.

Значение коэффициента накопления плутония для кистей с ягодами смородины белой ( $1,1 \cdot 10^{-1}$ ) территории, прилегающей к бывшему хранилищу РАО, соответствует значению верхней границы диапазона  $K_n(\text{Pu})$ , представленного в публикациях МАГАТЭ, которое составляет  $6,60 \cdot 10^{-1}$  [34]. И на порядок ниже приведенных значений для территории 30-км зоны отчуждения Чернобыльской АЭС и пойменных участков р. Енисей, которые оцениваются в  $n \cdot 10^{-2}$  [108, 109]. Необходимо уточнить, что сравнение данных показателей является условным, поскольку в исследовании сделан анализ объединенной пробы для всей кисти, без отделения ягод.

Полученный в ходе настоящего исследования коэффициент накопления  $^{239+240}\text{Pu}$  хвоей ели обыкновенной территории, прилегающей к хранилищу РАО, в  $1,3 \cdot 10^{-2}$ , превышает опубликованные значения  $K_n$  плутония хвоей сосны территории 30-км зоны чернобыльских выпадений в  $3,2 \cdot 10^{-4}$ , а также  $K_n(\text{Pu})$  хвоей лиственницы ( $5,2 \cdot 10^{-4}$ ), произрастающей на территории следа подземного ядерного

взрыва «Кратон-3», на 2 порядка [8, 109]. Вероятно это связано с разницей в пути поступления изотопов плутония в почву, обуславливающей распределение его изотопов по глубине почвенного горизонта, а также химическими формами поступившего в окружающую среду плутония. Так для территорий, подверженных выпадениям вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, как и для территории следа подземного ядерного взрыва «Кратон-3», характерным является концентрация плутония в поверхностном слое почвы.

Поступление изотопов плутония на территории, прилегающей к хранилищу РАО г. Обнинск, характеризуется высокими концентрациями плутония по глубине почвенного профиля практически до метровой глубины. Загрязнение территории происходило вследствие утечки РАО. Более того, распространение загрязнения осуществлялось с током подземных вод.

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

Коэффициент накопления плутония для коры ивы ломкой в  $7,9 \cdot 10^{-3}$ , более чем на порядок ниже, чем  $K_n$  корой сосны, полученный при исследованиях на территории следа наземного ядерного взрыва на Семипалатинском испытательном полигоне, составляющий  $1,8 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-1}$  [174]. Для древесины ивы ломкой  $K_n(\text{Pu})$  существенно ниже ( $< 1,5 \cdot 10^{-5}$ ), в сравнении с  $K_n$  для древесины сосны, произрастающей на территории следа от взрыва на СИП, которые оцениваются в  $1,6 \cdot 10^{-2} - 1,6 \cdot 10^{-1}$ .

Как описывалось выше сравнение результатов вегетационных и полевых исследований не корректно. Однако в связи с крайне малым количеством исследований накопления плутония сельскохозяйственными растениями проведена оценка полученных в ходе настоящего исследования коэффициентов накопления плутония с представленными значениями  $K_n(\text{Pu})$  в специальных публикациях МАГАТЭ и опубликованных  $K_n$  по результатам полевых опытов на территории Семипалатинского полигона. В таблице 37 представлено сравнение  $K_n$  плутония сельскохозяйственными культурами.

Таблица 37 — Коэффициенты накопления плутония по результатам вегетационных опытов и опубликованным данным

Вид растения	Часть растения	Коэффициент накопления <sup>239+240</sup> 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.				

Полученные в ходе вегетационных опытов коэффициенты накопления плутония для картофеля выше представленных значений  $K_n(Pu)$  в специальных публикациях МАГАТЭ, а также опубликованных данных по результатам экспериментальных работ на территории Семипалатинского испытательного полигона (таблица 37).

Например, для клубней картофеля  $K_n(Pu)$ , составляющие  $6,7 \cdot 10^{-3}$  на порядок превышают значения  $K_n$ , представленных в публикациях МАГАТЭ, которые составляют  $8,4 \cdot 10^{-4}$ , и опубликованных для СИП, которые оцениваются в  $4,3 \cdot 10^{-4}$ . На порядок выше  $K_n$  плутония для корневой системы картофеля по сравнению с

опубликованными данными для СИП, которые составляют  $4,7 \cdot 10^{-2}$  и  $1,7 \cdot 10^{-1}$  соответственно. Для надземной части полученные  $K_n$  сопоставимы с  $K_n(Pu)$  для территории СИП и находятся на уровне  $n \cdot 10^{-3}$ .

Для томата полученные в ходе настоящего исследования коэффициенты накопления плутония сопоставимы с опубликованными значениями  $K_n(Pu)$  для СИП и составляют  $n \cdot 10^{-3}$  для надземной части растений и  $n \cdot 10^{-1}$  для корневой системы.

На порядок ниже  $K_n$  плутония, представленные в публикациях МАГАТЭ, для надземной части бобов в сравнении с полученными данными.

Для лука полученные  $K_n(Pu)$  сопоставимы с  $K_n$  плутония, полученных для территории СИП и составляют  $n \cdot 10^{-3}$  для пера лука и  $n \cdot 10^{-2}$  для луковиц. При этом средние значения  $K_n$  плутония для луковиц в  $3,2 \cdot 10^{-4}$ , опубликованные МАГАТЭ, на два порядка ниже, чем полученные в ходе вегетационных опытов и на территории СИП.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ миграционной способности радионуклидов представляет особое значение при проведении оценки радиэкологической ситуации. Переход радионуклидов из почвы в растения является первым звеном пищевой цепочки, определяя степень их вовлечения в биотические компоненты экосистем, включая организм человека. Плутоний является высокотоксичным элементом и одним из наиболее долгоживущих радионуклидов, что определяет его долговременное кумулятивное действие на биологические организмы. Представленные в настоящем исследовании данные вносят вклад в понимание радиэкологической ситуации зон влияния радиационно-опасных объектов на территории Российской Федерации.

