

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БОТАНИКИ ИМЕНИ
В.Ф. КУПРЕВИЧА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 57.043:58.009+58.085

СПИРОВ
Руслан Ковсарович

ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ТРАНСУРАНОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук**

по специальности 03.01.01 – радиобиология

Минск 2025

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель: **Никитин Александр Николаевич,**
кандидат сельскохозяйственных наук,
заместитель директора по научной работе
государственного научного учреждения
«Институт микробиологии Национальной
академии наук Беларуси»

Официальные оппоненты: **Родькин Олег Иванович,**
доктор биологических наук, профессор,
директор учреждения образования
«Международный государственный
экологический институт имени А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Храмченкова Ольга Михайловна,
кандидат биологических наук, доцент, доцент
кафедры биологии учреждения образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение
«Институт леса Национальной академии наук
Беларуси»

Защита состоится «02» апреля 2025 года в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.38.01 при государственном научном учреждении «Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27. E-mail: nan.botany@yandex.by. Телефон: (017) 378-14-69. Факс: (017) 322-18-53.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Я. Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан «01» марта 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат биологических наук, доцент

Е.Я. Куликова

ВВЕДЕНИЕ

Авария на Чернобыльской АЭС стала причиной загрязнения трансурановыми элементами (ТУЭ) 2 % площади территории Республики Беларусь плотностью загрязнения более $0,37 \text{ кБк} \times \text{м}^{-2}$, с наибольшими уровнями загрязнения на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) (35 лет после чернобыльской катастрофы..., 2020). Такие изотопы, как $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , при попадании в окружающую среду, обуславливают долговременное хроническое облучение растений и животных. Несмотря на то, что α -частицы, возникающие в результате распада ядер плутония и америция, имеют небольшую длину пробега в среде, высокая энергия ионизации на единицу пути обуславливает высокие значения коэффициентов относительной биологической эффективности (ОБЭ) α -излучения, по сравнению с другими типами излучений (L. Ballisat [et al.], 2023). Актуальность оценки доз облучения ТУЭ растений природных комплексов обусловлена формированием в последние годы экоцентрического принципа в радиационной защите биоты (Г. В. Лаврентьева, Б. И. Сынзыныс, 2020). Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) определены эталонные организмы и предложены справочные производные контрольные уровни доз облучения, при превышении которых существует вероятность вредного воздействия на представителя вида и проявление последствий на популяционном уровне (С. Н. Clement [et al.], 2017). Вместе с тем, до настоящего времени закономерности формирования доз облучения ТУЭ объектов биоты изучены недостаточно, вследствие чего существующие подходы носят весьма упрощенный характер, что может привести к сильным искажениям прогнозов радиобиологических последствий.

Широкое применение в радиоэкологии нашли цифровые технологии. Программное обеспечение для оценки радиационных рисков, такое как ERICA Assessment Tool, позволяет привести к единообразию расчет доз облучения, но требует регулярных обновлений в связи с появлением дополнительной информации о поведении радионуклидов в биоценозах (J. E. Brown [et al.], 2016). Совершенствуются методы контроля качества измерения удельной активности радионуклидов, в том числе и посредством анализа спектров ионизирующего излучения искусственными нейронными сетями (ИНС) (A. Baeza [et al.], 2011). Формирование единого комплекса приложений позволит упростить и автоматизировать задачи по оценке радиационных рисков, исключить ошибки, вносимые человеческим фактором.

Таким образом, получение дополнительных сведений об удельной активности ТУЭ в органах растений, уточнение их коэффициентов накопления объектами биоты, дозах облучения травянистых и древесных растений, а также разработка комплексного программного решения для работы с первичными

данными и контроля их качества, являются актуальными задачами в обеспечении экоцентрического принципа радиационной защиты биоты.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Работа выполнена в рамках грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси: «Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на растительные организмы в условиях Полесского государственного радиационно-экологического заповедника» (№№ госрегистрации: 20164205, 20170863), а также мероприятия Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2011–2015 годы и на период до 2020 года «Изучить характер перехода трансурановых элементов в звене «растения – дикие копытные животные» на территории ПГРЭЗ» (№№ госрегистрации: 20140937, 20150600).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 № 190, пункту 10 «Экология и природопользование», а также приоритетным направлениями научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 № 156, пункту 3 «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование».

Цель, задачи, объект и предмет исследования. *Цель исследования:* выявить закономерности формирования доз облучения долгоживущими изотопами трансурановых элементов растительных организмов в условиях зоны отчуждения Чернобыльской АЭС для оценки отдаленных радиационно-экологических последствий радиационной аварии.

Программа исследования включала в себя решение следующих задач:

- 1) изучить особенности накопления ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am надземными и подземными органами растений различных жизненных форм;
- 2) определить мощность поглощенной дозы ТУЭ для надземных и подземных органов сосудистых растений различных жизненных форм, произрастающих в наземных экосистемах ПГРЭЗ;
- 3) провести анализ облучения ТУЭ и ^{137}Cs репрезентативных видов растений с учетом относительной биологической эффективности излучения;
- 4) адаптировать способ оценки радиационно-экологического воздействия на растения различных жизненных форм с учетом распределения ТУЭ по органам и разработать программный комплекс для анализа воздействия искусственных

радионуклидов аварийного происхождения на объекты биоты в естественных экосистемах.

Объектами исследований являлись популяции травянистых и древесных видов сосудистых растений на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

Предмет исследований: накопление изотопов плутония и америция надземными и подземными органами травянистых, кустарничковых растений, деревьев ПГРЭЗ и формирование за счет данных радионуклидов поглощенной дозы в условиях хронического облучения.

Выбор объектов и предмета исследований обусловлен долговременным загрязнением территории ПГРЭЗ долгоживущими α -излучающими изотопами ТУЭ, обеспечивающими хроническое облучение объектов биоты заповедника.

Научная новизна: определены закономерности накопления ТУЭ надземными и подземными органами травянистых, кустарничковых растений, кустарников, деревьев на этапе отдаленных радиоэкологических последствий аварии с выбросом в окружающую среду радиоактивных веществ при разрушении реактора; рассчитаны коэффициенты накопления изотопов плутония и америция как надземными, так и подземными органами растений ПГРЭЗ, показано статистически значимое различие в накоплении ТУЭ надземными и подземными органами растений; рассчитаны поглощенные дозы и ОБЭ-взвешенные поглощенные дозы облучения ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ; предложены конверсионные коэффициенты для оценки доз облучения растений в ареале воздействия радиационной аварии; построены прогнозы изменения доз облучения надземных и подземных органов растений, произрастающих в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, в долгосрочной перспективе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Коэффициенты накопления плутония и америция надземными органами растений на этапе отдаленных радиоэкологических последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, сосредоточенные в диапазонах $6,00 \times 10^{-3}$ – $7,76 \times 10^{-2}$ и $5,54 \times 10^{-3}$ – $6,28 \times 10^{-2}$ соответственно, подземными органами – 0,11–1,42 для плутония и 0,12–2,29 для америция; надземные и подземные органы (ткани) растений значимо различаются по уровню накопления ТУЭ и располагаются в следующих убывающих рядах: травянистые растения, кустарнички и кустарники – подземные органы > надземные органы, деревья – обрастающие корни > скелетные корни > покровные ткани ствола и фотосинтезирующие органы > камбий ствола.

2. Мощность поглощенной дозы облучения доминантных и субдоминантных растений наземных экосистем ПГРЭЗ долгоживущими изотопами ТУЭ для надземных органов, сосредоточенная в диапазонах: ^{238}Pu – 0,4–5,2 нГр $\times$ ч $^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,2–3,1 нГр $\times$ ч $^{-1}$, ^{241}Am – 0,9–10,5 нГр $\times$ ч $^{-1}$; максимальный уровень

радиационной нагрузки характерен для подземных органов: ^{238}Pu – 3,8–250,0 нГр $\times$ ч $^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ – 6,3–460,0 нГр $\times$ ч $^{-1}$, ^{241}Am – 21,5–1460,0 нГр $\times$ ч $^{-1}$.

3. Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения доминантных и субдоминантных растений ПГРЭЗ ^{137}Cs и изотопами плутония и америция, достигающая 36,78 мГр $\times$ ч $^{-1}$ для обрастающих корней древесных растений; данная доза облучения не превышает справочных производных контрольных уровней, установленных Международной комиссией по радиационной защите, и проявление негативных эффектов ионизирующих излучений на представителей видов и популяции маловероятно.

4. Конверсионные дозовые коэффициенты ТУЭ и ^{137}Cs для надземных и подземных органов растений, которые сосредоточены в диапазонах: ^{238}Pu – 1,0–9,9, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,4–3,1, ^{241}Am – 0,7–5,2, ^{137}Cs – 0,6–4,2 (нГр $\times$ ч $^{-1}$) $\times$ (кБк $\times$ м $^{-2}$) $^{-1}$ для надземных органов, и ^{238}Pu – 14,7–130,0, $^{239+240}\text{Pu}$ – 12,7–110,0, ^{241}Am – 15,2–210,0, ^{137}Cs – 2,2–4,3 (нГр $\times$ ч $^{-1}$) $\times$ (кБк $\times$ м $^{-2}$) $^{-1}$ для подземных органов. Отличие предложенного метода оценки доз облучения растений состоит в учете различий в накоплении радионуклидов между надземными и подземными органами, что повышает надежность выявления ситуаций с уровнем радиационного воздействия на популяции растений, требующих применения защитных мер.

Личный вклад соискателя ученой степени заключается в проведении экспериментальной части работы, поиске, систематизации и анализе научной литературы по теме диссертации, обработке первичных данных, разработке искусственной нейронной сети и ее обучении, написании программного комплекса. Постановка цели и задач исследования, интерпретация результатов, формулировка положений, выносимых на защиту, подготовка научных публикаций осуществлялись совместно с научным руководителем к. с.-х. н. А. Н. Никитиным. Проведение радиохимического анализа для определения содержания ТУЭ выполнялось совместно с научным сотрудником Института радиобиологии НАН Беларуси Р. А. Король (личный вклад соискателя не менее 90 %), агрохимический анализ почвы выполнен научным сотрудником лаборатории радиоэкологии Г. А. Леферд.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Материалы диссертационной работы представлены в виде докладов на 12 конференциях: международная научная конференция «Чернобыль: 30 лет спустя» (г. Гомель, 21–22 апреля 2016 г.), международная научная конференция «Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья» (г. Минск, 14–17 сентября 2016 г.), международная научная конференция «Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах» (г. Минск – д. Каменюки, 20–23 сентября 2016 г.), международная научная конференция «Радиобиология: минимизация радиационных рисков» (г. Гомель, 29–30 сентября 2016 г.),

международный научно-практический форум «Ядерные технологии на страже здоровья» (г. Москва, 1–3 ноября 2016 г.), международная научная конференция «Молодежь в науке» (г. Минск, 22–25 ноября 2016 г.), международная научно-практическая конференция «Экологическая культура и охрана окружающей среды» (г. Витебск, 29–30 ноября 2016 г.), XXIV ежегодная научная конференция Института ядерных исследований НАН Украины (г. Киев, 10–13 апреля 2017 г.), международная научная конференция «Радиобиология: актуальные проблемы» (г. Гомель, 27–28 сентября 2018 г.), международная научно-практическая конференция «Биологическое разнообразие лесных экосистем: состояние, сохранение и использование» (г. Гомель, 13–15 ноября 2018 г.), международная научная конференция «Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века» (г. Минск, 23–24 мая 2024 г.), международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность – 2024» (г. Гомель, 30–31 мая 2024 г.).

Результаты исследований внедрены: в рабочий процесс лаборатории массовых анализов Республиканского научно-исследовательского унитарного предприятия «Институт радиологии» (Акт о практическом использовании результатов исследования от 21.12.2017 г.); в рабочий процесс в научно-исследовательской лаборатории радиохимии химического факультета Белорусского государственного университета (Акт о практическом использовании результатов исследования от 23.01.2018 г.); в рабочий процесс в лаборатории спектрометрии и радиохимии Государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» (Акт о практическом использовании результатов исследования от 19.02.2024 г.); в учебный процесс на кафедре биологии биологического факультета Учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины» (Акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс от 27.02.2024 г.). По результатам исследований зарегистрированы 3 информационных ресурса в Государственном регистре информационных ресурсов (№ 5342336483, дата регистрации 15.11.2023 г.; № 5342336785, дата регистрации 11.12.2023 г.; № 5342337137, дата регистрации 29.12.2023 г.) и 1 объект авторского права (компьютерная программа) в Реестре компьютерных программ Национального центра интеллектуальной собственности (№ 1714-КП, дата регистрации и депонирования 10.04.2024 г.).

Опубликование результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 24 печатные работы: 7 статей в рецензируемых научных журналах, соответствующих п. 19 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий»; 15 материалов конференций; тезисы 2 докладов международных конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 8,5 авторских листа (личный вклад соискателя – 6,8 авторских листа), в том числе в изданиях,

включенных в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертаций – 5,0 авторских листа (личный вклад соискателя – 4,0 авторских листа).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. В первой главе приводится обзор литературных данных о поведении трансурановых элементов в окружающей среде. Вторая глава посвящена описанию объекта, программы и методики исследования. Третья глава содержит результаты об удельной активности и коэффициентах накопления ТУЭ. Четвертая глава содержит результаты о дозах облучения растений ТУЭ. Пятая глава содержит описание разработанного программного комплекса для расчета доз облучения изотопами ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am объектов биоты. Диссертация изложена на 172 страницах, содержит 31 рисунок, 45 таблиц и 10 приложений. Список использованных источников состоит из библиографического списка, включающего 175 ссылок на цитируемую литературу, и списка публикаций соискателя ученой степени, на 20 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Аналитический обзор литературы. В первой главе приведен обзор зарубежной и отечественной литературы по вопросам поступления ТУЭ в окружающую среду, их биологическому значению для растений, а также рассмотрены современные подходы к радиационной защите биоты. Основным источником ТУЭ для территории Республики Беларусь стала авария на Чернобыльской АЭС. Плутоний и америций сосредоточены, в основном, в верхнем пятисантиметровом слое почвы территории ПГРЭЗ. Горизонтальная и вертикальная миграция их в почве зависит от химических свойств элемента, типа почвы, pH среды, водного режима, дисперсности частиц, в состав которых они входят. Последствия попадания в окружающую среду ТУЭ и их воздействия на растительные организмы проявляются на клеточном, органном, индивидуальном, популяционном уровне. Развитие подходов к радиационной защите биоты претерпевало ряд серьезных изменений, заключающихся в смене парадигм: от антропоцентрической до экоцентрической. Проведенный анализ литературных данных показывает, что растительные организмы на территории ПГРЭЗ подвергаются хроническому воздействию ионизирующего излучения. Несмотря на то, что биологические эффекты от воздействия ионизирующего излучения определяются дозой облучения, о дозах облучения изотопов плутония и америция для растений, произрастающих на территории ПГРЭЗ, данных немного. Поскольку $^{238,239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am имеют длительные периоды полураспада, важно оценить

получаемые биотой дозы облучения на текущий момент и в будущем. Оценка и прогнозирование доз облучения ТУЭ растений в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС с учетом коэффициентов ОБЭ является актуальной задачей в области радиационной защиты биоты.

Объекты и методы исследований. Во второй главе описаны объекты и методы исследований, приведена характеристика пробных площадок.

Отбор проб почвы и растений проводили в 2015 г. на четырех пробных площадках ПГРЭЗ, при выборе которых руководствовались следующими критериями: уровень загрязнения радионуклидами и тип фитоценоза. Пробные площадки соответствовали следующим типам фитоценозов: площадка I – суходольных лугов, площадка II – березняк травяной, площадка III – сосняк мшистый, площадка IV – черноольшаник крапивный. Пробные площадки расположены в окрестностях бывшего населенного пункта Масаны (площадки I, II, III) и урочища Майдан (площадка IV).