Полученное значение уровня глобальных выпадений  $^{239+240}\text{Pu}$ , составляющее  $0,18 \pm 0,09$  Бк/кг ( $55 \pm 26$  Бк/м<sup>2</sup>), является одним из ключевых параметров, позволяющих выявить и оценить территории загрязнения плутонием. Так концентрация  $^{239+240}\text{Pu}$  свыше 0,27 Бк/кг или плотности выпадений свыше 81 Бк/м<sup>2</sup> могут свидетельствовать как о наличии пространственного перераспределения плутония, так и о наличии дополнительного привноса плутония от локальных источников и требуют более внимательного изучения.

На всех исследованных территориях влияния радиационно-опасных объектов выявлены участки с повышенными концентрациями плутония в почве. Данные спорадические пятна не обусловлены регулярными сбросами и выбросами, однако могут быть связаны с аварийными ситуациями или, возможно, человеческим фактором. В связи с чем, целесообразно проведение исследований по оценке содержания плутония в объектах окружающей среды для зон влияния подобных радиационно-опасных объектов, в особенности тех, которые начали работу на заре развития атомной промышленности, когда существовали совершенно иные подходы к требованиям радиационной безопасности.

Коэффициенты накопления плутония для зон влияния 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 надземной части кустарников и  $< 1,5 \cdot 10^{-5} - 6,8 \cdot 10^{-2}$  для

надземной части древесной растительности. Диапазон коэффициентов накопления плутония в хозяйственно ценных частях сельскохозяйственных культур, оценивается в  $n \cdot 10^{-3}$ – $n \cdot 10^{-2}$ .

Представленные значения коэффициентов накопления плутония и характеристики его накопления разными частями растений существенно дополняют и расширяют имеющиеся данные мировых исследований и могут быть использованы в качестве ключевых параметров математических моделей для оценки концентраций изотопов плутония в сельскохозяйственной продукции, а также при оценке возможности использования древесины деревьев, произрастающих на загрязненных территориях. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для расчета перорального поступления плутония в организм животных и человека.

Выявлены зависимости накопления плутония сельскохозяйственными растениями от ряда факторов. Установлено, что в накоплении плутония растениями существенную роль играют индивидуальные физиологические особенности а также вид растений, тип почвы, на которой они выращены, режим увлажнения почвы, что объясняет широкий диапазон коэффициентов накопления плутония растениями, представленный в литературных данных. Выявленные зависимости 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. Однако, можно предположить, что, помимо рассмотренных факторов, на накопление плутония могут оказывать влияние и ряд других почвенно-климатических факторов, для установления величины влияния которых требуются дополнительные исследования.

## 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  $55 \pm 26$  Бк/м<sup>2</sup>.
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  $^{238}\text{Pu}$ . 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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. О радиационной безопасности населения : Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ // Собрание законодательства РФ. – 1996. – № 3.
2. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176 [Электронный ресурс] – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41879>. (дата обращения: 19.12.2017).
3. Асеев А.Г. Оценка и сравнение потенциальной опасности плутония / А.Г. Асеев // Известия Вузов. Ядерная энергетика.. – 1999. – № 2. – С. 39–47.
4. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. – М.: Роспотребнадзор. – 2009 г. – 100 с.
5. Василенко И.Я. Плутоний / И.Я. Василенко, О.И. Василенко // Энергия: экономика, техника, экология. – 2004. – № 1. – С. 60–63.
6. Лукина Л.И. Экологические проблемы плутония чернобыльского происхождения / Л.И. Лукина, Д.В. Моисеев, П.А. Пономаренко [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2018. – С. 735–738.
7. Safe Handling of Radionuclides. Safety Series. – Vienna: IAEA. – 1973. –Vol. 1. – 93 p.
8. Конопля Е.Ф. Трансурановые элементы на территории Белоруссии / Е.Ф. Конопля, В.П. Кудряшов, С.В. Гриневич [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, № 4. – С. 495–501.
9. Hardy E.P. Global inventory and distribution of fallout plutonium. / E.P. Hardy, P.W. Krey, H.L. Volchok // Nature. – 1973. – №241. – P. 444–445.
10. Hoo W.T. Using fallout plutonium as a probe for erosion assessment / W.T. Hoo, L.K. Fifield, S.G. Tims [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – Vol. 102, № 10. – P. 937–942. doi:10.1016/j.jenvrad.2010.06.010.

11. Bunzl K. Residence times of fallout  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the upper horizons of an undisturbed grassland soil / K. Bunzl, H. Förster, W. Kracke, W. Schimmack // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1994. – Vol. 22, № 1. – P. 11–27. doi:10.1016/0265-931x(94)90032-9.
12. Lehto J.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in boreal forest soil and their transfer into wild mushrooms and berries / J. Lehto, K. Vaaramaa, A. Leskinen // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – № 116. P. – 124–132. doi:10.1016/j.jenvrad.2012.08.012.
13. Qiao J. Rapid and simultaneous determination of neptunium and plutonium isotopes in environmental samples by extraction chromatography using sequential injection analysis and ICP-MS / J. Qiao, X. Hou, P. Roos, M. Miró // *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. – 2010. – Vol. 25, № 11. – P. 1769–1779. doi:10.1039/c003222k.
14. Hodge V. Radiocesium and plutonium: still together in “background” soils after more than thirty years / V. Hodge, C. Smith, J. Whiting // *Chemosphere*. – 1996. – Vol. 32, № 10. – P. 2067–2075. doi:10.1016/0045-6535(96)00108-7.
15. Syarbaini S.Y. Global fall out of  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in the environment of serpong atomic energy research establishment / S.Y. Syarbaini // *Kembali journal*. – 2000. – № 26. – P. 61–71.
16. Beasley T.M. Atom ratios in integrated global fallout: a reassessment of the production of  $^{237}\text{Np}$  / T.M. Beasley, J.M. Kelley, T.C. Maiti, L.A. Bond // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1998. – Vol. 38, № 2. – P. 133–146. doi:10.1016/s0265-931x(97)00033-7.
17. Cigna A.A. Environmental study of fallout plutonium in soils from the piemonte region (North-West Italy) / A.A. Cigna, L.C. Rossi, S. Sgorbini, G. Zurlini // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1987. – Vol. 5, № 1. – P. 71–81. doi:10.1016/0265-931x(87)90045-2.
18. Amr M.A. Ultra-trace determination of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , and  $^{240}\text{Pu}$  by triple quadruple collision/reaction cell-ICP-MS/MS: Establishing a baseline for global fallout in Qatar soil and sediments / M.A. Amr, A.-F.I. Helal, A.T. Al-Kinani,