На пробной площадке I отобраны надземные и подземные органы 5 видов травянистых растений из 4 семейств, являющихся доминантами и субдоминантами в растительном сообществе: полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), Астровые (*Asteraceae*); горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), Бобовые (*Fabaceae*); желтушник серый (*Erysimum diffusum* Ehrh.), Капустные (*Brassicaceae*); Мятликовые (*Poaceae*): булавоносец седой (*Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv.), мятлик узколистый (*Poa angustifolia* L.). На пробной площадке II отобраны пробы 4 видов сосудистых растений из 4 семейств: береза повислая (*Betula pendula* Roth), Березовые (*Betulaceae*); черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), Вересковые (*Ericaceae*); крушина ломкая (*Frangula alnus* Mill.), Крушиновые (*Rhamnaceae*); овсяница овечья (*Festuca ovina* L.), Мятликовые (*Poaceae*). С пробной площадки III в анализ включены 5 видов растений из 4 семейств: *B. pendula*; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), Буковые (*Fagaceae*); *Ericaceae*: брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), *V. myrtillus*; сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), Сосновые (*Pinaceae*). 8 видов растений из 7 семейств отобраны с площадки IV: *Betulaceae*: лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H. Karst.), ольха черная (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.); орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.), Деннштедтиевые (*Dennstaedtiaceae*); ирис ложноаировый (*Iris pseudacorus* L.), Ирисовые (*Iridaceae*); крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), Крапивные (*Urticaceae*); тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), Мятликовые (*Poaceae*); осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L.), Осоковые (*Cyperaceae*); ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), Спаржевые (*Asparagaceae*).

Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в почве пробных площадок представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в верхнем 20-см слое почвы пробных площадок (2015 г.)

Пробная площадка	Удельная активность, Бк×кг ⁻¹			
	^{137}Cs	^{238}Pu	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
I	$(23,95 \pm 1,87) \times 10^3$	$87,30 \pm 13,10$	$210,24 \pm 31,54$	$535,25 \pm 80,29$
II	$(21,98 \pm 1,79) \times 10^3$	$71,87 \pm 10,78$	$143,49 \pm 21,52$	$501,72 \pm 75,26$
III	$(13,34 \pm 0,35) \times 10^3$	$38,55 \pm 3,44$	$85,63 \pm 7,48$	$259,42 \pm 54,14$
IV	$(5,02 \pm 0,29) \times 10^3$	$9,60 \pm 1,26$	$16,09 \pm 1,93$	$56,22 \pm 14,65$

Отбор почвенных и растительных образцов проводили по общепринятой методике (ГОСТ 17.4.3.01-83). Для определения удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в растительных образцах отбирали надземные и подземные органы растений. Брали объединенную пробу, состоящую из трех индивидуальных, в количестве, необходимом для радиохимического анализа с учетом того, что растительные образцы будут подвергнуты сушке. У древесных растений отбирали пробы коры и камбия (внешний слой древесины), листьев (хвои), скелетные и обрастающие корни. Подземные органы отмывали от почвы под проточной водой. Растительные образцы измельчали и взвешивали, фасовали в полиэтиленовые пакеты и маркировали. Высушенные до постоянной сухой массы при 80–100 °С пробы измельчали на мельнице для последующего определения ТУЭ.

Выделение ТУЭ проводили согласно методике МВИ.МН 1892-2003. ТУЭ осаждали на плоские счетные мишени, их активность измеряли на α -спектрометрической системе Alpha Analyst от CANBERRA. Математическую обработку спектров проводили при помощи программного обеспечения Apex Alpha. Измерение удельной активности ^{137}Cs в почве и биологических образцах проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями (МВИ.МН 3421-2010) на γ -спектрометре CANBERRA Packard с коаксиальным полупроводниковым детектором Ge(Li) расширенного энергетического диапазона.

На основе данных об удельной активности изотопов плутония и америция в почве и растениях, рассчитывали коэффициенты накопления радионуклидов надземными и подземными органами. Расчет мощности поглощенной дозы облучения ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am проводили методом дозовых коэффициентов по удельной активности изотопов в надземных и подземных органах (для внутренней дозы облучения) и почве (для внешней дозы облучения), согласно Публикации № 136 МКРЗ. Расчет мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ проводили с учетом следующих видов излучения (Публикации МКРЗ № 136 и 148): осколки деления ($C_{\text{RBE}} = 20$), альфа-частицы ($C_{\text{RBE}} = 10$), низкоэнергетическое бета- и гамма-излучение ($C_{\text{RBE}} = 3$), другое бета- и гамма-излучение ($C_{\text{RBE}} = 1$).

Конверсионные дозовые коэффициенты (КДК) рассчитывали как отношение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы к плотности загрязнения пробной

площадки. Прогноз доз облучения растений проводили исходя из того, что изменение содержания исследуемых радиоизотопов в почве и органах растений будет обусловлено только их радиоактивным распадом без учета возможных изменений параметров миграции между компонентами экосистем и пространственного перераспределения.

Статистическую обработку данных (расчет средних арифметических, медиан, квартилей распределения) проводили в приложении STATISTICA 64 Trial версии 10. Для определения статистической значимости различий между двумя группами использовали U-критерий Манна-Уитни. Разработку архитектуры нейронной сети, обучение, определение параметров качества работы проводили в модуле Neural Networks приложения STATISTICA 64 Trial версии 10. Подготовку графического материала проводили в приложениях STATISTICA 64 Trial версии 10 и Microsoft Excel 2016. Программные продукты написаны в среде программирования Microsoft Visual Studio Community Edition 2015–2022 на объектно-ориентированном языке программирования C# с использованием фреймворков .Net MAUI, .Net Framework 4.8, .Net 6, ASP.NET Core 6.

Накопление трансурановых элементов растениями природных комплексов ПГРЭЗ. В третьей главе представлены результаты определения содержания ТУЭ в надземных и подземных органах растений ПГРЭЗ, их коэффициентов накопления.

Удельная активность трансурановых элементов в надземных и подземных органах растений. Параметры распределения значений удельной активности ТУЭ и ^{137}Cs в надземных и подземных органах растений ПГРЭЗ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры распределения значений удельной активности ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am в надземных и подземных органах растений ПГРЭЗ

Изотоп, ед. изм.	Органы	N	Me	Мин	Макс	Q ₁	Q ₃
1	2	3	4	5	6	7	8
Пробная площадка I (суходольный луг)							
^{137}Cs , кБк×кг ⁻¹	надземные	5	1,33	0,66	9,68	0,89	1,94
	подземные	5	23,88	13,10	38,25	22,53	29,45
^{238}Pu , Бк×кг ⁻¹	надземные	5	1,38	0,75	5,16	1,32	4,70
	подземные	5	95,78	27,35	3,68×10 ²	38,88	1,04×10 ²
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк×кг ⁻¹	надземные	5	2,33	0,59	8,34	1,65	2,74
	подземные	5	1,59×10 ²	60,58	2,21×10 ²	92,63	2,04×10 ²
^{241}Am , Бк×кг ⁻¹	надземные	5	5,96	3,41	24,51	5,21	7,26
	подземные	5	5,65×10 ²	1,58×10 ²	6,82×10 ²	2,70×10 ²	6,08×10 ²