- P. Balakrishnan // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2016. – № 153. – P. 73–87. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.12.008.
19. Zheng J. Characterization of Pu concentration and its isotopic composition in soils of Gansu in northwestern China / J. Zheng, M. Yamada, F. Wu [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2009. – Vol. 100, № 1. – P. 71–75. doi:10.1016/j.jenvrad.2008.10.017.
  20. Cao L. Vertical distribution and migration of plutonium in the Loess Plateau, North Shaanxi, China / L. Cao, Z. Zhou, N. Wang, Z. Wang // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2019. – № 322. – P. 649–654. doi:10.1007/s10967-019-06744-x.
  21. Kim C.S.  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{238}\text{Pu}$  concentrations in surface soils of Korea / C.S. Kim, M.H. Lee, C.K. Kim, K.H. Kim // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1998. – Vol. 40, № 1. – P. 75–88. doi:10.1016/s0265-931x(97)00062-3.
  22. Lee M.H. Distribution and characteristics of  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the soil of Korea / M.H. Lee, C.W. Lee, B.H. Boo // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1997. – Vol. 37, № 1. – P. 1–16. doi:10.1016/s0265-931x(96)00080-x.
  23. Bossew P. Anthropogenic and natural radionuclides in soil of a tropical rainforest of Southern Costa Rica / P. Bossew, A. Hubmer, F. Strelb // *Landesmussen Neue Aerie*. – 2008. – № 80. – P. 47–58.
  24. Rääf C. On the presence of plutonium in Madagascar following the SNAP-9A satellite failure / C. Rääf, E. Holm, N Rabesiranana [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – № 177. – P. 91–99. doi:10.1016/j.jenvrad.2017.06.011.
  25. Salmani-Ghabeshi S. Presence of  $^{236}\text{U}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  in soils from Southern Hemisphere / S. Salmani-Ghabeshi, E. Chamizo, M. Christl [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – № 192. – P. 478–484. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.08.003.
  26. Wendel C.C. Source attribution of Pu deposited on natural surface soils / C.C. Wendel, L. Skipperud, O.C. Lind [et al.] // *Journal of Radioanalytical and*

- Nuclear Chemistry. – 2015. – Vol. 304, № 3. – P. 1243–1252. doi:10.1007/s10967-015-3963-2.
27. Reponen A. Plutonium fallout in Southern Finland after the chernobyl accident // A. Reponen, M. Jantunen, J. Paatero, T. Jaakkola // Journal of Environmental Radioactivity. – 1993. – Vol. 21, № 2. – P. 119–130. doi:10.1016/0265-931x(93)90049-d.
  28. Paatero J. Lichen (sp. Cladonia) as a deposition indicator for transuranium elements investigated with the Chernobyl fallout / J. Paatero, T. Jaakkola, S. Kulmala // Journal of Environmental Radioactivity. – 1998. – Vol. 38, № 2. – P. 223–247. doi:10.1016/s0265-931x(97)00024-6.
  29. Le Roux G. Deposition of artificial radionuclides from atmospheric Nuclear Weapon Tests estimated by soil inventories in French areas low-impacted by Chernobyl / G. Le Roux, C. Duffa, F. Vray, P. Renaud // Journal of Environmental Radioactivity. – 2010. – Vol. 101, № 3. – P. 211–218. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.10.010.
  30. Leclercq A. Behaviors and transfers of anthropogenic radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$ ) in a protected alpine wetland (France) // A. Leclercq, H. Michel, V. Philippini [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – Vol. 303, № 1. – P. 719–732. doi:10.1007/s10967-014-3424-3.
  31. Antovic N.M. Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin / N.M. Antovic, P. Vukotic, N. Svrkota, S.K. Andrukhovich // Journal of Environmental Radioactivity. – 2012. – № 110. – P. 90–97. doi:10.1016/j.jenvrad.2012.02.001.
  32. Cook G.T. Geochemical associations of plutonium and  $\gamma$ -emitting radionuclides in caithness soils and marine particulates / G.T. Cook, M.S. Baxter, H.J. Duncan, R. Malcolmson // Journal of Environmental Radioactivity. – 1984. – Vol. 1, № 2. – P. 119–131. doi:10.1016/0265-931x(84)90003-1.



33. Yang G. Plutonium concentration and isotopic ratio in soil samples from central-eastern Japan collected around the 1970s / G. Yang, J. Zheng, K. Tagami, S. Uchida // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5, № 1. – P. 1–8. doi:10.1038/srep09636.
34. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. – Vienna: IAEA. – 2009. – 613 p.
35. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments. Technical Reports Series No. 472. – Vienna: IAEA. – 2010. – 194 p.
36. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife. Technical Reports Series No. 479. – Vienna: IAEA. – 2014. – 211 p.
37. Sokolik G. Soil–plant transfer of plutonium and americium in contaminated regions of Belarus after the Chernobyl catastrophe / G. Sokolik, S. Ovsianikova, T. Ivanova, S. Leinova // *Environment International*. – 2004. – Vol. 30, № 7. – P. 939–947. doi:10.1016/j.envint.2004.03.003.
38. Lux D. Cycling of Pu, Sr, Cs, and other longliving radionuclides in forest ecosystems of the 30-km zone around Chernobyl / D. Lux, L. Kammerer, W. Rühm, E. Wirth // *Science of The Total Environment*. – 1995. – №173. – P. 375–384. doi:10.1016/0048-9697(95)04741-7.
39. Раков Э.Г. Плутоний / Э.Г. Раков. – Москва: Большая российская энциклопедия, 2014. Том 26. – 457 с.
40. Милюкова М.С. Аналитическая химия плутония / М.С. Милюкова, Н.И. Гусев, И.Г. Сентюрин, И.С. Склярченко. – Москва: Наука, 1965. – 455 с.
41. Live Chart of Nuclides — интерактивная таблица нуклидов. International Atomic Energy Agency.: сайт. – URL. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (Дата обращения: 28.11.2022).
42. Бекман И.Н. Ядерная индустрия / И.Н. Бекман // Курс лекций. Москва: МГУ им. МВ Ломоносова, 2005. – 45 с.

43. Плутоний. Радиационная безопасность / под. общ. Ред. Л.А. Ильина. –М.: Изд.АТ, 2008. – 416 с.
44. Левдик Т.И. Влияние пониженной относительной влажности воздуха на поведение плутония-239 в организме и его биологическую эффективность / Т.И. Левдик, З.И. Калмыкова, Л.И. Фетисова [и др.] // Гигиена и санитария. – 1989. – №. 7. – С. 15–18.
45. Никитин В.П. К вопросу о рентгенодиагностике плутониевого пневмосклероза / В.П. Никитин, В.И. Кирюшкин // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 1995. – №. 5. – С. 97–102.
46. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ / В.Ф. Журавлев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 335 с.
47. Environmental Chemistry of Plutonium in: The Plutonium Handbook. 2nd edition / edited by D.L. Clark, D.A. Geeson, R.J. Hanrahan. –Publisher: American Nuclear Society, 2019. – Vol. 4. –3314 p.
48. Francis A.J. Microbial mobilization of plutonium and other actinides from contaminated soil / A.J. Francis, C.J. Dodge // Journal of Environmental Radioactivity. – 2015. – № 150. P. –277–285. doi:10.1016/j.jenvrad.2015.08.019.
49. Simon S.L. Concentrations and spatial distribution of plutonium in the terrestrial environment of the Marshall Islands / S.L. Simon, J.C. Graham, A.W. Borchert // Science of The Total Environment. – 1999. – Vol. 229, № 1-2. – P. 21–39. doi:10.1016/s0048-9697(99)00066-2.
50. Johansen M.P. Plutonium in wildlife and soils at the Maralinga legacy site: persistence over decadal time scales / M.P. Johansen, D.P. Child, E. Davis [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – № 131. – P. 72–80. doi:10.1016/j.jenvrad.2013.10.014.
51. Tims S.G. Plutonium isotope measurements from across continental Australia / S.G. Tims, L.K. Fifield, G.J. Hancock [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2013. –№ 294. – P. 636–641. doi:10.1016/j.nimb.2012.07.010.

52. Baggoura B. Level of natural and artificial radioactivity in Algeria / B. Baggoura, A. Nouredine, M. Benkrid // *Applied Radiation and Isotopes*. – 1998. – Vol. 49, № 7. – P. 867–873. doi:10.1016/s0969-8043(97)10005-7.
53. Hu Q.H. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review / Q.H. Hu, J.Q. Weng, J.S. Wang // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2010. – Vol. 101, № 6. – P. 426–437. doi:10.1016/j.jenvrad.2008.08.004.
54. Hrncicka E. Determination of plutonium in environmental samples by AMS and alpha spectrometry / E. Hrncicka, P. Steier, A. Wallner // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2005. – № 63. – P. 633–638.
55. Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана. Выпуск 5. Оптимизация исследований территории Семипалатинского испытательного полигона с целью их передачи в хозяйственный оборот / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 356 с.
56. Умаров М.А. Исследование площадного радиоактивного загрязнения испытательной площадки «Опытное поле» (2012-2014 гг.) / М.А. Умаров, С.Н. Лукашенко, А.С. Мошков [и др.] // *Вестник НЯЦ РК*. – 2016. – № 1. – С. 142–149.
57. Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана. Выпуск 2. Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007-2009 гг. / под. рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2010. – 528 с.
58. Лукашенко С.Н. Актуальные радиэкологические проблемы мест проведения мирных ядерных взрывов в России / С.Н. Лукашенко, Ю.Г. Стрильчук, О.Н. Ляхова // XLVII Радиэкологические чтения, посвященные действительному члену васхнил В.М. Клечковскому. – Обнинск, 2019. – С. 62–78.
59. Gedeonov A.D. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Craton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia) / A.D. Gedeonov, E.R. Petrov, V.G. Alexeev [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – № 60. – P. 221–234.

60. Saito-Kokubu Y. Plutonium isotopes derived from Nagasaki atomic bomb in the sediment of Nishiyama reservoir at Nagasaki, Japan / Y. Saito-Kokubu, F. Esaka, K. Yasuda [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2007. – Vol. 65, № 4. – P. 465–468. doi:10.1016/j.apradiso.2006.10.010.
61. Saito-Kokubu Y. Depositional records of plutonium and  $^{137}\text{Cs}$  released from Nagasaki atomic bomb in sediment of Nishiyama reservoir at Nagasaki / Y. Saito-Kokubu, K. Yasuda, M. Magara [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2008. – Vol. 99, № 1. – P. 211–217. doi:10.1016/j.jenvrad.2007.11.010.
62. Yoshida S. Distribution of nuclear bomb Pu in Nishiyama area, Nagasaki, estimated by accurate and precise determination of  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  ratio in soils / S. Yoshida, Y. Muramatsu, S. Yamazaki [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2007. – Vol. 96, № 1-3. – P. 85–93. doi:10.1016/j.jenvrad.2007.01.019.
63. Гавриш Н.Н. Медико-биологические аспекты оценки последствий Тоцких войсковых учений с применением ядерного оружия / Н.Н. Гавриш, В.В. Панкратов, В.А. Резонтов [и др.] // *Состояние и перспективы разработки медицинских средств защиты от поражающих факторов радиационной, химической и биологической природы*. – 2019. – С. 10-19.
64. Ядерные испытания СССР: [В 6 т.] / Рос. федер. ядер. центр-ВНИИЭФ. Т. 1. Цели. Общие характеристики. Организация ядерных испытаний СССР. Первые ядерные испытания / ред. группа под руководством проф. В.Н. Михайлова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. – 288 с.
65. Livens F.R. Chemical Associations of Artificial Radionuclides in Cumbrian Soils / F.R. Livens, M.S. Baxter // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1988. – № 7. – P. 75–86.
66. Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий / Санкт-Петербург. Прогресс-Погода. 1996. – 355 с.
67. Ващенко В.Н. Сравнительный анализ и радиационно-экологические последствия тяжелых аварий на ЧАЭС и Фукусима-1 / В.Н. Ващенко, И.Б. Кордуба, Ю.М. Кризская // *Вісник Кременчуцького національного*