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Пробная площадка II (березняк травяной)							
^{137}Cs , кБк×кг ⁻¹	надземные	8	24,17	6,13	97,79	8,32	48,26
	подземные	5	31,11	8,21	87,37	19,44	51,92
^{238}Pu , Бк×кг ⁻¹	надземные	8	1,39	0,47	2,06	0,86	1,74
	подземные	5	8,62	4,57	1,34×10 ²	7,95	62,65
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк×кг ⁻¹	надземные	8	0,60	0,24	3,12	0,43	0,87
	подземные	5	16,13	11,60	3,07×10 ²	15,06	1,29×10 ²
^{241}Am , Бк×кг ⁻¹	надземные	8	2,91	0,62	1,65×10 ²	1,44	5,76
	подземные	5	62,50	25,24	1,01×10 ³	36,81	4,48×10 ²
Пробная площадка III (сосняк мшистый)							
^{137}Cs , кБк×кг ⁻¹	надземные	19	42,54	3,87	2,79×10 ²	15,30	79,83
	подземные	8	46,53	17,11	79,68	32,78	72,51
^{238}Pu , Бк×кг ⁻¹	надземные	19	2,30	0,62	8,37	1,49	2,97
	подземные	8	18,65	9,99	94,38	12,96	54,09
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк×кг ⁻¹	надземные	19	1,03	0,00*	6,57	0,68	1,54
	подземные	8	44,20	19,83	1,98×10 ²	29,11	1,12×10 ²
^{241}Am , Бк×кг ⁻¹	надземные	19	3,27	1,36	11,37	2,42	4,74
	подземные	8	3,56×10 ²	1,14×10 ²	2,17×10 ³	1,32×10 ²	6,85×10 ²
Пробная площадка IV (черноольшаник крапивный)							
^{137}Cs , кБк×кг ⁻¹	надземные	16	13,11	4,32	76,57	7,02	32,75
	подземные	10	23,90	11,20	32,43	14,13	28,30
^{238}Pu , Бк×кг ⁻¹	надземные	16	0,51	0,14	6,13	0,20	1,44
	подземные	10	5,58	0,37	11,81	2,40	8,09
$^{239+240}\text{Pu}$, Бк×кг ⁻¹	надземные	16	0,33	0,00	11,85	0,15	0,80
	подземные	10	12,81	1,21	24,77	6,09	14,75
^{241}Am , Бк×кг ⁻¹	надземные	16	1,44	0,00	58,36	0,90	3,53
	подземные	10	31,23	4,52	3,08×10 ²	21,92	63,96

Примечание: N – количество значений в выборке; Me – медиана; Мин – минимальное значение; Макс – максимальное значение; Q₁ – нижний квартиль; Q₃ – верхний квартиль; * – значение меньше минимальной детектируемой активности принималось равным 0,00.

Удельная активность ^{238}Pu в надземных органах сосудистых растений на территории ПГРЭЗ достигает 8,37 Бк×кг⁻¹ (кора *P. sylvestris*), $^{239+240}\text{Pu}$ – 11,85 Бк×кг⁻¹ (листья *C. avellana*), ^{241}Am – 1,65×10² Бк×кг⁻¹ (*F. ovina*). Подземные органы сосудистых растений на территории ПГРЭЗ накапливают до 3,68×10² Бк×кг⁻¹ ^{238}Pu (*V. cracca*), до 3,07×10² Бк×кг⁻¹ $^{239+240}\text{Pu}$ (*F. ovina*), до 2,17×10³ Бк×кг⁻¹ ^{241}Am (обрастающие корни *B. pendula*). Высокие значения

удельной активности ТУЭ для подземных органов растений можно объяснить наличием топливных частиц в корнеобитаемом слое (В. Н. Забродский [и др.], 2018) и невозможностью хорошо очистить корни от почвы. Тем не менее, топливные частицы могут вносить существенный вклад в дозу облучения корней, поэтому высокие значения удельной активности не воспринимались как выбросы.

Установлено, что среди ТУЭ наибольший вклад в удельную активность α -излучающих радионуклидов как для надземных, так и для подземных органов растений четырех пробных площадок вносит ^{241}Am : от 19,9 % до 98,8 % (надземные органы) и от 51,7 % до 91,0 % (подземные органы). В литературных источниках (В. И. Парфенов [и др.], 1995) отмечается, что для древесных растений значительная часть ^{137}Cs концентрируется в физиологически активных органах – тонких сосущих корнях и ассимиляционном аппарате. Согласно полученным данным, удельная активность ТУЭ в обрастающих корнях преобладает над удельной активностью в скелетных корнях.

В сосняке мшистом и черноольшанике крапивном наименьшая удельная активность ^{137}Cs и ТУЭ в надземных органах растений характерна для древесного – верхнего – яруса, наибольшая – для нижнего. Нарушение этого распределения наблюдается для изотопов плутония в растениях березняка травяного (травянистые растения и кустарники < деревья), что может быть связано с видовыми особенностями накопления этого элемента и факторами окружающей среды.

Коэффициенты накопления трансурановых элементов надземными и подземными органами растений ПГРЭЗ. Сводные данные по коэффициентам накопления цезия и ТУЭ надземными и подземными органами травянистых, кустарничковых растений, кустарников и деревьев ПГРЭЗ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты накопления ТУЭ и ^{137}Cs надземными и подземными органами растений ПГРЭЗ

Группа	Элемент	Надземные органы			Подземные органы		
		Me	Q ₁	Q ₃	Me	Q ₁	Q ₃
Травянистые растения	Cs	2,16	$6,83 \times 10^{-2}$	6,53	3,40	1,11	5,60
	Pu	$3,34 \times 10^{-2}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$7,76 \times 10^{-2}$	0,83	0,39	1,05
	Am	$2,75 \times 10^{-2}$	$1,17 \times 10^{-2}$	$6,28 \times 10^{-2}$	0,56	0,42	1,14
Кустарнички и кустарники	Cs	2,06	1,33	4,65	3,69	2,36	5,50
	Pu	$1,32 \times 10^{-2}$	$6,00 \times 10^{-3}$	$4,24 \times 10^{-2}$	0,34	0,11	0,63
	Am	$2,54 \times 10^{-2}$	$1,27 \times 10^{-2}$	$4,38 \times 10^{-2}$	0,51	0,12	0,86
Деревья	Cs	1,84	1,00	3,30	2,47	1,42	3,67
	Pu	$2,24 \times 10^{-2}$	$1,11 \times 10^{-2}$	$3,19 \times 10^{-2}$	0,73	0,26	1,42
	Am	$1,17 \times 10^{-2}$	$5,54 \times 10^{-3}$	$1,72 \times 10^{-2}$	1,31	0,44	2,29

Примечание: Me – медиана; Q₁ – нижний квартиль; Q₃ – верхний квартиль.

По данным Публикации 114 МКРЗ (С. Н. Clement [et al.], 2009) и TRS-472 МАГАТЭ (Handbook of parameter values..., 2010), коэффициенты накопления америция находятся в диапазоне порядков величины $n \times 10^{-7} - n \times 10^{-1}$, плутония – $n \times 10^{-7} - n \times 10^{-2}$, цезия $n \times 10^{-3} - n \times 10^0$, без разделения для подземных и надземных органов. Полученные коэффициенты накопления ТУЭ для растений ПГРЭЗ на один-два порядка величины меньше коэффициентов накопления ^{137}Cs , что согласуется с приведенными литературными данными. Также установлено, что коэффициенты накопления ТУЭ надземными органами растений ПГРЭЗ и подземными значимо различаются (при $p < 0,05$), при этом, различий в накоплении цезия не выявлено. Среднее значение коэффициентов накопления плутония и америция листьями и хвоей деревьев составило $2,48 \times 10^{-2}$ и $1,69 \times 10^{-2}$, побегами – $2,01 \times 10^{-2}$ и $1,74 \times 10^{-2}$, корой – $4,48 \times 10^{-2}$ и $2,76 \times 10^{-2}$, камбием ствола – $1,81 \times 10^{-2}$ и $7,34 \times 10^{-3}$ соответственно. Для скелетных корней деревьев среднее значение коэффициентов накопления плутония и америция составило 0,31 и 0,72, для обрастающих корней – 1,47 и 3,25 соответственно. Таким образом, органы и ткани деревьев по уровню накопления ТУЭ можно выстроить в следующий убывающий ряд: обрастающие корни > скелетные корни > покровные ткани ствола и фотосинтезирующие органы > камбий ствола.