- університету імені Михайла Остроградського. – 2017. – Вип. 3, № 1. – С. 114–123.
68. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. – Москва: Фонд «Иносфера». НИАПрирода; Минск: Белкартография, 2009. –140 с.
  69. Bossew P. Plutonium Emission from the Fukushima Accident / P. Bossew // IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - IRPA 2013. – Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2013. – P. 1–11. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/020/45020946.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/020/45020946.pdf)
  70. Kimura H. The situation of Ag and Pu radioisotopes in soil released from Fukushima Daiichi nuclear power plants / H. Kimura, M. Uesugi, A. Muneda [et al.] // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2015. – № 303. – P. 1469–1471.
  71. Livens F.R. Chemical Associations of Artificial Radionuclides in Cumbrian Soils / F.R. Livens, M.S. Baxter // Journal of Environmental Radioactivity. – 1988. – № 7. – P. 75–86.
  72. Eakins J.D. Measurements of  $\alpha$ -emitting plutonium and americium in the intertidal sands of West Cumbria, UK / J.D. Eakins, A. Morgan, G.M.N. Baston [et al.] // Journal of Environmental radioactivity. – 1990. – Vol. 11, № 1. – P. 37–54.
  73. Horrill A.D. The Influence of Grassland Management on the Radionuclide Inventory of Soils in West Cumbria, UK // Journal of Environmental radioactivity. – 1990. – № 12. –P. 143–165.
  74. McCarthy W. Mass-Spectrometric Analysis of Plutonium in Soils Near Sellafield / W. McCarthy, T.M. Nicholls. // Journal of Environmental radioactivity. –1990. – № 12. – P. 1–12.
  75. Eyrolle F. Plutonium isotopes in the lower reaches of the River Rhône over the period 1945–2000: fluxes towards the Mediterranean Sea and sedimentary inventories / F. Eyrolle, S. Charmasson, D. Louvat // Journal of Environmental

- Radioactivity. – 2004. – Vol. 74, № 1-3. – P. 127–138. doi:10.1016/j.jenvrad.2004.01.017.
76. Litaor M.I. The behavior of radionuclides in the soils of Rocky Flats, Colorado / M.I. Litaor, G. Barth, E. Zika [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 1998. – Vol. 38, № 1. – P. 17–46. doi:10.1016/s0265-931x(97)00019-2.
77. Survey of plutonium and uranium atom ratios and activity levels in Mortandad Canyon / Edited by Hector Hinojosa, Group CIC-1. – Los Alamos. New Mexico 87545: Los Alamos National Laboratory, 1997. – 26 p.
78. Alberts J.J. The distribution of plutonium, Americium and curium isotopes in pond and stream sediments of the Savannah river plant, South Carolina, USA. / J.J. Alberts, J.E. Halverson, K.A. Orlandini // Journal of Environmental Radioactivity. – 1986. – Vol. 3, № 4. – P. 249–271. doi:10.1016/0265-931x(86)90002-0.
79. Markham O.D. Plutonium and Americium Contamination near a Transuranic Storage Area in Southeastern Idaho. / O.D. Markham, K.W. Puphal, T.D. Filer // Journal of Environment Quality. – 1978. – Vol. 7, № 3. – P. 422–428. doi:10.2134/jeq1978.00472425000700030026x.
80. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера». НИА-Природа, 2013. – 140 с.
81. Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований. Том IV: Экологическая безопасность, инновации и устойчивое развитие. Образование для устойчивого развития / под ред. проф. Латыповой В.З. и доц. Яковлевой О.Г. – Казань.: Изд-во «Отечество», 2009. – 404 с.
82. Gauthier-Lafaye F. Radioisotope contaminations from releases of the Tomsk-Seversk nuclear facility (Siberia, Russia) / F. Gauthier-Lafaye, L. Pourcelot, J. Eikenberg [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – № 99. – P. 680–693.

83. Jiménez-Ramos M.C. Presence of plutonium contamination in soils from Palomares (Spain) / M.C. Jiménez-Ramos, R. García-Tenorio, I. Vioque [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2006. – Vol. 142, № 3. – P. 487–492. doi:10.1016/j.envpol.2005.10.030.
84. McMahon C. Oxidation-state distribution of plutonium in surface and subsurface waters at Thule, northwest Greenland / C. McMahon, L. León Vitró, P. Mitchell [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2000. – Vol. 52, № 3. – P. 697–703. doi:10.1016/s0969-8043(99)00232-8.
85. *The Effects of Nuclear Weapons* / Compiled and edited by S. Glasstone and P.J. Dolan. – Prepared and published by the United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration, 1977. – 653 pp. <https://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2013/01/Effects-of-Nuclear-Weapons-1977-3rd-edition-complete.pdf>.
86. Умаров М.А. Радиоактивные выпадения от атмосферных ядерных испытаний / М.А. Умаров, О.И. Артемьев // *Вестник НЯЦ РК. Радиоэкология. охрана окружающей среды*, – 2001. – № 3. – С. 20–25.
87. *Эрозионные и русловые процессы*. / Под редакцией профессора Р.С. Чалова. Вып. 4. – М.: МГУ, 2005. – 349 с.
88. Израэль Ю.А. Коллекция географических изображений полей радиоактивного загрязнения / Ю.А. Израэль, Е.В. Квасникова. // *Известия РАН. Серия Географическая*, – 2007 – № 5. – С. 7–17.
89. Шуктомова И.И. Особенности распределения  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и изотопов плутония в грунтах на территории проведения Мирного ядерного взрыва / И.И. Шуктомова, Н.Г. Рачкова // *Геохимия*. – 2015. – № 8. – С. 761–768.
90. Ibrahim S.A. Distribution of plutonium among soil phases near a Subsurface Disposal Area in Southeastern Idaho, USA / S.A. Ibrahim, R.C. Morris // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 1997. – Vol. 226. – № 1-2. – P. 217–220.
91. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Выпуск 1. Радиоэкологическое состояние «северной» части территории