Дозы облучения растений трансурановыми элементами на территории ПГРЭЗ. В главе 4 представлены значения мощности поглощенной дозы и ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ТУЭ и ^{137}Cs растений заповедника, вклады отдельных изотопов в дозу облучения ТУЭ и ^{137}Cs , конверсионные дозовые коэффициенты и прогнозные значения доз облучения растений ПГРЭЗ.

Оценка доз облучения растений трансурановыми элементами и ^{137}Cs . В результате выполненной работы установлено, что мощность поглощенной дозы ТУЭ и ^{137}Cs надземных органов растений ПГРЭЗ составляет ($Q_{1,\min} - Q_{3,\max}$): ^{238}Pu – 0,4–5,2, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,2–3,1, ^{241}Am – 0,9–10,5 нГр $\times$ ч $^{-1}$, ^{137}Cs – 1,6–10,4 мкГр $\times$ ч $^{-1}$, подземных: ^{238}Pu – 3,8–250,0, $^{239+240}\text{Pu}$ – 6,3–460,0, ^{241}Am – 21,5–1460,0 нГр $\times$ ч $^{-1}$, ^{137}Cs – 2,4–10,5 мкГр $\times$ ч $^{-1}$. В таблице 4 представлены виды сосудистых растений, на которые приходится наибольшее значение мощности поглощенной дозы среди растений соответствующих пробных площадок.

Таблица 4 – Виды растений ПГРЭЗ с наибольшим значением мощности поглощенной дозы ^{137}Cs и ТУЭ надземных и подземных органов (Р, мкГр $\times$ ч $^{-1}$)

Органы	Вид, Р(^{137}Cs)	Вид, Р(^{238}Pu)	Вид, Р($^{239+240}\text{Pu}$)	Вид, Р(^{241}Am)
1	2	3	4	5
Пробная площадка I (суходольный луг)				
Надземные	<i>V. cracca</i> , 3,04	<i>C. canescens</i> , $9,14 \times 10^{-3}$	<i>V. cracca</i> , $7,47 \times 10^{-3}$	<i>V. cracca</i> , $2,34 \times 10^{-2}$
Подземные	<i>P. angustifolia</i> , 10,91	<i>V. cracca</i> , 0,59	<i>P. angustifolia</i> , 0,46	<i>P. angustifolia</i> , 1,52

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
Пробная площадка II (березняк травяной)				
Надземные	<i>V. myrtillus</i> , 9,28	<i>B. pendula</i> , $3,66 \times 10^{-3}$	<i>B. pendula</i> , $6,15 \times 10^{-3}$	<i>F. ovina</i> , 0,18
Подземные	<i>V. myrtillus</i> , 10,96	<i>F. ovina</i> , 0,14	<i>F. ovina</i> , 0,29	<i>F. ovina</i> , 1,03
Пробная площадка III (сосняк мшистый)				
Надземные	<i>P. sylvestris</i> , 16,92	<i>P. sylvestris</i> , $1,34 \times 10^{-2}$	<i>Q. robur</i> , $1,38 \times 10^{-2}$	<i>V. vitis-idaea</i> , $2,48 \times 10^{-2}$
Подземные	<i>V. vitis-idaea</i> , 10,78	<i>B. pendula</i> , 0,11	<i>B. pendula</i> , 0,22	<i>B. pendula</i> , 2,55
Пробная площадка IV (черноольшаник крапивный)				
Надземные	<i>A. glutinosa</i> 4,61	<i>C. avellana</i> $8,41 \times 10^{-3}$	<i>C. avellana</i> $1,52 \times 10^{-2}$	<i>C. avellana</i> $8,00 \times 10^{-2}$
Подземные	<i>A. glutinosa</i> 3,56	<i>A. glutinosa</i> $1,54 \times 10^{-2}$	<i>A. glutinosa</i> $3,03 \times 10^{-2}$	<i>C. avellana</i> 0,27

В системе радиационной защиты МКРЗ одним из эталонных объектов определен объект «травянистое растение». Широкая распространенность *P. angustifolia* и *V. cracca* на территории ПГРЭЗ позволяет использовать их в качестве репрезентативных видов, которые могут служить объектами долговременного наблюдения с целью изучения динамики доз облучения, а также изменения луговых фитоценозов под влиянием хронического облучения.

Вклад трансурановых элементов и ^{137}Cs в дозу облучения растений. Наибольшее значение мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ среди растений суходольного луга приходится на *V. cracca* (надземные органы) – $3,4 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, *P. angustifolia* (подземные органы) – $33,1 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, березняка травяного – *V. myrtillus* (надземные органы) – $9,5 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, *F. ovina* (подземные органы) – $25,2 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, сосняка мшистого – *P. sylvestris* (кора) – $17,2 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, *B. pendula* (обрастающие корни) – $36,8 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, черноольшаника крапивного – *A. glutinosa* (лист) – $4,6 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, *C. avellana* (обрастающие корни) – $5,4 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$. Предложенные МКРЗ справочные производные контрольные уровни доз облучения, при превышении которых настоятельно рекомендуется применение защитных мер, для деревьев составляет $41,7 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, для травянистых растений – $416,7 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (С. Н. Clement [et al.], 2017). Несмотря на относительно высокие полученные значения доз облучения, превышения справочных производных контрольных уровней на территории ПГРЭЗ не установлено.

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы позволяет оценить вклад отдельного изотопа в дозу облучения ТУЭ и ^{137}Cs с учетом качества излучения. Установлено, что для надземных органов растений ПГРЭЗ основной вклад в мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы вносит ^{137}Cs – от 64,0 % до 99,9 % (21,0–98,5 % для подземных органов). Среди ТУЭ, основная доля в структуре дозы

облучения ТУЭ подземных органов приходится на ^{241}Am – от 52,0 % до 91,3 % (20,4–98,8 % для надземных органов).

Конверсионные дозовые коэффициенты (КДК). На основе данных о мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы рассчитаны конверсионные дозовые коэффициенты. Для ТУЭ характерно преобладание значения КДК для подземных органов сосудистых растений над значением КДК для надземных на один–два порядка величины. КДК ^{238}Pu для надземных органов находятся в основном ($Q_{1,\min}$ – $Q_{3,\max}$) в диапазоне 1,0–9,9, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,4–3,1, ^{241}Am – 0,7–5,2, ^{137}Cs – 0,6–4,2 ($\text{нГр}\times\text{ч}^{-1}$) $\times$ ($\text{кБк}\times\text{м}^{-2}$) $^{-1}$. Для подземных органов КДК для ^{238}Pu составляют диапазон значений 14,7–130,0, $^{239+240}\text{Pu}$ – 12,7–110,0, ^{241}Am – 15,2–210,0, ^{137}Cs – 2,2–4,3 ($\text{нГр}\times\text{ч}^{-1}$) $\times$ ($\text{кБк}\times\text{м}^{-2}$) $^{-1}$. Предложенные КДК позволяют по значению плотности загрязнения территории определить приходящуюся на растение мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы.

Прогноз доз облучения растений ТУЭ и ^{137}Cs растений ПГРЭЗ. Прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ растений ПГРЭЗ с наибольшими текущими значениями на 2015, 2025, 2065 гг. представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ (ΣH) некоторых растений ПГРЭЗ

Органы	Год		
	2015	2025	2065
	$\Sigma\text{H}(^{137}\text{Cs}, \text{ТУЭ}), \text{мкГр}\times\text{ч}^{-1}$, (процент от справочного производного контрольного уровня)		
1	2	3	4
<i>Vicia cracca</i> L. (площадка I)			
Надземные	3,40 (0,8 %)	2,80 (0,7 %)	1,35 (0,3 %)
Подземные	26,39 (6,3 %)	25,11 (6,0 %)	20,25 (4,9 %)
<i>Poa angustifolia</i> L. (площадка I)			
Надземные	2,87 (0,7 %)	2,30 (0,6 %)	0,97 (0,2 %)
Подземные	33,11 (7,9 %)	32,36 (7,8 %)	28,06 (6,7 %)
<i>Vaccinium myrtillus</i> L. (площадка II)			
Надземные	9,45 (2,3 %)	7,54 (1,8 %)	3,10 (0,7 %)
Подземные	12,65 (3,0 %)	10,51 (2,5 %)	5,33 (1,3 %)
<i>Festuca ovina</i> L. (площадка II)			
Надземные	5,96 (1,4 %)	5,30 (1,3 %)	3,48 (0,8 %)
Подземные	25,19 (6,0 %)	24,04 (5,8 %)	19,67 (4,7 %)

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4
<i>Pinus sylvestris</i> L. (площадка III)			
Кора	17,17 (41,2 %)	13,68 (32,8 %)	5,55 (13,3 %)
Скелетные корни	19,20 (46,1 %)	18,06 (43,3 %)	14,09 (33,8 %)
<i>Betula pendula</i> Roth (площадка III)			
Листья	4,22 (10,1 %)	3,42 (8,2 %)	1,54 (3,7 %)
Обрастающие корни	36,78 (88,3 %)	37,89 (90,9 %)	36,40 (87,4 %)
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn. (площадка IV)			
Листья	4,64 (11,1 %)	3,69 (8,9 %)	1,47 (3,5 %)
Обрастающие корни	4,63 (11,1 %)	4,16 (10,0 %)	2,87 (6,9 %)
<i>Corylus avellana</i> (L.) H.Karst. (площадка IV)			
Листья	2,91 (7,0 %)	2,61 (6,3 %)	1,77 (4,2 %)
Обрастающие корни	5,39 (12,9 %)	5,18 (12,4 %)	4,27 (10,2 %)

Согласно таблице 5, увеличение дозовой нагрузки ^{241}Am , в связи с β -распадом ^{241}Pu , не приведет к увеличению значения мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ и превышению справочных производных контрольных уровней МКРЗ. В целом, мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения растений ^{137}Cs и ТУЭ к 2065 г. будет уменьшаться.

Программный комплекс для расчета мощности дозы облучения объектов биоты. В пятой главе приведена общая концепция программного комплекса для расчета мощности дозы облучения объектов биоты, описаны его компоненты.

Разработанный программный комплекс включает в себя: 1) мобильное приложение «EcoJournal» для описания пробных площадок и отбираемых проб, 2) приложение «RadioChem» для ведения базы данных образцов на радиохимическом анализе и измерении удельной активности радионуклидов, 3) веб-приложение «BiotaDB.by» для расчета доз облучения и первичной статистической обработки данных. Показана возможность применения ИНС для оценки качества проведенного радиохимического анализа при определении содержания изотопов плутония и америция. Производительность разработанной ИНС, включенной в состав приложения «RadioChem», составила: для обучающей подвыборки спектров 98,40 %, для тестовой и контрольной 98,21 %.

Полученные в результате работы значения удельной активности ТУЭ, коэффициенты накопления, дозы облучения надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ включены в базу данных веб-приложения «BiotaDB.by».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В ареале с наиболее высокими уровнями загрязнения экосистем техногенными радионуклидами на территории Республики Беларусь (ПГРЭЗ) удельная активность ^{238}Pu в надземных органах сосудистых растений достигает $8,37 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ – $11,85 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am – $1,65 \times 10^2 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$. В подземных органах сосудистых растений удельная активность ^{238}Pu здесь может достигать $3,68 \times 10^2 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$, $^{239+240}\text{Pu}$ – $3,07 \times 10^2 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$, ^{241}Am – $2,17 \times 10^3 \text{ Бк} \times \text{кг}^{-1}$. Среди ТУЭ наибольший вклад в суммарную удельную активность как для надземных, так и для подземных органов растений суходольного луга, березняка травяного, сосняка мшистого и черноольшаника крапивного вносит ^{241}Am : от 19,9 % до 98,8 % (надземные органы) и от 51,7 % до 91,0 % (подземные органы). Коэффициенты накопления ТУЭ значимо различаются для надземных и подземных органов сосудистых растений. Как правило, коэффициенты накопления плутония надземными органами находятся в пределах от $6,00 \times 10^{-3}$ до $7,76 \times 10^{-2}$, а подземными – от 0,11 до 1,42; для америция коэффициент накопления надземными органами в большинстве случаев составляет от $5,54 \times 10^{-3}$ до $6,28 \times 10^{-2}$, а подземными – от 0,12 до 2,29. Основными органами накопления ТУЭ являются наиболее физиологически активные части растений: обрастающие корни и листья (хвоя) [2-А, 7-А, 14-А, 17-А, 19-А].

2. Мощность поглощенной дозы облучения ТУЭ надземных органов растений ПГРЭЗ значимо отличается от мощности дозы облучения ТУЭ подземных органов. В большинстве случаев, мощность поглощенной дозы облучения ТУЭ и ^{137}Cs надземных органов растений ПГРЭЗ составляет: ^{238}Pu – 0,4–5,2, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,2–3,1, ^{241}Am – 0,9–10,5 $\text{нГр} \times \text{ч}^{-1}$, ^{137}Cs – 1,6–10,4 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, подземных: ^{238}Pu – 3,8–250,0, $^{239+240}\text{Pu}$ – 6,3–460,0, ^{241}Am – 21,5–1460,0 $\text{нГр} \times \text{ч}^{-1}$, ^{137}Cs – 2,4–10,5 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ [6-А, 9-А, 10-А, 11-А, 13-А].

3. Для растений суходольного луга мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы имеет значения в диапазоне 2,8–3,4 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (надземные органы) и 12,1–33,1 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (подземные органы), для растений березняка травяного – 3,0–9,5 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (надземные органы) и 8,6–25,2 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (подземные органы), для растений сосняка мшистого – 2,0–17,2 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (надземные органы) и 8,2–36,8 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (подземные органы), для растений черноольшаника крапивного – 1,2–4,6 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (надземные органы) и 2,2–5,4 $\text{мкГр} \times \text{ч}^{-1}$ (подземным органы). Превышения справочных производных контрольных уровней доз облучения для объектов биоты, предложенных МКРЗ (травянистые растения – $416,7 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$, деревья – $41,7 \text{ мкГр} \times \text{ч}^{-1}$), не выявлено. Основной вклад в формирование дозы облучения включенными в анализ техногенными радионуклидами надземных

органов растений вносит ^{137}Cs – от 64,0 % до 99,9 % (21,0–98,5 % для подземных органов). Среди изотопов плутония и америция, основная доля в структуре ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ТУЭ подземных органов приходится на ^{241}Am – от 52,0 % до 91,3 % (20,4–98,8 % для надземных органов). Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{241}Am растений ПГРЭЗ достигнет максимальных значений к 2065 г. В отдельных случаях, для надземных органов растений ПГРЭЗ, вклад ^{241}Am превысит вклад ^{137}Cs к 2165 г., а для подземных органов он уже преобладает в структуре дозы облучения ^{137}Cs и ТУЭ [3-А, 5-А, 16-А, 20-А].

4. Конверсионные дозовые коэффициенты ^{238}Pu для надземных органов растений находятся, в основном, в диапазоне 1,0–9,9, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,4–3,1, ^{241}Am – 0,7–5,2, ^{137}Cs – 0,6–4,2 $(\text{нГр} \times \text{ч}^{-1}) \times (\text{кБк} \times \text{м}^{-2})^{-1}$. Для подземных органов растений конверсионные дозовые коэффициенты для ^{238}Pu находятся в диапазоне значений 14,7–130,0, $^{239+240}\text{Pu}$ – 12,7–110,0, ^{241}Am – 15,2–210,0, ^{137}Cs – 2,2–4,3 $(\text{нГр} \times \text{ч}^{-1}) \times (\text{кБк} \times \text{м}^{-2})^{-1}$ [4-А, 21-А].