- Семипалатинского испытательного полигона / под. рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2010. – 234 с.
92. Luksiene V. On peculiarities of vertical distribution of  $^{239,240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations and their ratios in lake sediments and soils / V. Luksiene, E. Maceika, N. Tarasiuk [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2014. – № 300. – P. 277–286. DOI 10.1007/s10967-014-3026-0.
93. Abraham J. Fate of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  in soil profiles at a water recharge site in Basel, Switzerland / J. Abraham, K. Meusburger, J.K. Waldis [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – № 182. – P. 85–94. doi:10.1016/j.jenvrad.2017.11.019.
94. 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.
95. Carini F. Radionuclide transfer from soil to fruit // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2001. – Vol. 52. – №. 2-3. –P. 237-279. doi:10.1016/s0265-931x(00)00035-7.
96. Outola I. Effect of industrial pollution on the distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soil and the soil-to-plant transfer in a pine forest in SW Finland / I. Outola, R. Pehrman, T. Jaakkola // *Science of the Total Environment*. – 2003. – Vol. 303. – №. 3. – P. 221–230. doi:10.1016/s0048-9697(02)00402-3.
97. Ni Y. The transfer of fallout plutonium from paddy soil to rice: A field study in Japan / Y. Ni, Z. Wang, J. Zheng [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – Vol. 196. – P. 22–28. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.10.010.
98. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Выпуск 3. Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2011 г. / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т. 2. – 396 с.
99. Kozhakhhanov T.E. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests / T.E. Kozhakhhanov, S.N. Lukashenko, N.V. Larionova // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – №. 137. – P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.026>.



100. Larionova N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site / N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, A.M. Kabdyrakova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – № 186. – P. 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.006>.
101. Ларионова В.Н. Содержание искусственных радионуклидов в *Pinus silvestris* на следах радиоактивных выпадений, образовавшихся после первого наземного ядерного испытания на Семипалатинском испытательном полигоне / В.Н. Ларионова, А.Р. Иванова, А.О. Айдарханов // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – № 3. – С. 143–146.
102. Шуранкова, О.А. Поступление трансурановых элементов ( $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) Чернобыльского происхождения в луговую растительность // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – Vol. 1, № 7. – С. 67–71.
103. Спилов Р.К. Аккумуляция трансурановых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений / Р.К. Спилов, А.Н. Никитин, И.А. Чешик, Р.А. Король // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 61. – № 2. – С. 51–57.
104. Тагай С.А. Параметры перехода  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  в сельскохозяйственные культуры / С.А. Тагай, Н.В. Дударева, Е.К. Нилова // Современные проблемы радиобиологии: Материалы международной научной конференции, Гомель, 23–24 сентября 2021 года. – Минск: Информационно-вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь, 2021. – С. 166–169.
105. Пузан Н.А. Поступление ТУЭ в травянистые растения на радионуклидно загрязненных территориях прилегающих к ЧАЭС / Н.А. Пузан, В.П. Кудряшов, А.А. Аммон // – Гомель: Институт радиобиологии НАН Беларуси, БГУ, 2008. – С. 118–121. <https://elib.bsu.by/handle/123456789/17850>.
106. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года / под общей ред. д.б.н. В.С. Аверина. – Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Институт радиологии» МЧС РБ. Гомель: ОАО «Полеспечать», 2014. – 176 с.

107. Дементьев Д.В. Накопление радионуклидов в ягодных кустарниках лесных экосистем бассейна реки Енисей / Д.В. Дементьев, А.Я. Болсуновский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, №. 1-4, – С. 990–992.
108. Горяченкова Т.А. Содержание радионуклидов в почвах и биоте зоны воздействия аварийного подземного ядерного взрыва "Кратон-3", Якутия / Т.А. Горяченкова, П.И. Собакин, А.П. Чевычелов [и др.] // Геохимия. – 2017. – № 7. – С. 644–652. DOI 10.7868/S0016752517070056.
109. Физиология растений. В 2 томах. Том 1: учебник для вузов / В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2021. — 437 с.
110. Физиология растений. В 2 томах. Том 2: учебник для вузов / В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2021. — 459 с.
111. Сельскохозяйственная радиоэкология / под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. – Москва : Экология, 1992. – 400 с.
112. Nisbet A.F. Summary of a Five-Year Lysimeter Study on the Time Dependent Transfer of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  to Crops from Three Contrasting Soil Types. 2 Distribution Between Different Plant Parts / A.F. Nisbet, S. Shaw // Journal of Environmental Radioactivity. – 1994. – № 23. – P. 171–187.
113. Nisbet A.F. Summary of a Five-Year Lysimeter Study on the Time Dependent Transfer of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  to Crops from Three Contrasting Soil Types: 1. Transfer to the Edible Portion/ A.F. Nisbet, S. Shaw // Journal of Environmental Radioactivity. – 1994. – № 23. – P. 1–17.
114. Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. У.С. Хэнсона; пер. с англ. Г.Н. Романова. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –344 с.
115. Жерин И.И. Химия тория, урана, плутония: учебное пособие. –Томск: ТПУ, 2010. –147 с.

116. Guillen J. Attempt to reduce  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  uptake by wheat plantlets by application of inorganic fertilizers / J. Guillen, G. Munoz, A. Baeza [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2017. – № 311. – P. 991–997.
117. Whicker F.W. Uptake of natural and anthropogenic actinides in vegetable crops grown on a contaminated lake bed / F.W. Whicker, T.G. Hinton, K.A. Orlandini [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 1999. – № 45. – P. 1–12.
118. Dowdall M. Will global warming affect soil-to-plant transfer of radionuclides? / M. Dowdall [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2008. – Vol. 99, № 11. – P. 1736–1745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.012>.
119. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: дата введения 01.01.2019. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 10 с.
120. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб: дата введения 01.01.2019. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 6 с.
121. ГОСТ Р 58588-2019. Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа: дата введения 01.01.2020. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 8 с.
122. Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках / М-во сельского хоз-ва Российской Федерации; [подгот.: В. Г. Сычев и др.]. – Москва: Росинформагротех, 2006. – 75 с.
123. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / Под ред. А.Н. Марeya и А.С. Зыковой. – М: МЗ СССР, 1980. – 336 с.
124. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода / З.И. Журбицкий. – Москва : Наука, 1968. – 266 с.
125. Агрoхимия: Учебник для сельскохозяйственных вузов / под ред. В.М. Клечковского и А. В. Петербургского. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Колос, 1967. – 584 с.

126. Методика выполнения измерений «Определение удельной активности искусственных радионуклидов плутония – (239+240), стронция – 90 в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» / Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики», 2016. – 26 с.
127. Лукашенко С.Н. Разработка экспресс-процедуры разложения проб почв для анализа на содержание изотопов плутония / С.Н. Лукашенко, М.А. Эдомская // II Международный научный форум «Ядерная наука и технологии» М43: Тезисы докладов. – Алматы: РГП ИЯФ, 2019. – С. 190-191.
128. Лукашенко С.Н. Совершенствование схем процедуры анализа грунтов, почв и донных отложений на содержание изотопов плутония / С.Н. Лукашенко, М.А. Эдомская // Будущее атомной энергетики - AtomFuture 2019. Тезисы докладов XV Международной научно-практической конференции. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2020.– С. 24–25.
129. Инструкция выполнения измерений «Определение удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$ , в объектах окружающей среды: почвах, грунтах, донных отложениях и растениях» / Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 2020. – 17 с.
130. ГОСТ 29269-91. Почвы. Общие требования к проведению анализов: дата введения 01.07.1993 – Москва : Стандартинформ, 2018. – 4 с.
131. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования: дата введения 01.01.2013 – Москва : Стандартинформ, 2018. – 28 с.
132. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: дата введения 01.09.2019 – Москва : Стандартинформ, 2021. – 26 с.
133. Edomskaaya M.A. Estimation of radionuclides global fallout levels in the soils of CIS and Eastern Europe territory / M.A. Edomskaaya, 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>.

134. 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 международной научно-практической конференции, Обнинск, 16-18 сентября 2020 г. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. – С. 147–149.
135. Сточкуте Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. – 2016. – №. 2 (37). – С. 84–96.
136. Экологические отчеты АО «Концерн Росэнергоатом». [Электронный ресурс]. URL: [https://www.rosenergoatom.ru/safety\\_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/](https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/) (дата обращения: 25.12.2022).
137. Крышев И.И. Оценка риска радиоактивного загрязнения окружающей среды при эксплуатации АЭС / И.И. Крышев, Е.П. Рязанцев // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – №. 2. – С. 158–164.
138. Теодорович О.А. Исследование радиационной обстановки на арктическом побережье северных морей и в районах размещения потенциальных источников радиоактивных загрязнений для разработки и оптимизации радиационного мониторинга региона / О.А. Теодорович, Г.И. Мирецкий, П.В. Рамзаев [и др.] // Современные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения: сборник докладов и тезисов научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2006. – С. 77–80.
139. 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.

140. Панов А.В. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трапезников, В.К. Кузнецов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 3. – С. 146–157.
141. Караваева Е.Н. Техногенные радионуклиды в почвенно-растительном покрове в районе Белоярской АЭС / Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, А.В. Трапезников // Вопросы радиационной безопасности. – 2007. – №. 1. – С. 17–22.
142. Михайловская Л.Н. Плутоний в экосистемах импактной зоны Белоярской АЭС / Л.Н. Михайловская, И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47. – №. 4. – С. 471–475.
143. 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101>.
144. Михайловская Л.Н. Радиоэкологический мониторинг почвенного покрова в наблюдаемой зоне Белоярской АЭС / Л.Н. Михайловская, О.В. Рукавишникова // Экология XXI века: синтез образования, науки, производства. – Челябинск: ЮУрГГПУ, 2017. – С. 144–146.
145. Молчанова И.В. Итоги многолетних радиоэкологических исследований природных экосистем в зоне жидких сбросов Белоярской атомной электростанции / И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева, Л.Н. Михайловская // Вопросы радиационной безопасности. – 2009. – №. 4. – С. 20–27.
146. Панов А.В. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районе расположения Белоярской атомной электростанции / А.В. Панов, В.Н. Душин, Н.Н. Исамов [и др.] // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций. Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3. Обнинск. – 2020. – С. 67–86.

147. Panitskiy A.V. Nature of radioactive contamination of components of ecosystems of streamflows from tunnels of Degelen massif / A.V. Panitskiy, S.N. Lukashenko // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2015. – Т. 144. – С. 32–40.
148. Алексахин Р.М. Итоги преодоления последствий Чернобыльской катастрофы в агрофере // *Агрехимический вестник*. – 2006. – № 2. С 2–5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-preodoleniya-posledstviy-chernobylskoy-katastrofy-v-agrosfere> (дата обращения: 11.08.2022).
149. Кудин М.В. Аспекты развития Полесского государственного радиационно-экологического заповедника // *Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС*. –Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. – С. 344–347.
150. Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. / под ред. В.В. Лапа и Н.Н. Цыбулько. –Минск: ИВЦ Минфина, 2019. –97 с.
151. Забродский В.Н. Оценка концентрации топливных частиц, выпавших на территорию Белорусской части Чернобыльской зоны отчуждения / В.Н. Забродский, Ю.И. Бондарь, В.Н. Калинин, В.И. Садчиков // *Радиационная биология. Радиоэкология*. – 2018. – Т. 58, №. 4. – С. 395–405.
152. Ануфрик С.С. Оценка концентраций химических элементов и физико-химических форм америция и плутония в почвах Полесского радиационно-экологического заповедника спустя 25 лет после аварии на ЧАЭС / С.С. Ануфрик, А.Ю. Ильяшук, Т.К. Крупская // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление*. – 2013. – №. 3. – С. 99–106.
153. Шамаль Н.В. Поверхностное загрязнение и распределение техногенных радионуклидов в растениях луговых фитоценозов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Н.В. Шамаль, Р.А. Король, Е.А. Клементьева, А.А. Дворник // *Мониторинг состояния и*

- загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. – Москва: ФГБУ ИГКЭ, 2017. – С. 597–598.
154. Шамаль Н.В. Поверхностное загрязнение и распределение изотопов плутония и америция-241 в растениях рода *artemisia* // Экологическая культура и охрана окружающей среды: II Дорофеевские чтения. – Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2016. – С. 76–78.
155. Братухин Н.О. Исследование распределения плутония по гранулометрическим фракциям почвы зоны чернобыльских выпадений / Н.О. Братухин, М.А. Эдомская, С.Н. Лукашенко [и др.] // XVIII международная молодежная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2022» – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 166–168.
156. Эдомская М.А. Оценка содержания изотопов плутония в почвах Полесского радиационно-экологического заповедника / М.А. Эдомская, С.Н. Лукашенко, П.Ю. Волкова, А.В. Томсон, С.В. Коровин // Радиэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. – С. 157–160.
157. Сюняева О.И. Почвы Калужской области. Учебное пособие / О.И. Сюняева, Ю.В. Леонова. – Калуга: ИП Якунин А.В., 2022. – 156 с.
158. Ашитко А.Г. Радиационная обстановка на территории Калужской области 30 лет спустя после аварии на Чернобыльской АЭС / А.Г. Ашитко, Д.В. Золочевский, Л.В. Овсянникова, С.А. Рожкова // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, №. 2. – С. 40–47. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-2-40-47>.
159. Кручинин А.А. Радиационно-гигиенический мониторинг на территориях Калужской области, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / А.А. Кручинин, А.А. Фадеев, Л.И. Дичковский [и др.] // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 2, №. 2. – С. 14–19.
160. Цветнова О.Б. Современная радиэкологическая обстановка в лесных и залежных экосистемах на территории Калужской области / О.Б. Цветнова,



- О.П. Кононец, А.И. Щеглов // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2020. – №. 4. – С. 35–42.
161. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии / под. ред. Ю.А. Израэль. – Люксембург: Бюро по официальным изданиям Европейской Комиссии, 1998. – 108 с.
162. Плылова И.А. Состав гумуса дерново-подзолистых супесчаных и суглинистых почв при известковании, окультуривании и состоянии залежи: специальность 06.01.01 – общее земледелие, 03.02.13 – почвоведение: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Плылова Ирина Анатольевна. – Санкт-Петербург, 2011. – 18 с.
163. 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.
164. Козьмин Г.В. Ядерное наследие. Радиационно-экологическая оценка Обнинского регионального хранилища РАО / Г.В. Козьмин, Б.И. Сынзыныс, А.Н. Васильева, А.В. Бахвалов // Вестник РАЕН. – 2012. – №4. – С. 46–51.
165. Васильева А.Н. Оценка влияния регионального хранилища радиоактивных отходов на окружающую природную среду и население // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2007. – Вып. 1, № 3. – С. 65–73.
166. Вайзер В.И. Радиационно-экологическая обстановка в районе размещения Обнинского регионального хранилища радиоактивных отходов / В.И. Вайзер, Г.В. Козьмин, А.Н. Васильева, А.В. Бахвалов // Радиация и риск. – 2012. – Т. 21, № 3. – С. 97–105.
167. Васильева А.Н. Оценка загрязнения биоценоза в районе размещения регионального хранилища радиоактивных отходов и его влияния на грызунов / А.Н. Васильева, Б.И. Сынзыныс, Л.П. Ульянова, О.А. Ковалев // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 608–615.

168. 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.
169. Подлущкий М.С. Уровни содержания изотопов плутония на территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов / М.С. Подлущкий, М.А. Эдомская, С.Н. Лукашенко [и др.] // XVI международная молодежная научно-практическая конференция «Будущее атомной энергетики – AtomFuture 2020» – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2020.– С. 53–55.
170. Братухин Н.О. Оценка содержания изотопов плутония в верхнем слое почвы на территории, прилегающей к бывшему хранилищу радиоактивных отходов г. Обнинск / Н.О. Братухин, М.А. Эдомская, С.В. Коровин [и др.] // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии. Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. – С. 117–120.
171. 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. 26-30 сентября 2022 года Санкт-Петербург – Москва: Адмирал Принт, 2022. – С. 219.
172. Кремленков Д. Ю. Анализ факторов эколого-экономического риска районов размещения АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2003. – №. 1. – С. 70–76.
173. Яковлева Т.Ю. Радиоэкологическая обстановка на территории Российской Арктики / Т.Ю. Яковлева, А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко [и др.] // Всероссийская научная конференция с международным участием к столетию академика РАН К.Я. Кондратьева – Санкт-Петербург, 2020. – С. 91–95.

174. Антонченко В.В. Радиационная обстановка и угрозы радиоактивного загрязнения на Дальнем Востоке России // Природные и техногенные риски. – 2015. – № 1(13). – С. 60–66.
175. Хвостова М.С. Вопросы радиоэкологии арктического региона России // Российская Арктика. – 2019. – №. 4. – С. 58–71.
176. Эдомская М.А. Исследование миграции плутония в системе «почва-сельскохозяйственное растение» / М.А. Эдомская, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик [и др.] // Радиобиология и экологическая безопасность – 2022: материалы международной научной конференции (26–27 мая 2022 г., Гомель) – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – С. 192–195.
177. 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.
178. Эдомская М.А. Накопление плутония растительностью на разных почвах / М.А. Эдомская, С.Н. Лукашенко, А.А. Шупик, С.Г. Шаповалов // Почвоведение. – 2023. – № 6. – С. 1–8. DOI: 10.31857/S0032180X22601463.
179. Тимофеев, В.С. Эконометрика: учебник / В.С. Тимофеев, А.В. Фаддеенков, В.Ю. Щеколдин. - Новосибирск: НГТУ, 2014. - 345 с.
180. 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. 26-30 сентября 2022 года Санкт-Петербург – Москва: Адмирал Принт, 2022. – С. 243.