5. Разработан программный комплекс, включающий в себя мобильное приложение для описания пробных площадок и отбираемых проб, приложение для настольных систем для ведения базы данных образцов на радиохимическом анализе и измерении удельной активности радионуклидов, веб-приложение для расчета доз облучения и первичной статистической обработки данных. Показана возможность применения искусственных нейронных сетей для оценки качества проведенного радиохимического анализа определения содержания изотопов плутония и америция [1-А, 8-А, 12-А, 15-А, 18-А, 22-А, 23-А, 24-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученный массив экспериментальных данных об удельной активности трансурановых элементов, коэффициентов их накопления и перехода, дозах облучения растений ПГРЭЗ зарегистрирован в Государственном регистре информационных ресурсов (Свидетельство о регистрации № 5342336483, дата регистрации 15.11.2023 г.).

Представленные в диссертации результаты исследований внедрены в учебный процесс на кафедре биологии биологического факультета Учреждении образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины» и используются при выполнении лабораторных занятий по дисциплинам «Радиоэкология человека и животных», «Экология и рациональное природопользование», а также при выполнении курсовых, дипломных и магистерских работ в области радиобиологии и радиоэкологии (Акт о внедрении результатов НИР в учебный процесс от 27.02.2024 г.).

Разработанное мобильное приложение «EcoJournal» для ведения базы данных реперных площадок и отобранных образцов зарегистрировано в Государственном регистре информационных ресурсов (Свидетельство о регистрации № 5342336785, дата регистрации 11.12.2023 г.).

Приложение «RadioChem» для ведения базы данных образцов, находящихся в процессе определения удельной активности цезия-137, плутония-238,239,240, америция-241, с модулем анализа спектров α -излучения изотопов плутония и америция искусственной нейронной сетью зарегистрировано в Государственном регистре информационных ресурсов (Свидетельство о регистрации № 5342337137, дата регистрации 29.12.2023 г.), а также внедрено в рабочий процесс лаборатории массовых анализов Республиканского научно-исследовательского унитарного предприятия «Институт радиологии» (Акт о практическом использовании результатов исследования от 21.12.2017 г.), внедрено в рабочий процесс в научно-исследовательской лаборатории радиохимии химического факультета Белорусского государственного университета для обработки результатов радиохимического анализа образцов на содержание α -излучающих радионуклидов (Акт о практическом использовании результатов исследования от 23.01.2018 г.).

Разработанное веб-приложение «BiotaDB.by» зарегистрировано и внесено в Реестр компьютерных программ Национального центра интеллектуальной собственности (Свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1714-КП от 10.04.2024 г.) и внедрено в рабочий процесс в лаборатории спектрометрии и радиохимии Государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» для расчета коэффициентов накопления и коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения, расчета доз облучения объектов биоты (Акт о практическом использовании результатов исследования от 19.02.2024 г.).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. **Спиров, Р. К.** Нейронные сети в спектрометрии радиоактивных излучений: состояние проблемы / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Экологический вестник. Научно-практический журнал, 2016. – № 1(35). – С. 124–128.

2-А. **Спиров, Р. К.** Аккумуляция трансурановых элементов надземными и подземными органами сосудистых растений / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, И. А. Чешик, Р. А. Король // Доклады НАН Беларуси. – 2017. – Т. 61, №2. – С. 51–57.

3-А. **Спиров, Р. К.** Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на отдельные виды биоты Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Проблемы здоровья и экологии. – 2017. – № 4(54). – С. 52–57.

4-А. **Спиров, Р. К.** Конверсионные дозовые коэффициенты трансурановых элементов для растений зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2018. – № 2(20). – С. 52–57.

5-А. **Спиров, Р. К.** Структура дозы облучения ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, Н. И. Тимохина, И. А. Чешик, А. Н. Никитин // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2023. – № 4. – С. 29–40.

6-А. **Спиров, Р. К.** Оценка доз облучения трансурановыми радионуклидами растений фитоценозов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров // Весці Нацыянальнай акадэміі навук. Серыя біялагічных навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 161–168.

7-А. **Спиров, Р. К.** Накопление ^{137}Cs и трансурановых элементов надземными и подземными органами растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, Н. И. Тимохина, Р. А. Король // Вестник БарГУ. Серия: Биологические науки (общая биология). Сельскохозяйственные науки (агрономия). – 2024. – № 1(15). – С. 81–90.

Материалы конференций

8-А. **Спиров, Р. К.** Обзор современных методов определения активности трансурановых элементов чернобыльского происхождения / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Чернобыль: 30 лет спустя : материалы междунар. науч. конф., Гомель, 21–22 апр. 2016 г. / Ин-т радиологии ; редкол.: И. А. Чешик [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 187–189.

9-А. **Спиров, Р. К.** Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на травянистые растения, произрастающие в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, Р. А. Король, С. О. Гапоненко // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : сб. докл. междунар. науч. конф., Минск, 14–17 сент. 2016 г. : в 2 т. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 319–322.

10-А. **Спиров, Р. К.** Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на лишайник *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., произрастающий в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, Р. А. Король // Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах : материалы II междунар. научн. конф., Минск – Каменюки, 20–23 сентября 2016 г. / Национальная академия наук Беларуси, ГНУ «Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси», ГПУ «Национальный парк «Беловежская пуща» ; редкол.: А. В. Пугачевский [и др.]. – Минск, 2016. – С. 223–226.

11-А. **Спиров, Р. К.** Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на крушину ломкую (*Frangula alnus* Mill.), произрастающую на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, Р. А. Король // Радиобиология: минимизация радиационных рисков : материалы междунар. науч. конф., Гомель, 29–30 сентября 2016 г. / Институт радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – С. 197–200.

12-А. **Спиров, Р. К.** Мобильное приложение EcoJournal для радиоэкологов / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Ядерные технологии на страже здоровья : материалы междунар. научн.-практ. форума, Москва, 1–3 ноября 2016 г. / ФМБА ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – ФМБЦ им. А.И. Бурназяна». – Москва, 2016. – С. 104–105.

13-А. **Спиров, Р. К.** Оценка дозовой нагрузки трансурановых элементов на *Corynephorus canescens* (L.) P.beauv., *Frangula alnus* Mill., *Vaccinium myrtillus* L. и *Carex vesicaria* L., произрастающих в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, И. А. Чешик, Р. А. Король // Молодежь в науке – 2016 : сборник материалов Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 22–25 ноября 2016 г. / Национальная академия наук Беларуси. – Минск, 2017. – С. 61–68.

14-А. **Спиров, Р. К.** Накопление трансурановых элементов сосудистыми растениями / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, Е. А. Танкевич // Экологическая культура и охрана окружающей среды: II Дорофеевские чтения : материалы международной научно-практической конференции, Витебск, 29–30 ноября 2016 г.

/ Витеб. Гос.ун-т ; редкол.: И. М. Прищепа (отв. ред.) [и др.]. – Витебск, 2016. – С. 66–68.

15-А. **Спиров, Р. К.** Приложение «RadioChem» для специалистов в области радиохимии трансурановых элементов / Р.К. Спиров // сб. трудов школы-конф. молодых ученых с междунар. участием «Ильинские чтения», Москва, 22 марта 2018 г. / ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России. – Москва, 2018. – 150–152 с.

16-А. **Спиров, Р. К.** Радиационная защита растительных сообществ в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Проблемы экологии и экологической безопасности : сб. материалов междунар. заочн. научн.-практ. конф., Минск, 5 июня 2018 г. / ГУО «Ун-т гр. защиты МЧС РБ» ; редкол.: И. И. Полевода [и др.]. – Минск, 2018. – С. 45–46.

17-А. **Спиров, Р. К.** Накопление трансурановых элементов травянистыми растениями, кустарничками и кустарниками Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Проблемы и перспективы развития территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, на современном этапе : материалы междунар. научн.-практ. конф., Хойники, 26–27 июля 2018 г. / ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» ; под ред. М. В. Кудина. – Минск, 2018. – С. 137–141.

18-А. **Спиров, Р. К.** Приложения «EcoJournal» и «RadioChem» для радиоэкологов / Р. К. Спиров // Радиобиология: актуальные проблемы : материалы междунар. науч. конф., Гомель, 27–28 сентября 2018 г. / Ин-т радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2018. – С. 162–164.

19-А. **Спиров, Р. К.** Накопление трансурановых элементов некоторыми древесными растениями Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Биологическое разнообразие лесных экосистем: состояние, сохранение и использование : материалы междунар. научн.-практ. конф., Гомель, 13–15 ноября 2018 г. / Ин-т леса НАН Беларуси ; редкол.: А. И. Ковалевич (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2018. – С. 244–247.

20-А. **Спиров, Р. К.** Прогноз мощности ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения ^{137}Cs и трансурановыми элементами надземных и подземных органов растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин, Н. И. Тимохина // Сахаровские чтения 2024 года: экологические проблемы XXI века : материалы 24-й междунар. научн. конф., Минск, 23–24 мая 2024 г. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.]. – Минск, 2024. – Ч. 1. – С. 102–105.

21-А. **Спиров, Р. К.** Конверсионные дозовые коэффициенты трансурановых элементов для надземных и подземных органов травянистых и древесных растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Р. К. Спиров, А. Н. Никитин // Радиобиология и экологическая безопасность – 2024: материалы междунар. науч. конф., Гомель, 30–31 мая 2024 г. / Ин-т радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2024. – С. 234–237.

22-А. **Спиров, Р. К.** Веб-приложение «BiotaDB.by» для расчета доз облучения объектов биоты / Р. К. Спиров, Н. И. Тимохина // Радиобиология и экологическая безопасность – 2024: материалы междунар. науч. конф., Гомель, 30–31 мая 2024 г. / Ин-т радиобиологии НАН Беларуси ; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2024. – С. 237–239.

Тезисы докладов

23-А. **Spirau, R. K.** Artificial neural networks in spectroscopy of ionizing radiations: current state / R. K. Spirau, A. N. Nikitin // Ninth international conference on nuclear and radiochemistry, Helsinki, Finland, August 29 – September 2, 2016 : abstracts / University of Helsinki. – Helsinki, 2016. – P. 431–432.

24-А. **Спиров, Р. К.** Применение искусственных нейронных сетей для идентификации спектров альфа-излучения плутония и америция / Р.К. Спиров, А.Н. Никитин // XXIV Ежегодная научная конференция Института ядерных исследований НАН Украины, Киев, 10–13 апреля 2017 г. : тез. докл. / Ин-т ядерных исследований НАН Украины ; сост.: Ф. О. Иванюк. – Киев, 2017. – С. 247–248.

РЭЗІЮМЭ

Спіраў Руслан Каўсаравіч

Ацэнка доз апраменьвання трансуранавымі элементамі раслін Палескага дзяржаўнага радыяцыйна-экалагічнага запаведніка

Ключавыя словы: трансуранавыя элементы, плутоній-238, плутоній-239+240, амерыцый-241, каэфіцыенты назапашвання, доза апраменьвання, біёта, радыяцыйная абарона біёты

Мэта даследавання: выявіць заканамернасці фарміравання доз апраменьвання доўгажывучымі ізатопамі трансуранавых элементаў раслінных органаў у ўмовах Палескага дзяржаўнага радыяцыйна-экалагічнага запаведніка.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: радыёхімічныя, спектраметрычныя, метады статыстычнай апрацоўкі дадзеных, α -спектраметрычная сістэма Alpha Analyst (CANBERRA), γ -спектрометр CANBERRA Packard.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Вызначаны заканамернасці назапашвання трансуранавых элементаў надземнымі і падземнымі органамі травяністых, хмызняковых раслін, хмызнякоў, дрэў на этапе аддаленых радыёэкалагічных наступстваў аварыі на Чарнобыльскай АЭС. Разлічаны каэфіцыенты назапашвання ізатопаў плутонію і амерыцыя як надземнымі, так і падземнымі органамі раслін Палескага дзяржаўнага радыяцыйна-экалагічнага запаведніка, паказана статыстычна значнае адрозненне ў назапашванні трансуранавых элементаў надземнымі і падземнымі органамі раслін. Разлічаны паглынутыя дозы і АБЭ-ўзважаныя паглынутыя дозы апраменьвання ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am надземных і падземных органаў раслін ПГРЭЗ. Прапанаваны канверсійныя дозавыя каэфіцыенты для ацэнкі доз апраменьвання раслін у арэале ўздзеяння радыяцыйнай аварыі. Пабудаваны прагнозы змены доз апраменьвання надземных і падземных органаў раслін у доўгатэрміновай перспектыве.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны ў навучальным працэсе і пры выкананні навукова-даследчых работ у галіне радыяцыйнай абароны біёты.

Галіна ужывання: радыёэкалогія.

РЕЗЮМЕ

Спиров Руслан Ковсарович

Оценка доз облучения трансурановыми элементами растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Ключевые слова: трансурановые элементы, плутоний-238, плутоний-239+240, америций-241, коэффициенты накопления, доза облучения, биота, радиационная защита биоты

Цель работы: выявить закономерности формирования доз облучения долгоживущими изотопами трансурановых элементов растительных организмов в условиях Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

Методы исследования и использованная аппаратура: радиохимические, спектрометрические, методы статистической обработки данных, α -спектрометрическая система Alpha Analyst (CANBERRA), γ -спектрометр CANBERRA Packard.

Полученные результаты и их новизна. Определены закономерности накопления трансурановых элементов надземными и подземными органами травянистых, кустарничковых растений, кустарников, деревьев на этапе отдаленных радиоэкологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Рассчитаны коэффициенты накопления изотопов плутония и америция как надземными, так и подземными органами растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, показано статистически значимое различие в накоплении трансурановых элементов надземными и подземными органами растений. Рассчитаны поглощенные дозы и ОБЭ-взвешенные поглощенные дозы облучения ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am надземных и подземных органов растений ПГРЭЗ. Предложены конверсионные дозовые коэффициенты для оценки доз облучения растений в ареале воздействия радиационной аварии. Построены прогнозы изменения доз облучения надземных и подземных органов растений в долгосрочной перспективе.

Рекомендации по использованию: результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе и при выполнении научно-исследовательских работ в области радиационной защиты биоты.

Область применения: радиоэкология.

SUMMARY

Spirau Ruslan Kausaravich

Assessment of doses of irradiation from transuranic elements of plants of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve

Keywords: transuranic elements, plutonium-238, plutonium-239+240, americium-241, accumulation coefficients, radiation dose, non-human biota, radiation protection of non-human biota

The aim of the work is: to identify the patterns of formation of radiation doses by long-lived isotopes of transuranic elements of plants in the conditions of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve.

Methods of research and equipment used: radiochemical, spectroscopy, statistical data processing methods, Alpha Analyst (CANBERRA) α -spectroscopy system, CANBERRA Packard γ -spectroscopy system.

Obtained results and their novelty. The patterns of accumulation of transuranic elements by aboveground and underground organs of herbaceous, shrubby plants, shrubs, and trees at the stage of remote radioecological consequences of the Chernobyl accident have been determined. The accumulation coefficients of plutonium and americium isotopes by both aboveground and underground plant organs of the Polesye State Radiation-Ecological Reserve are calculated, and a statistically significant difference in the accumulation of transuranic elements by aboveground and underground plant organs is shown. The absorbed doses and RBE-weighted absorbed radiation doses of ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am of aboveground and underground organs of plants of the PSRER were calculated. Conversion dose coefficients are proposed to estimate the doses of irradiation of plants in the area of exposure to a radiation accident. Forecasts of changes in the radiation doses of aboveground and underground plant organs in the long term have been made.

Recommendations for use: the results of the study can be used in the educational process and in carrying out research in the field of radiation protection of non-human biota.

Application field: radioecology.



Научное издание

СПИРОВ Руслан Ковсарович

**ОЦЕНКА ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ТРАНСУРАНОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
РАСТЕНИЙ ПОЛЕССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РАДИАЦИОННО-
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЗАПОВЕДНИКА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

по специальности
03.01.01 – радиобиология

Подписано в печать 28.02.2025 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 1,63. Тираж 60 экз. Зак. 451.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель