

На правах рукописи



Кундузбаева Асия Еркебековна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ
РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

1.5.1. «радиобиология»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Курчатов – 2023

Диссертация выполнена в Филиале «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского Государственного предприятия «Национальный ядерный центр» Республики Казахстан (Филиал ИРБЭ НЯЦ РК).

Научный руководитель:

Паницкий Андрей Васильевич, кандидат биологических наук, доцент, начальник отдела комплексных исследований экосистем Филиала ИРБЭ НЯЦ РК.

Официальные оппоненты:

Позолотина Вера Николаевна, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией популяционной радиобиологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт экологии растений и животных» Уральского отделения Российской академии наук.

Коробова Елена Михайловна, доктор геолого-минералогических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии окружающей среды, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского» Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», факультет почвоведения, г. Москва.

Защита диссертации состоится 14 июня 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.013.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ) по адресу: 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, к. 1.

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

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



канд. биол. наук Бондаренко Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Семипалатинский испытательный полигон (СИП), действовавший в период с 1949 по 1989 гг., являлся одним из самых крупных ядерных полигонов мира. На его территории был произведен широкий спектр ядерных (30 наземных, 86 воздушных, 340 подземных) и неядерных (гидроядерные и гидродинамические опыты с делящимися материалами, испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ)) испытаний. Испытания на СИП обусловили радиоактивное загрязнение не только территории СИП и близлежащих территорий, но и глобальное загрязнение земной поверхности.

Специфика испытаний, характерные природно-климатические условия региона, а также временной фактор (период взаимодействия радионуклидов с почвой – 60 лет) в совокупности обусловили формирование на территории СИП объектов с уникальными радиоэкологическими характеристиками. Объекты СИП (основные испытательные площадки и условно фоновые территории СИП) различаются уровнем и качественным составом загрязнения. Различные типы испытаний могли привести к неоднородному характеру радиоактивного загрязнения почвенного покрова, а следовательно, и к различной подвижности и миграционной способности искусственных радионуклидов (ИРН) в почвах СИП. В настоящее время данный вопрос требует тщательного изучения.

Почва, как важнейший компонент биогеоценозов, является главным аккумулятором и исходным звеном в биогеохимической цепи миграции радионуклидов. Однако, информация о валовом содержании радионуклидов в почвах и сравнение его с нормируемыми показателями не дает реальной оценки опасности радионуклидов в почвах. Одним из параметров, позволяющих оценивать энергию связи радионуклидов с почвенным поглощающим комплексом (ППК), а также подвижность, биологическую доступность радионуклидов, являются их формы нахождения в почвах (англ. «speciation»).

На фоне потенциальной возможности использования территории СИП в хозяйственных целях с учетом ее специфики, и планируемых работ по реабилитации радиоактивно загрязненных объектов, исследования форм нахождения ИРН в почвах СИП приобретают особую актуальность.

Степень разработанности темы исследования. Одной из первых работ в советской науке, посвященных данной проблеме, является труд, выполненный под руководством Ключковского В.М. Первая часть данной работы была посвящена опытам по изучению взаимодействия растворов, содержащих продукты деления, с почвами, процессов их поглощения твердой фазой почвы и способности к десорбции. В тот же период были начаты экспериментальные работы по изучению радионуклидов в упрощенных системах, в т.ч. в системе «почва-раствор» под руководством Тимофеева-Ресовского Н.В. В результате которых была предложена классификация радионуклидов по типу поведения в системе «почва-раствор» и выделены факторы, управляющие их подвижностью.

Следующий период развития исследований в данной области связан с Кыштымской аварией на ПО «Маяк» (1957 г., ВУРС). Испытания ядерного оружия определили дальнейшее направление исследований форм нахождения ИРН в почвах, поступивших с глобальными выпадениями. Исследования последствий аварии, произошедшей в 1986 г. на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), вскрыли новые закономерности поведения ИРН в почве. Изучением поведения ИРН в

почвах в зоне ЧАЭС занимались такие исследователи, как Бондаренко Г.Н., Круглов С.В., Кашпаров В.А., Санжарова Н.И., Бобовникова Ц.И., Анисимов В.С., Переволоцкий А.Н. и др. В их работах отражены закономерности поведения ИРН в почвах зоны аварии на ЧАЭС, отличные от ранее полученных закономерностей, что связано со спецификой чернобыльских выпадений. Большой вклад в исследование поведения ИРН в почвах внесли также такие исследователи как Павлоцкая Ф.И., Горяченкова Т.А., Куликова Н.В., Молчанова И.В., Михайловская Л.Н. и др.

Среди трудов зарубежных исследователей необходимо отметить В. Salbu, L. Skipperud, J. Guillen, D. Oughton, S.K. Gupta, K.Y. Chen, G. Lujaniene, M.K. Schultz, В. Todorov и др., внесших значительный вклад в развитие представлений о поведении радионуклидов в почвах.

На территории СИП было проведено несколько исследований, посвященных формам нахождения ИРН в почвах. Первыми и практически единственными опубликованными работами, проведенными в период действия СИП, содержащими сведения о растворимости ИРН в почвах, являются работы Израэля Ю.А. Наиболее изученными из объектов СИП являются площадки «Опытное поле» (площадка проведения наземных и воздушных ядерных испытаний) и «Дегелен» (площадка проведения подземных ядерных взрывов, зона влияния радиоактивных штольневых водотоков), их изучением в разное время занимались такие исследователи, как Дубасов Ю.В., Артемьев О.И., Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Бахур А.Е., Сидорич Т.В. и др. В значительной части проведенные исследования охватывают лишь отдельные площадки, отдельные радионуклиды и не учитывают весь перечень значимых для территории СИП техногенных радионуклидов, отсутствуют данные о влиянии почвенных свойств на поведение радионуклидов.

Недостаточная изученность объекта исследования и ограниченность области применения ранее полученных закономерностей поведения ИРН на других объектах предопределили выбор темы исследования.

Цель исследования – исследование параметров подвижности (форм нахождения) искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвах территории СИП, характеризующихся различным происхождением радиоактивного загрязнения почвенного покрова (выпадения от наземных ядерных испытаний, выпадения от экскавационного взрыва, глобальные выпадения, радиоактивные водотоки, радиоактивные вещества) с использованием единых методологических подходов.

Задачи исследования:

1) определение форм нахождения основных дозообразующих искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвах объектов СИП, подвергшихся радиоактивному загрязнению различного характера;

2) оценка влияния физико-химических свойств почв на параметры подвижности искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвенном покрове объектов СИП;

3) выявление закономерностей распределения форм нахождения искусственных радионуклидов в почвенном покрове территории СИП.

Научная новизна работы. Впервые для основных объектов СИП с различной природой радиоактивного загрязнения получены параметры подвижности (формы нахождения) ИРН – осколков деления ^{137}Cs , ^{90}Sr и трансурановых радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвенном покрове с использованием единой методологии

исследования. Выявлена закономерность распределения форм нахождения ИРН в почвах СИП, обусловленная происхождением радиоактивного загрязнения. Установлены особенности распределения форм нахождения для каждого из изученных ИРН в почвенном покрове объектов СИП. Выявлено закономерное изменение форм нахождения радионуклида ^{90}Sr вдоль следов выпадений от наземного и экскавационного ядерных испытаний. Впервые в условиях СИП (на примере условно фоновых территорий) определено, что параметры подвижности радионуклида ^{90}Sr возможно использовать в качестве дополнительного индикатора локальных следов выпадений от наземных ядерных испытаний, расположенных за границами площадки «Опытное поле». Показано отсутствие влияния физико-химических показателей почв на параметры подвижности радионуклидов в почвах. Установлено влияние обменной и кислоторастворимой форм нахождения радионуклида ^{90}Sr на накопление его зональными травянистыми растениями, произрастающими на территории СИП.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные параметры подвижности ИРН (формы нахождения) в почвах являются одними из базовых характеристик радиоэкологического состояния почвенного покрова СИП. Исследования показали, что объекты СИП различаются не только уровнем радиоактивного загрязнения, но и параметрами подвижности ИРН в почве, и это главным образом обусловлено природой радиоактивного загрязнения и физико-химическими свойствами самих изотопов. Выявленные характеристики подвижности радионуклидов в почвах объектов СИП определяют выбор методов ремедиации почв радиоактивно загрязненных объектов СИП. В условиях СИП при исследовании условно фоновых территорий данные о формах нахождения радионуклида ^{90}Sr наряду с базовыми параметрами используются в качестве индикатора радиоактивных выпадений от наземных ядерных взрывов.

Методология и методы исследования

Исследования выполнены на основных объектах СИП, подвергшихся радиоактивному загрязнению различного характера. Выделены следующие источники формирования радиоактивного загрязнения и объекты исследования: 1) выпадения от наземных взрывов – эпицентральные и межэпицентральные зоны наземных взрывов площадки «Опытное поле», зоны следов ближних выпадений от мощных наземных взрывов, расположенные за пределами площадки «Опытное поле»; 2) выпадения от экскавационного взрыва – объект «Атомное озеро»; 3) глобальные выпадения – условно фоновые территории СИП; 4) радиоактивно загрязненные водотоки – площадка «Дегелен» (штольни №176 и №177); 5) радиоактивные вещества – площадка «4а» испытания боевых радиоактивных веществ.

Определение форм нахождения ИРН в почвах основано на методе последовательного экстрагирования. Из специальных методов были использованы количественные инструментальные и радиохимические методы радионуклидного анализа, качественные и количественные физико-химические методы исследования свойств почв. Для обработки данных применялись статистические методы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Неоднородный характер распределения параметров подвижности ИРН (форм нахождения) в почвах объектов СИП определен, главным образом, происхождением и условиями формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Характер распределения форм нахождения изотопа ^{90}Sr в почвах в наибольшей степени

отражает зависимость параметров подвижности от происхождения и условий формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Достоверного влияния физико-химических свойств почв на неоднородность распределения параметров подвижности ИРН в почвенном покрове объектов СИП не установлено.

2. Низкая подвижность ИРН в почвах площадок проведения наземных и экскавационного взрывов (площадка «Опытное поле», объект «Атомное озеро», зоны следов выпадений от мощных наземных взрывов, расположенных за пределами площадки «Опытное поле») обусловлена исходным привнесенным прочносвязанным состоянием радионуклидов в составе радиоактивных частиц выпадений. Глобальные выпадения, радиоактивные водотоки и радиоактивные вещества определили более высокую подвижность ИРН в почвах условно фоновых территорий СИП, площадки «Дегелен» и площадки «4а».

3. Выявлена положительная взаимосвязь между содержанием в почве обменной и кислоторастворимой форм радионуклида ^{90}Sr и накоплением его степным разнотравьем.

Степень достоверности результатов. Исследования выполнялись аккредитованными лабораториями Филиала ИРБЭ РГП НЯЦ РК. Достоверность результатов определяется применением современных методик, нормативных документов и аппаратуры, подтверждается большим массивом данных исследования (более 1000 проб почв и почвенных вытяжек). Анализ результатов выполнен с применением пакета статистического анализа MS Excel.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 1.5.1 «Радиобиология», охватывающей проблемы радиационной экологии (п. 13), в диссертационном исследовании представлены данные о параметрах подвижности (формах нахождения) ИРН в почвах основных объектов СИП с различным характером радиоактивного загрязнения.

Апробация результатов. Основные результаты работы были представлены на следующих международных научно-практических конференциях: "Environmental radioactivity" (Рим, Италия, 2010); «Radioecology and Environmental radioactivity» (Барселона, Испания, 2014); «Environmental radioactivity» (Салоники, Греция, 2015; 2021); «Radioecological Concentration Processes» (Севилья, Испания, 2016); «Radioecology and Environmental Radioactivity» (Берлин, Германия, 2017); «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения» (Курчатов, Казахстан, 2010, 2012, 2016, 2021); «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, Казахстан, 2011, Курчатов, Казахстан, 2015; Алматы, Казахстан, 2017); «Ядерная наука и технологии» (Алматы, Казахстан, 2017), «4th Asian congress of radiation research» (Астана, Казахстан, 2017) «Радиобиология: актуальные проблемы» (Гомель, Беларусь, 2018), молодежная конференция с международным участием «Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий» (Обнинск, 2016, 2019), конференция–конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (Курчатов, Казахстан, 2011, 2012, 2015, 2016).

Личный вклад диссертанта в работу. Автор принимал участие на всех этапах исследования. Непосредственно участвовал в разработке методологии исследования, определении цели и задач исследования, проведении лабораторных работ (определение форм нахождения радионуклидов и физико-химических свойств почв). Самостоятельно занимался обработкой результатов, обобщением, анализом и

интерпретацией полученных данных, апробацией результатов исследования, подготовкой научных публикаций.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 37 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных (Web of Science/Scopus).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов и списка использованной литературы, включающего 224 источника. Работа изложена на 178 страницах, содержит 27 рисунков и 25 таблиц, а также 7 приложений.

Выражаю безграничную благодарность своему учителю, наставнику Лукашенко Сергею Николаевичу. Отдельную благодарность хочу выразить научному руководителю Паницкому Андрею Васильевичу, а также всем сотрудникам Филиала ИРБЭ РГП НЯЦ РК, принимавшим участие на различных этапах работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

Проведен анализ факторов, влияющих на поведение ИРН в почве. Рассмотрены особенности почвы, главного природного компонента, в котором происходит локализация ИРН, и основные свойства почвы, влияющие на миграцию радионуклидов. Рассмотрены различные виды поглотительной способности почвы и механизмы поглощения радионуклидов почвами, основные движущие силы, вызывающие миграцию радионуклидов в почвах. Показано влияние физико-химических характеристик радионуклидов на их поведение в почве, а также характеристики и особенности почвенной химии ИРН ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Отражены методы исследования форм нахождения ИРН в почвах. Приведен обзор отечественных и зарубежных работ в области исследования поведения ИРН в почве. Проведен анализ исследований параметров подвижности ИРН на территории СИП.

Глава 2. Природно-климатическая и радиозэкологическая характеристика территории Семипалатинского полигона

Во второй главе приведена информация о природно-климатической и почвенной характеристике территории СИП, особенностях радиоактивного загрязнения почвенного покрова основных объектов СИП, исследованных в работе.

Глава 3. Материалы и методы исследования

3.1. Экспедиционные работы

3.1.1. Выбор исследуемых участков

Исследования проводили на основных объектах СИП, представленных испытательными площадками и условно фоновыми территориями СИП (Рисунок 1). Методология исследования учитывала различные уровни и характер радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов, обусловленные разным происхождением радиоактивного загрязнения.

3.1.2. Отбор проб почв

Место отбора проб почвы на объектах определялось по данным предварительных площадных исследований. Отбор проб проводили в местах максимального радионуклидного загрязнения. Определение местоположения на местности по географической системе координат производилось с использованием спутникового прибора Garmin Rino 520 (точность ± 5 м). Глубина отбора проб почвы определялась характером вертикального распределения радионуклидов в почвенном профиле. В луговой экосистеме (пл. «Дегелен») производили точечный отбор проб

почвы на глубину 0-20 см с площади 100 см². В степных экосистемах отбор проб почвы производили методом конверта на глубину 0-5 см, на площадке испытания БРВ – точно на глубину 0-5 см с площади 100 см².

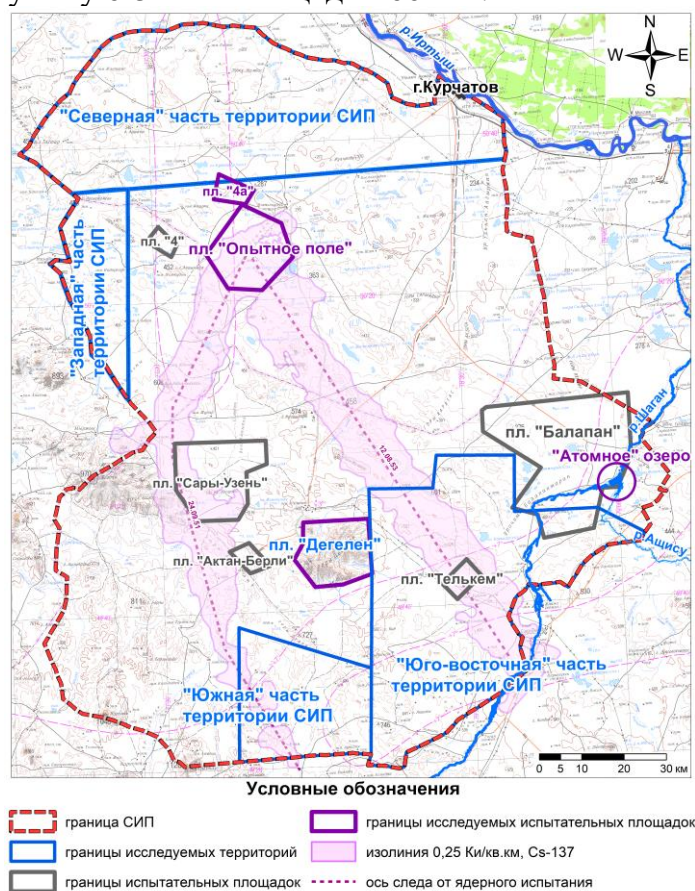


Рисунок 1. Схема расположения исследуемых объектов

3.2. Камеральные и лабораторные работы

3.2.1. Пробоподготовка почв

Подготовку проб почвы начинали сразу же после их транспортировки с полей. Пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния на воздухе или в сушильном шкафу при температуре 60°C. Из почвы механически удаляли неразложившиеся органические остатки, включения, почвы вручную размалывали в ступке и просеивали через сито диаметром отверстий 1 мм.

3.2.2. Последовательная экстракция

Исследование форм нахождения радионуклидов в почвах проводили с использованием модифицированной схемы последовательного экстрагирования, предложенной Павлоцкой Ф.И. В схему была добавлена промежуточная стадия определения органически связанных форм радионуклидов с использованием 0,1 н раствора NaOH на основе методики, разработанной Тюриным И.В.

Соотношение почвы и выщелачивающего раствора составляло 1:5 (г/мл). Масса навесок почвы составляла 100,0 г, на условно фоновых территориях - 150,0 г. Почвенную суспензию взбалтывали в течение 1 часа на ротаторе, на следующий день фильтровали через фильтр «синяя» лента. Время экстрагирования составляло в среднем 16 часов. Экстрагирование проводили при комнатной температуре. Водные вытяжки для стабилизации подкисляли до pH=1-2. Неизвлекаемый из почвы остаток радионуклидов принимали за прочносвязанную форму. В пробах почвенных вытяжек и почвы после выщелачивания определяли содержание радионуклидов.

3.2.3. Радионуклидный анализ

Определение активности гамма-излучающих радионуклидов ^{137}Cs , ^{241}Am в образцах почвы и почвенных вытяжек проводили на гамма-спектрометрах GEM FX 5825-P4 Ortec фирмы «Ametek» и BE 3830 фирмы «Canberra». Радионуклид ^{90}Sr в почвах с высоким удельным содержанием ^{90}Sr (от 500 Бк/кг и более) определяли инструментальным методом с использованием бета-спектрометра «Прогресс». Предел обнаружения данного метода составляет 100 Бк/кг.

Образцы почвы с низким содержанием радионуклида ^{90}Sr (менее 500 Бк/кг) и почвенных вытяжек анализировали радиохимическим методом с бета-спектрометрическим окончанием. Радиохимическое определение ^{90}Sr заключалось в полном кислотном разложении озоленного образца почвы концентрированными кислотами (HF , HNO_3) с дальнейшей очисткой и выделением. Активность выделенного ^{90}Sr определялась по активности его дочернего радионуклида ^{90}Y после установления радиоактивного равновесия на бета-радиометре Tri-Carb 2910TR фирмы «Perkin Elmer». Необходимость использования полного кислотного разложения была обусловлена наличием в исследуемых почвах труднорастворимых радиоактивных частиц. Почвенные вытяжки направлялись на радиохимическое определение ^{90}Sr в неизменном виде без дополнительной обработки.

Содержание изотопов $^{239+240}\text{Pu}$ в пробах почвы и вытяжек определялось радиохимическим способом. Образцы почвы последовательно проходили ряд стадий, включающих: озоление, полное кислотное разложение, радиохимическую очистку и выделение изотопов плутония с помощью анионита АВ 17×8, приготовление тонкослойных спектрометрических образцов. Для контроля выхода и учета потерь использовалась изотопная метка радионуклида ^{242}Pu . Измерения счетного образца проводили на альфа-спектрометрах Alpha Analyst 7200 фирмы «Canberra» и Alpha Ensemble Ortec и Alpha Mega Ortec фирмы «Ametek». Типичный предел обнаружения для навески 10 г – 0,1 Бк/кг. Процедура разделения изотопов $^{239+240}\text{Pu}$ на колонках требует нахождения этого элемента в азотнокислой форме (7,5 М раствор). В связи с этим почвенные вытяжки перед анализом ходили предварительную подготовку.

В среднем, предел обнаружения радионуклидов в почвах и вытяжках составлял для $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,1 Бк/кг, ^{241}Am – 1,0-3,0 Бк/кг, ^{137}Cs – 1,0-3,0 Бк/кг, ^{90}Sr – 0,5 Бк/кг (для вытяжек в пересчете на воздушно-сухую почву пределы обнаружения в 5 раз выше). Погрешность аналитических измерений не превышала 30 %, а при концентрациях анализируемого радионуклида, превышающих предел его обнаружения более чем в 10 раз, погрешность аналитических измерений не превышала 10%.

3.2.4. Расчеты и форма представления данных в таблицах приложений

Результаты определения форм нахождения радионуклидов выражены в единицах удельной активности в расчете на 1 кг воздушно-сухой почвы и в процентах от суммарного содержания всех форм.

Медиана и межквартильный размах данных относительного содержания форм нахождения радионуклидов (%) рассчитывались для выборок, в которых количество численных значений больше либо равно количеству значений, определенных на уровнях менее предела обнаружения, при этом в расчетах учитывались все значения (пределы обнаружения принимались за численные значения).

3.2.5. Физико-химический анализ почв

Исследование физико-химических свойств почв проводили общепринятыми в почвоведении методами.

Глава 4. Формы нахождения ИРН ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , в почвах СИП

4.1. Формы нахождения ИРН в почвах мест проведения воздушных и наземных испытаний (площадка «Опытное поле»)

В рамках изучения мест проведения наземных и воздушных ядерных испытаний были исследованы эпицентральные и межэпицентральные участки наземных взрывов, а также зоне следов выпадений от двух наземных испытаний: ядерного взрыва мощностью 38 кт от 24.09.1951 г. («южный» след) и термоядерного взрыва мощностью 400 кт от 12.08.1953 г. («юго-восточный» след). Было исследовано 10 эпицентральных участков (на эпицентрах было отобрано от 2 до 4 смешанных проб) и 10 межэпицентральных участков (Таблица 1). Исследованный участок «южного» следа расположен на расстоянии 107-131 км от эпицентра взрыва, на территории южной части СИП, участок «юго-восточного» следа – на расстоянии 70-120 км от эпицентра на территории юго-восточной части СИП (Таблица 2).

Таблица 1. Формы нахождения ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвах эпицентральных и межэпицентральных зон, %

Формы	Водораст- воримая	Обменная	Органическая	Кислотораст- воримая	Прочно- связанная	Водораст- воримая	Обменная	Органическая	Кислотораст- воримая	Прочно- связанная
	эпицентральные зоны (n=26)					межэпицентральные зоны (n=10)				
	^{137}Cs , n=26					^{137}Cs , n=6				
Медиана, %	–	0,66	–	–	98,6	–	–	–	–	97,4
Межквартильный размах, %	–	0,75	–	–	1,1	–	–	–	–	1,9
	^{90}Sr , n=14					^{90}Sr , n=4				
Медиана, %	–	1,5	–	1,4	97,4	–	1,4	–	0,70	98,0
Межквартильный размах, %	–	1,6	–	1,2	2,0	–	0,80	–	0,98	1,7
	^{241}Am , n=14					^{241}Am , n=6				
Медиана, %	–	–	–	7,0	92,4	–	–	–	–	95,0
Межквартильный размах, %	–	–	–	12,4	12,3	–	–	–	–	7,3
	$^{239+240}\text{Pu}$, n=11					$^{239+240}\text{Pu}$ не определяли				
Медиана, %	0,01	0,003	0,07	0,17	99,7	–	–	–	–	–
Межквартильный размах, %	0,008	0,009	0,18	0,50	0,50	–	–	–	–	–

Таблица 2. Формы нахождения ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах на следе выпадений от наземных ядерных взрывов, %

Формы	Водораст. Обменная	Органи- ческая	Кислотораст воримая	Прочно- связанная	Водораст. Обменная	Органи- ческая	Кислотораст воримая	Прочно- связанная
	38 кт, 24.09.1951 г. (n=5)				400 кт, 12.08.1953 г. (n=11)			
	^{137}Cs , n=5				^{137}Cs , n=9			
Медиана, %	1,5	–	–	98,5	0,60	–	0,48	99,2
Межквартильный размах, %	1,1	–	–	1,5	0,55	–	0,36	0,50
	^{90}Sr , n=				^{90}Sr , n=8			
Медиана, %	8,6	–	2,9	90,0	0,78	–	0,34	99,0
Межквартильный размах, %	4,1	–	2,0	2,8	1,8	–	0,73	3,2
	$^{239+240}\text{Pu}$, n=5				$^{239+240}\text{Pu}$, n=7			
Медиана, %	–	–	–	99,9	–	0,25	0,13	99,5
Межквартильный размах, %	–	–	–	0,10	–	0,27	0,23	0,60

Максимальное содержание ИРН в почве объектов, подвергшихся радиоактивному загрязнению от наземных испытаний, приходится на долю

прочносвязанной формы. Низкая подвижность ИРН на данных участках определена, главным образом, спецификой образования радиоактивных частиц при наземных испытаниях.

В зоне следа от термоядерного испытания (400 кт) подвижность осколков деления ^{137}Cs и ^{90}Sr заметно ниже, чем на следе от ядерного испытания (38 кт). Выявлена тенденция увеличения доли обменной и подвижной форм изотопа ^{90}Sr на участке вдоль следа выпадений от термоядерного испытания (Рисунок 2). Данная закономерность обусловлена процессами фракционирования радионуклидов и механизмами образования радиоактивных частиц при атмосферных взрывах.

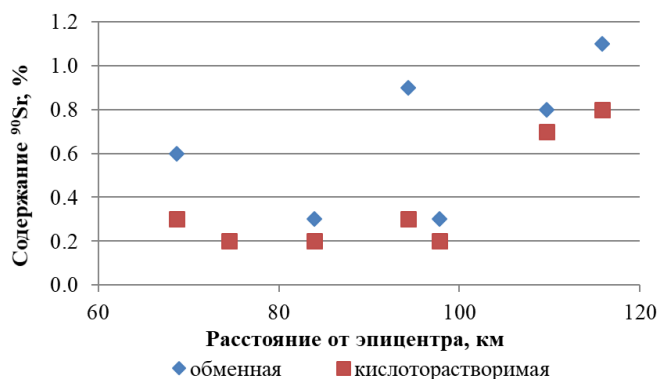


Рисунок 2. Изменение параметров подвижности ^{90}Sr в почве вдоль следа выпадений от наземного термоядерного взрыва (400 кт) на юго-восточной территории СИП

4.2. Формы нахождения ИРН в почвах объектов, подвергшихся радиоактивному загрязнению выпадениями от экскавационного ядерного испытания (объект «Атомное озеро»)

На объекте «Атомное озеро» исследован участок максимального радионуклидного загрязнения - след выпадений от базисной волны (Таблица 3). Отбор 12 образцов проб почвы проводили вдоль направления оси следа. Расстояние между точками составляло от 60 до 400 м.

Таблица 3. Формы нахождения ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am почвах объекта «Атомное озеро», %

Формы	Водораст- воримая	Обменная	Органи- ческая	Кислотораст- воримая	Прочно- связанная
^{137}Cs , n=11					
Медиана, %	–	–	–	1,4	98,6
Межквартильный размах, %	–	–	–	1,0	1,2
^{90}Sr , n=9					
Медиана, %	0,47	24,0	0,42	19,2	78,8
Межквартильный размах, %	3,8	25,0	0,66	9,2	36,6
^{241}Am , n=5					
Медиана, %	–	–	–	11,8	88,0
Межквартильный размах, %	–	–	–	9,2	8,5
$^{239+240}\text{Pu}$, n=9					
Медиана, %	–	–	0,78	1,3	98,0
Межквартильный размах, %	–	–	1,6	1,4	2,6

Максимальное содержание ИРН выявлено в прочносвязанной форме. Отмечено увеличение содержание обменной и кислоторастворимой форм ^{90}Sr кислоторастворимой формы ^{241}Am и органической и кислоторастворимой форм $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах «Атомного озера» относительно участков, подвергшихся загрязнению выпадениями от наземных взрывов. Выявлено увеличение доли

обменной и кислоторастворимой форм ^{90}Sr вдоль следа выпадений на объекте «Атомное озеро» на (Рисунок 3).

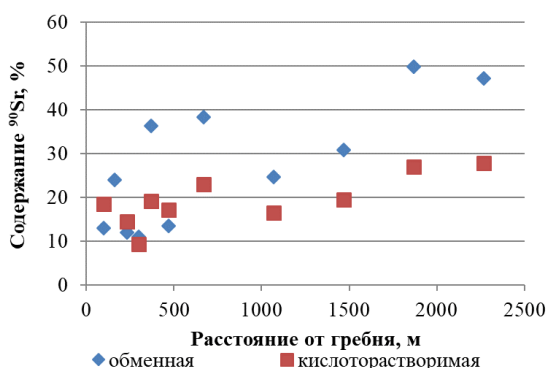


Рисунок 3. Изменение параметров подвижности ^{90}Sr на следе выпадений от экскавационного взрыва

Таким образом, поведение радионуклидов в почвах места проведения экскавационных взрывов может быть обусловлено, в первую очередь, исходным физико-химическим состоянием радионуклидов в выпадениях.

4.3. Формы нахождения ИРН в почвах объектов, подвергшихся радиоактивному загрязнению глобальными выпадениями (условно фоновые территории СИП)

Условно фоновая территория СИП была исследована на примере северной (СЧ), западной (ЗЧ), юго-восточной (ЮВЧ) и южной частей (ЮЧ) СИП (Таблица 4). Отбор проб почвы проводили на участках с повышенными уровнями радиоактивного загрязнения.

Таблица 4. Формы нахождения ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr в почвах условно фоновой территории СИП, %

Формы	Водораств. + Обменная	Органическая	Кислотораств. воримая	Прочносвязанная	Водораств. + Обменная	Органическая	Кислотораств. воримая	Прочносвязанная	Водораств. + Обменная	Органическая	Кислотораств. воримая	Прочносвязанная
	^{137}Cs				$^{239+240}\text{Pu}$				^{90}Sr			
СЧ (n=10)	n=10				n=9				n=10			
Медиана, %	–	–	–	96,4	–	–	–	99,2	78,8	–	–	–
Межкварт. размах, %	–	–	–	1,1	–	–	–	0,75	9,6	–	–	–
ЗЧ (n=8)	n=8				n=8				n=5			
Медиана, %	–	–	–	96,7	–	–	–	99,6	40,8	–	30,5	–
Межкварт. размах, %	–	–	–	1,8	–	–	–	0,98	32,5	–	26,4	–
ЮВЧ (n=14)	n=14				n=8				n=12			
Медиана, %	2,4	–	–	97,1	–	0,84	0,46	98,6	52,0	–	29,1	–
Межкварт. размах, %	2,0	–	–	2,4	–	2,1	0,56	2,2	23,2	–	28,6	–
ЮЧ (n=5)	n=5				n=5				n=4			
Медиана, %	2,3	–	–	97,7	–	–	–	99,5	18,2	–	7,6	78,3
Межкварт. размах, %	3,0	–	–	4,3	–	–	–	0,50	3,9	–	11,2	16,6

На всей условно фоновой территории СИП определена низкая подвижность ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ в почве. Отмечено повышенное содержание органической формы $^{239+240}\text{Pu}$ за пределами следа выпадений (0,84%) от испытания мощностью 400 кт (1953 г.) по сравнению с зоной следа (0,25%) (раздел 4.1.3).

Наиболее высокая подвижность изотопа ^{90}Sr в почвах северной территории, подверженной глобальным выпадениям – не менее 78,8% от суммарного содержания всех форм ^{90}Sr приходится на долю обменной формы. Медианное значение содержания обменной формы радионуклида ^{90}Sr в почвах юго-восточной части СИП снижается до 52%, в почвах южной части СИП – до 18,2%. Приведенные результаты отражают влияние выпадений от наземных испытаний на данные территории.

На следах выпадений от наземных ядерных испытаний (раздел 4.1.3), ограниченных изолинией 0,25 Ки/кв.км ^{137}Cs по результатам аэрогаммасъемки 1991 г., медианное значение содержания обменной формы на следах снижается до 0,78% (юго-восточный след) и до 8,6% (южный след). Содержание кислоторастворимой формы ^{90}Sr в зоне «юго-восточного» следа (0,34%) на юго-снижается более чем на два порядка относительно территории, прилегающей к следу (29,1%). Основное содержание радионуклида ^{90}Sr обнаруживается в прочносвязанной форме (99 % на юго-восточной территории и 90 % - на южной территории). Несмотря на значительное расстояние между исследованными участками и источником загрязнения (площадки «Опытное поле»), характер распределения форм нахождения радионуклида ^{90}Sr в них практически идентичен, что является вполне закономерным.

Таким образом, по данным исследования изотопа ^{90}Sr территории, подвергшиеся глобальным выпадениям и, подвергшиеся влиянию радиоактивных выпадений от местных наземных ядерных испытаний, характеризуются принципиально различным характером радиоактивного загрязнения почвы. Выявленные особенности позволяют использовать формы нахождения радионуклида ^{90}Sr на условно фоновых территориях СИП в качестве индикатора радиоактивных выпадений от наземных ядерных испытаний.

4.4. Формы нахождения ИРН в почвах объектов, подвергшихся загрязнению радиоактивными водотоками (луговые почвы участков в районе штолен №176 и № 177 с водопроявлением на площадке «Дегелен»)

На площадке «Дегелен» были исследованы экосистемы в районе штолен № 176 и № 177 с водопроявлением. Радиоактивное загрязнение участка в районе штольни № 176 обусловлено, главным образом, двумя радионуклидами – ^{137}Cs и ^{90}Sr . На припортальном участке штольни № 177 также присутствуют трансурановые радионуклиды ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ (Таблица 5-6). Отбор проб почвы на исследуемых объектах производился вдоль русла на участках максимального радионуклидного загрязнения.

Таблица 5. Формы нахождения ^{137}Cs , ^{90}Sr в почвах площадки «Дегелен», %

Формы	Водораст- воримая	Обменная	Кислотораст- воримая	Фиксиро- ванная	Прочно- связанная	Водораст- воримая	Обменная	Органи- ческая	Кислотораст- воримая	Фиксиро- ванная	Прочно- связанная
	Штольня № 176					Штольня № 176					
	^{137}Cs , n=9					^{137}Cs , n=8					
Медиана, %	–	1,4	0,92	8,6	87,8	не опр.	2,2	0,46	1,2	не опр.	95,8
Межкварт. размах, %	–	1,2	0,31	20,8	20,0	не опр.	3,4	0,94	1,0	не опр.	4,3

	⁹⁰ Sr, n=23					⁹⁰ Sr, n=6					
Медиана, %	1,3	53,4	38,2	5,0	2,0	0,86	52,7	2,0	32,4	9,2	2,5
Межкварт. размах, %	1,2	11,1	15,6	3,4	1,3	0,61	8,8	0,70	7,2	1,8	1,2

Радионуклид ¹³⁷Cs в почвах характеризуется низкой подвижностью. Максимальное содержание ⁹⁰Sr отмечено в обменной форме (53%), менее значительное - в кислоторастворимой форме (38 и 32%, соответственно).

Максимальное содержание ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в почвах определено в прочносвязанной форме (98,1%). Основное содержание ²⁴¹Am распределено между двумя формами – прочносвязанной (60,4%) и кислоторастворимой (39,6%).

Таблица 6 Формы нахождения ²⁴¹Am и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в почвах участка в районе штольни № 177, %

Формы	Водорастворимая + Обменная	Органическая	Кислоторастворимая	Прочно-связанная
²⁴¹ Am, n=7				
Медиана, %	–	–	39,6	60,4
Межквартильный размах, %	–	–	16,6	16,6
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu, n=3				
Медиана, %	0,27	0,94	0,88	98,1
Межквартильный размах, %	0,56	2,2	2,2	3,7

Таким образом, луговые почвы экосистем, подверженных влиянию радиоактивных штольневых водотоков, характеризуется относительно большей подвижностью ИРН в сравнении с ранее рассмотренными объектами СИП, что обусловлено как почвенно-климатическими условиями, так и исходными привнесенными формами радионуклидов.

4.5. Формы нахождения ИРН в почвах объектов, подвергшихся загрязнению радиоактивными веществами (площадка «4а», место испытания БРВ)

На площадке «4а» было исследовано 10 участков испытания БРВ (Таблица 7).

Таблица 7. Формы нахождения ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu и ²⁴¹Am в почвах площадки «4а», %

Формы	Водорастворимая	Обменная	Органическая	Кислоторастворимая	Прочно-связанная	Водорастворимая	Обменная	Органическая	Кислоторастворимая	Прочно-связанная
	¹³⁷ Cs, n=6					⁹⁰ Sr, n=5				
Медиана, %	0,30	3,9	0,28	2,6	93,1	0,83	59,0	1,6	26,2	9,9
Межквартильный размах, %	0,60	1,5	0,33	0,68	2,5	0,26	7,8	0,87	3,2	7,4
²⁴¹ Am, n=8					²³⁹⁺²⁴⁰ Pu, n=7					
Медиана, %	–	–	7,5	76,8	17,5	0,060	0,027	5,2	0,95	93,7
Межквартильный размах, %	–	–	5,0	7,5	8,8	0,12	0,023	5,7	0,52	7,0

Площадка испытаний БРВ характеризуется наиболее высокими значениями параметров подвижности ИРН в почвах из всех рассмотренных объектов. Основным фактором высокой подвижности радионуклидов в почвах на данной площадке играют привнесенные исходные формы радионуклидов в составе БРВ.

4.6. Оценка влияния физико-химических свойств почв на формы нахождения ИРН в почве

Ранговый корреляционный анализ не выявил достоверных корреляционных связей между параметрами подвижности ИРН и физико-химическими свойствами почв. Физико-химические свойства почв не оказывают влияние на неоднородность параметров подвижности (форм нахождения) ИРН в почвах объектов СИП.

4.7. Оценка влияния форм нахождения ИРН на накопление их зональными растениями, произрастающими на территории СИП.

Ранговый корреляционный анализ данных выявил достоверные корреляционные связи между накоплением изотопов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ пылью (*Artemisia gracileccens*) в зоне следа выпадений от экскавационного взрыва (объект «Атомное озеро») и содержанием в почве обменной формы ^{90}Sr (0,90) и органической формы $^{239+240}\text{Pu}$ (0,96) ($p=0,05$) (Рисунок 6).

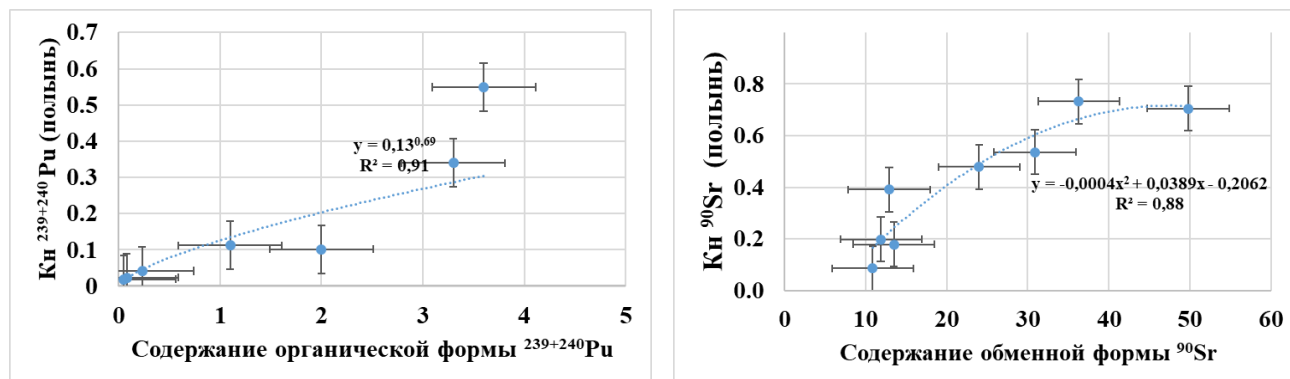


Рисунок 6. Влияние форм нахождения радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ на накопление радионуклидов растениями на объектах СИП

Анализ данных, полученных для всех объектов СИП, выявил высокие коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием в почве обменной и кислоторастворимой формы ^{90}Sr и накоплением его зональными травянистыми растениями (степным разнотравьем) (0,90; 0,89) (Рисунок 7).

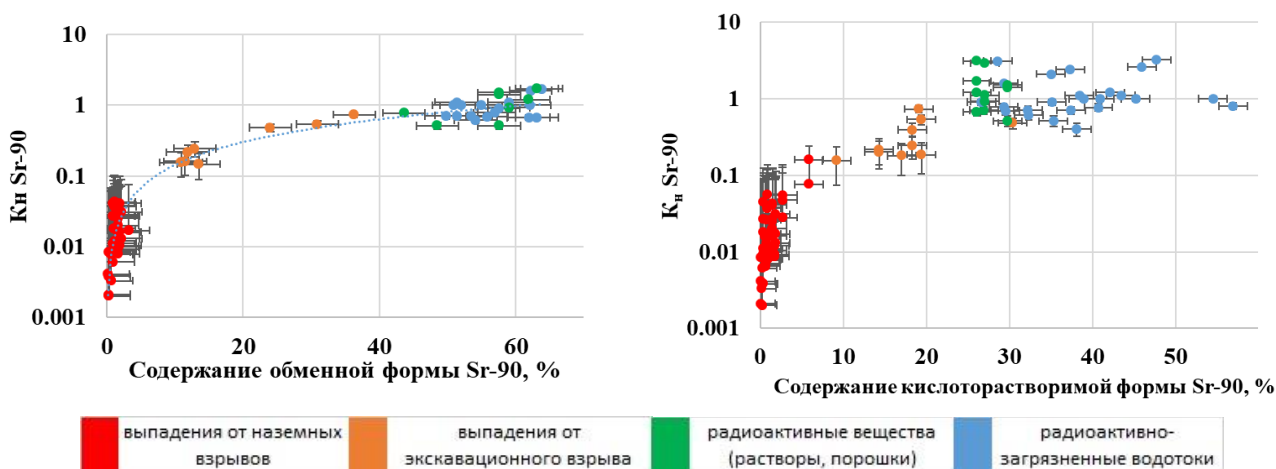


Рисунок 7. Влияние форм нахождения радионуклида ^{90}Sr на его накопление растениями на территории СИП

Диаграмма рассеяния позволяет сделать вывод о том, что выявленная взаимосвязь может быть обусловлена условиями формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП.

ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

5.1. Сравнительный анализ форм нахождения ИРН в почвах СИП

В целях комплексной оценки проведен сравнительный анализ форм нахождения ИРН ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в почвах различных объектов СИП (Рисунки 8-11).

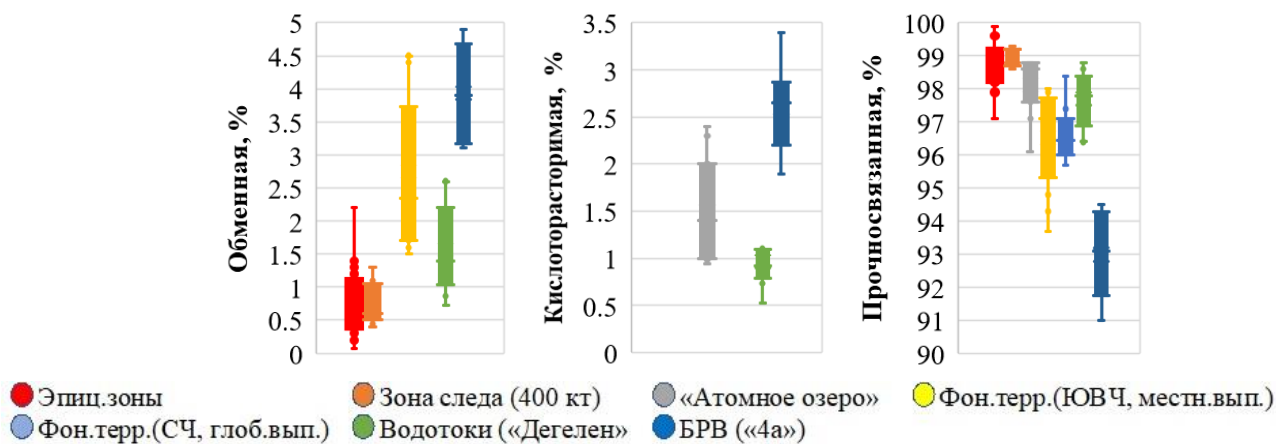


Рисунок 8. Формы нахождения радионуклида ^{137}Cs в почвах СИП

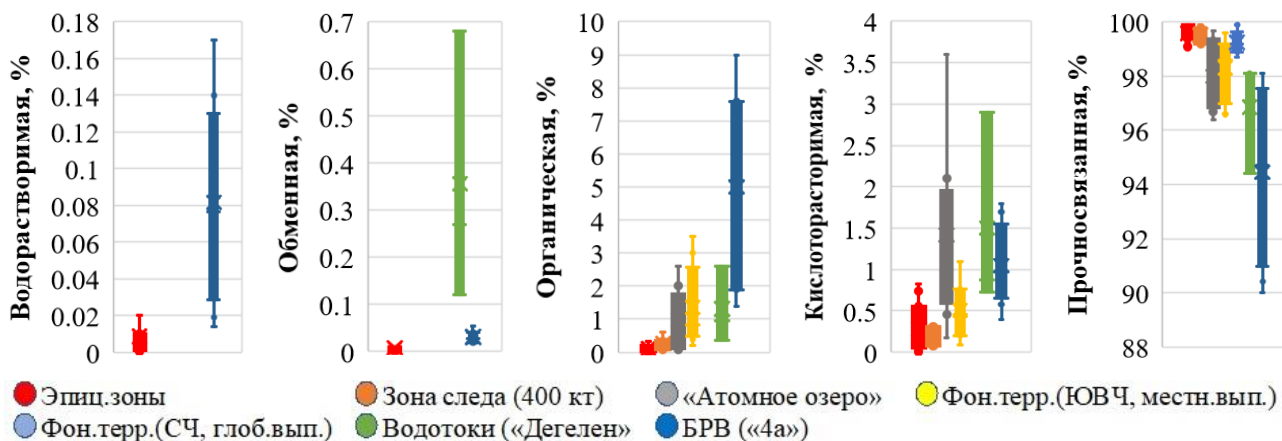


Рисунок 9. Формы нахождения радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах СИП

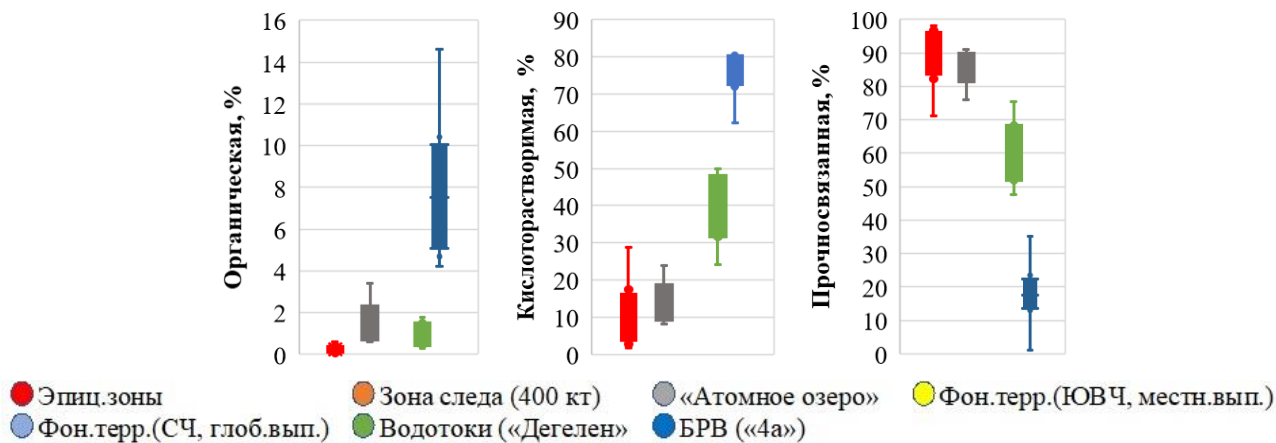


Рисунок 10. Формы нахождения радионуклида ^{241}Am в почвах СИП

В почвах СИП независимо от происхождения радионуклидного загрязнения ^{137}Cs характеризуется низкой подвижностью (Рисунок 8). Преобладающее содержание ^{137}Cs в почвах СИП находится в прочносвязанной форме, содержание которой изменяется от 93% (на площадке «4а»), до 96% (на площадке «Дегелен») и достигает 99% в местах проведения экскавационных и наземных взрывов (объект «Атомное озеро», площадка «Опытное поле»).

Радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$ характеризуется низкой подвижностью (Рисунок 9). Основная доля $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах всех исследованных объектов СИП определена в прочносвязанной форме. Особенностью распределения форм нахождения $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах СИП является его нахождение в составе органической формы, и ее величина

отражает различие в характере радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП.

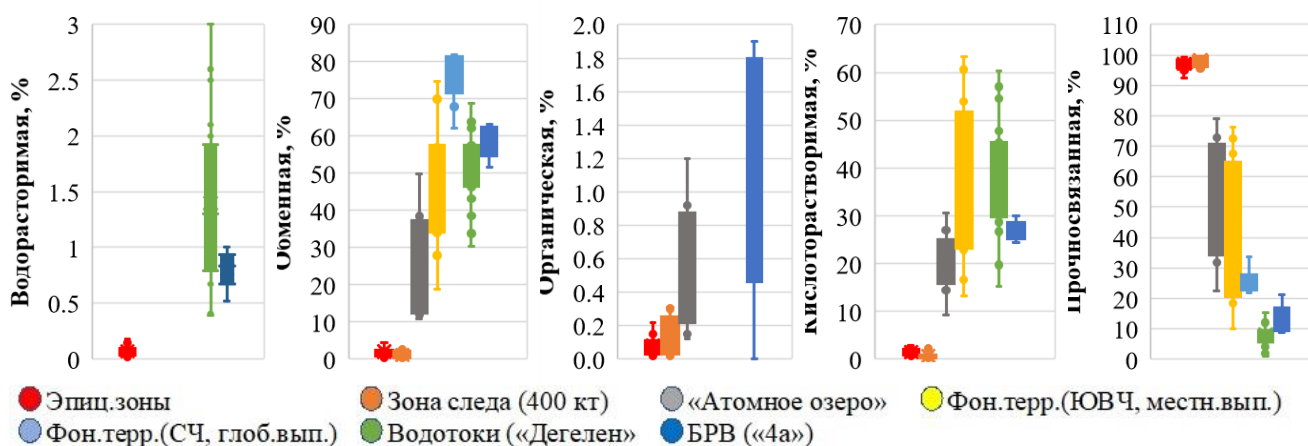


Рисунок 11. Формы нахождения радионуклида ^{90}Sr в почвах СИП

Особенностью поведения радионуклида ^{241}Am в почвах объектов СИП является его распределение между двумя основными формами – кислоторастворимой и прочносвязанной (Рисунок 10). В представленном ряду объектов отмечается увеличение доли кислоторастворимой формы относительно прочносвязанной.

Наименьшей подвижностью ИРН характеризуются объекты, подвергшиеся радиоактивным выпадениям от наземных и экскавационного испытаний. На объектах, подвергшихся влиянию глобальных выпадений, загрязненных радиоактивными водотоками и радиоактивными веществами, подвижность ИРН, в особенности ^{90}Sr , заметно увеличивается.

5.2. Использование параметров подвижности ИРН для обоснования выбора способов ремедиации объектов СИП

Установленные параметры подвижности ИРН в почвах позволяют рекомендовать для объектов, подвергшихся радиоактивному загрязнению радиоактивными водотоками и веществами (площадки «Дегелен» и «4а»), характеризующихся локальным характером радионуклидного загрязнения с проникновением на значительную глубину, и высокой подвижностью ИРН в почве, рекомендуются следующие методы ремедиации: извлечение и экстракция/промывка грунта соответствующими экстрагирующими растворами, с дальнейшим размещением очищенного грунта на свалку или возвращением в первоначальное место и иммобилизация радионуклидов за счет перевода радионуклидов в малоподвижные соединения с использованием различных добавок и сорбционных материалов (гипс, известь, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, торф, бентонит, цеолиты, органические мелиоранты, удобрения и сорбенты и т.д.).

5.3. Использование параметров подвижности радионуклида ^{90}Sr в качестве индикатора локальных следов выпадений от наземных испытаний ядерного оружия

Формы нахождения изотопа ^{90}Sr наиболее ярко отражают различие в характере радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. Установлена тенденция увеличения подвижности ^{90}Sr вдоль следов выпадений от наземного (38 кт, 24.09.1951 г.) и экскавационного взрывов («Атомное озеро») (разделы 4.1.3., 4.2). Установленные закономерности распределения параметров подвижности изотопа ^{90}Sr в почвах на следах выпадений от наземных ядерных испытаний (38 кт, 24.09.1951 г. и 400 кт, 12.08.1953 г.) и прилегающих к ним территорий определяют возможность

использования данных о формах нахождения изотопа ^{90}Sr в качестве дополнительного индикатора локальных следов выпадений от наземных ядерных взрывов на условно фоновых территориях СИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных на территории Семипалатинского полигона испытаний различного типа были сформированы объекты (площадки проведения испытаний), характеризующиеся различным качественным и количественным составом радионуклидного загрязнения почвенного покрова.

Комплексные исследования форм нахождения ИРН ^{137}Cs , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{90}Sr в почвах различных объектов СИП, впервые проведенные с применением единых методологических подходов, позволили более глубоко изучить характер радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Полученные результаты показали, что параметры подвижности ИРН (формы нахождения) в почвах исследованных объектов СИП имеют неоднородный характер. Выявлена закономерность увеличения параметров подвижности искусственных радионуклидов в почвах объектов СИП в следующем ряду: объекты, подвергшиеся выпадениям от наземных ядерных испытаний (эпицентральные, межэпицентральные участки площадки «Опытное поле») – зоны следов ближних выпадений от мощных наземных испытаний, проведенных на площадке «Опытное поле» (38 кт от 24.09.1951 и 400 кт от 12.08.1953) – объект, подвергшийся выпадениям от экскавационного взрыва (объект «Атомное озеро») – территории, подвергшиеся влиянию ближних выпадений от мощных наземных испытаний (юго-восточная и южная части условно фоновой территории СИП) – условно фоновые территории, подвергшиеся глобальным выпадениям (северная и западная части условно фоновой территории СИП) – зоны влияния штольневых радиоактивных водотоков (площадка «Дегелен») – объекты, подвергшиеся загрязнению радиоактивными веществами (площадка испытания БРВ «4а»). Результаты исследования позволили сделать вывод о том, что подвижность ИРН в почвах объектов СИП определена происхождением и условиями формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Наиболее подвижным из исследованных радионуклидов оказался изотоп ^{90}Sr , параметры подвижности которого максимально отражают неоднородность характера радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. Получены уникальные данные о формах нахождения трансурановых радионуклидов ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах объектов СИП. Судить о различии в характере радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП позволяют данные относительного содержания в почве кислоторастворимой формы радионуклида ^{241}Am и органической формы радионуклида $^{239+240}\text{Pu}$. Проведенный корреляционный анализ не выявил влияния почвенных показателей на формы нахождения ИРН в почвах.

На основе полученных экспериментальных данных о подвижности ИРН в почвах даны рекомендации по выбору методов ремедиации объектов СИП. Предложено использование параметров подвижности радионуклида ^{90}Sr в качестве дополнительного индикатора следов выпадений от наземных ядерных испытаний.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в поиске наиболее эффективных схем экстрагирования трансурановых радионуклидов для более точной оценки их подвижности в почве.

ВЫВОДЫ

1. В почвах СИП независимо от происхождения радиоактивного загрязнения радионуклид ^{137}Cs характеризуется низкой подвижностью. Основное содержание ^{137}Cs в почвах находится в прочносвязанной форме, медианное значение содержания которой изменяется от 93% (на площадке испытания БРВ «4а»), до 96% (на участках, подвергшихся влиянию радиоактивных водотоков (площадка «Дегелен»), и глобальных выпадений (условно фоновые территории)) и достигает 99% на объектах, загрязненных выпадениями от наземных и экскавационных взрывов (площадка «Опытное поле, объект «Атомное озеро»).

2. Изотопы $^{239+240}\text{Pu}$ характеризуются низкой подвижностью, основная его доля в почвах всех исследованных объектов СИП определена в прочносвязанной форме. $^{239+240}\text{Pu}$ в почвах СИП стабильно определяется в составе органической формы, и ее величина отражает различие в характере радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. Минимальное медианное значение содержания органической формы отмечено в эпицентральных зонах площадки «Опытное поле» (0,07%), далее увеличивается на следах наземных взрывов (0,25% на следе выпадений от взрыва 1953 г.) и на объекте проведения экскавационного взрыва (0,78%). На условно фоновых территориях, подвергшихся влиянию выпадений от наземных взрывов (юго-восточная часть СИП) медианное значение органической формы составляет 0,84%, в почвах экосистемы в районе штольни № 177 доля органической формы составляет 0,94%, в местах испытания БРВ ее содержание максимально – 5,2%.

3. Особенностью радионуклида ^{241}Am в почвах объектов СИП является его относительное распределение между двумя основными формами – кислоторастворимой и прочносвязанной. В условиях СИП характер распределения ^{241}Am между кислоторастворимой и прочносвязанной формой отражает различие характера радионуклидного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. В почвах эпицентральных зон площадки «Опытное поле» на долю кислоторастворимой формы приходится не менее 7,0%, прочносвязанной – не менее 92%. На объекте «Атомное озеро», подверженному выпадениям от экскавационного испытания, медианное значение содержания кислоторастворимой формы достигает 11,8%, содержание прочносвязанной формы снижается до 88%. На объектах, подверженных влиянию радиоактивных водотоков (площадка «Дегелен») медианное значение содержания кислоторастворимой формы ^{241}Am повышается до 39%, прочносвязанной формы – снижается до 60%. В почвах площадки испытания БРВ (площадка «4а») доля кислоторастворимой формы преобладает, и составляет 76,8%, доля прочносвязанной формы снижается до 17,5%.

4. Из изученных радионуклидов данные форм нахождения изотопа ^{90}Sr максимально отражают неоднородность характера радиоактивного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. В зависимости от типа загрязнения доля той или иной формы может варьировать в широких пределах: медианное значение содержания водорастворимой формы ^{90}Sr варьирует от < 0,47 до 1,3 %, обменной – от 0,78 до 78,8 %, подвижной – от 0,34 до 38,2 %, прочносвязанной – от 7,0 до 99%. Дополнительно выявлено увеличение параметров подвижности изотопа ^{90}Sr на следах выпадений от мощного наземного ядерного испытания (38 кт, 24.09.1951 г.) и экскавационного взрыва, обусловленное процессами фракционирования радионуклидов во время испытаний. В условиях СИП на условно фоновых территориях параметры подвижности радионуклида ^{90}Sr допустимо использовать в

качестве дополнительного индикатора радиоактивных выпадений от наземных ядерных испытаний.

5. По данным форм нахождения ИРН выявлены различия в характере радионуклидного загрязнения почвенного покрова объектов СИП. Подвижность радионуклидов в почвах на объектах СИП увеличивается в следующем ряду: объекты, подвергшиеся выпадениям от наземных ядерных испытаний (эпицентральные, межэпицентральные участки площадки «Опытное поле») – зоны следов ближних выпадений от мощных наземных испытаний, проведенных на площадке «Опытное поле» (38 кт от 24.09.1951 г. и 400 кт от 12.08.1953 г.) – объект, подвергшийся выпадениям от экскавационного взрыва (объект «Атомное озеро») – территории, подвергшиеся влиянию ближних выпадений от мощных наземных испытаний (юго-восточная и южная части условно фоновой территории СИП) – условно фоновые территории, подвергшиеся глобальным выпадениям (северная и западная части условно фоновой территории СИП) – зоны влияния штольневых радиоактивных водотоков (площадка «Дегелен») – объекты, подвергшиеся загрязнению радиоактивными веществами (площадка испытания БРВ «4а»).

6. Корреляционный анализ не выявил достоверного влияния физико-химических параметров почв на неоднородность параметров подвижности радионуклидов в почвах СИП.

7. Подвижность ИРН в почвах объектов СИП определена, главным образом, происхождением и условиями формирования радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Низкая подвижность радионуклидов в почвах площадок проведения наземных и экскавационных взрывов обусловлена исходным привнесенным прочносвязанным состоянием радионуклидов в составе радиоактивных частиц выпадений от наземных и экскавационных взрывов. Повышенная растворимость радиоактивных частиц в составе глобальных выпадений, растворимые исходные формы ИРН, поступивших в почву с радиоактивными водотоками и радиоактивными веществами, обусловили повышенную подвижность ИРН в почвах условно фоновых территорий СИП, площадки «Дегелен» и площадки «4а» испытания БРВ.

8. Определена положительная тенденция в увеличении накопления радионуклидов ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ растением полынью (*Artemisia gracileccens*) на следе выпадений от экскавационного взрыва (объект Атомное озеро), связанная с повышением содержания обменной формы ^{90}Sr и органической формы $^{239+240}\text{Pu}$ в почве ($K_{\text{корр.}}$ 0,90; 0,96). Для объектов СИП выявлена положительная взаимосвязь между содержанием в почве обменной и кислоторастворимой формы ^{90}Sr и накоплением его зональными травянистыми растениями.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных (Web of Science/Scopus):

1. **Кундузбаева А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах объекта «Атомное озеро» Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Кундузбаева А.Е., А.М. Кабдыракова, Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. - № 4. – с. 399-413.
2. Lukashenko, S. Radioactive particles released from different sources in the Semipalatinsk test site / S. Lukashenko, A. Kabdyrakova, O.C. Lind, I. Gorlachev, **A. Kunduzbayeva**,

T. Kvochkina, K. Janssens, W. De. Nolf, Yu. Yakovenko, B. Salbu // J. Environ. Radioact. – 2020. – Vol. 216. – P. 106-160.

3. **Kunduzbayeva, A.Ye.** Speciation of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , and $^{239+240}\text{Pu}$ artificial radionuclides in soils at the Semipalatinsk test site / A.Ye. Kunduzbayeva, S.N. Lukashenko, A.M. Kabdyrakova, N.V. Larionova, R.Yu. Magasheva, G.A. Bakirova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 249(1–2): 106867 DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106867.

В журналах, сборниках статей и материалах конференций:

4. Кабдыракова, А.М. Формы нахождения радионуклидов в почвах экосистем водотоков горного массива Дегелен / А.М. Кабдыракова, **А.Е. Кундузбаева**, С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана : сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2007-2009 гг. / под ред. С.Н. Лукашенко – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 2. – С. 285–299.
5. Формы нахождения радионуклидов в почвах «северных» территорий СИП / **А.Е. Кундузбаева**, А.М. Кабдыракова. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Радиоэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона] / под рук. Лукашенко С.Н.- вып. 1. - Павлодар : Дом печати, 2010. – 234 с.
6. Kabdyrakova A.M. / Radionuclides species in soils of the watercourse ecosystem at Degelen mountain of former Semipalatinsk test site/ / А.М. Kabdyrakova, **А.Е. Кундузбаева**, S.N. Lukashenko // Book of abstracts «Environmental radioactivity», Rome 25th – 27th October, 2010y. – Rome – 2010y.
7. Кабдыракова, А.М. Формы нахождения радионуклидов в почвах экосистем водотоков горного массива Дегелен. / А.М. Кабдыракова, **А.Е. Кундузбаева**, С.Н. Лукашенко // Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития» 25-27 августа, 2010г. – Курчатов – 2010г. – С. 67-69.
8. Кабдыракова А.М. Формы нахождения радионуклидов в почвах экосистем водотоков горного массива Дегелен / А.М. Кабдыракова, **А.Е. Кундузбаева**, С.Н. Лукашенко // Вестник НЯЦ РК. - Курчатов, 2011. - Вып. 2. – С. 28-36.
9. **Кундузбаева, А.Е.**, Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Формы нахождения радионуклидов в почвах некоторых участков территории СИП / Тезисы докладов 8 Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» 20-23 сентября, 2011г. – Алматы – 2011г. – С. 254-255.
10. **Кундузбаева А.Е.**, Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Сравнительная оценка форм нахождения радионуклидов в почвах некоторых участков территории СИП / Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2011г., Т.2, г. Курчатов 2011 г., С.101-120.
11. Стрильчук Ю.Г., Тоневицкая О.В., Яковенко Ю.Ю., Айдарханов А.О., Субботин С.Б., Генова С.Н., Ларионова Н.В., **Кундузбаева А.Е.**, Магашева Р.Ю., Паницкий А.В., Топорова А.В., Лукашенко С.Н. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП / Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2011г., Т.1, г. Курчатов 2011 г., С.81-164.
12. Стрильчук Ю.Г., Тоневицкая О.В., Яковенко Ю.Ю., Айдарханов А.О., Субботин С.Б., Генова С.Н., Ларионова Н.В., **Кундузбаева А.Е.**, Магашева Р.Ю., Паницкий А.В., Топорова А.В., Лукашенко С.Н. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП / Тезисы докладов 8 Международной конференции

«Ядерная и радиационная физика» 20-23 сентября, 2011г. – Алматы – 2011г. – С. 236.

13. **Кундузбаева, А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах на территории площадки «Опытное поле» / А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии: материалы Междунар. конф., Молодых ученых и специалистов, 6-8 июня 2012 г. / Отв. ред. К.К. Кадыржанов. - Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2012. - С. 212-214.
14. **Кундузбаева, А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах на территории СИП / А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: тез. докл. V междунар. науч.-практическая конф., 12-14 сентября. – Павлодар: Дом печати, 2012. - С.45-47.
15. **Кундузбаева А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах на территории площадки «Опытное поле» / А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.2. - Вып. 4. – С. 181-208. - ISBN 978-601-7112-74-5.
16. **Кундузбаева А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах испытательной площадки боевых радиоактивных веществ // А.Е. Кундузбаева, А.Ю. Осинцев, С.Н. Лукашенко, Р.Ю. Магашева // Актуальные вопросы радиозологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.2. - Вып. 4. – С. 167-180. - ISBN 978-601-7112-74-5.
17. **Кундузбаева, А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах условно «фоновых» территорий Семипалатинского испытательного полигона / А. Е. Кундузбаева, С. Н. Лукашенко, А. М. Кабдыракова, Г. А. Бакирова // Ядерная и радиационная физика: тез. X Междунар. конф., 8 - 11 сентября 2015 г. - Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2015. – С. 131.
18. **Kunduzbaeva, A.E.** Research of species of artificial radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am and $^{239+240}\text{Pu}$ in soils of conditionally «background» territories of Semipalatinsk test site / A.E. Kunduzbaeva, S.N. Lukashenko [et al.] // Meeting in St. Petersburg: Fourth International Conference, Dedicated to N.W. Timofeev-Ressovski and His Scientific School «Modern Problems of Genetics, Radiobiology, Radioecology and Evolution»; Fourth Readings after V.I.Korogodin & V.A. Shevchenko; IUR Advanced Research Workshop «Radioecology Meets Radiobiology: a Reappraisal of Basic Mechanisms of Radiation», St. Petersburg, 2-6 June 2015: Abstracts, Papers by Young Scientists. – Dubna: JINR, 2015. – P.179.
19. **Kunduzbayeva, A.E., Kabdyrakova A., Lukashenko S.** Research of species of artificial radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am in soils of conditionally background territories of Semipalatinsk test site / International Conference on Environmental Radioactivity, 29 May – 21-25 Sept. 2015, Thessaloniki, Greece, p. 123.
20. **Кундузбаева А.Е., Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах условно «фоновых» территорий Семипалатинского испытательного полигона. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2016. - № 6. – 3-17 с.
21. **Кундузбаева А.Е., Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В.** Формы

- нахождения ^{90}Sr в почвах испытательной площадки боевых радиоактивных веществ на Семипалатинском испытательном полигоне. // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 4.
22. **Кундузбаева, А. Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах Семипалатинского испытательного полигона / А. Е. Кундузбаева, А. М. Кабдыракова, С. Н. Лукашенко // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы V Междунар. конф., 13-16 сентября 2016 г. – Томск: STT, 2016. - С. 375-379.
 23. **Кундузбаева А. Е.** Исследование форм нахождения радионуклидов в почвах различных объектов СИП / А. Е. Кундузбаева, А. М. Кабдыракова, С. Н. Лукашенко // Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий: сб. докл. молодеж. конф. с междунар. участием, 7-8 сентября 2016 г. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. - С. 156-163.
 24. **Кундузбаева А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Кундузбаева, С.Н. Лукашенко // Тез. докл. VII междунар. науч.-практ. конф. "Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития", 21-23 сентября 2016 г., г. Курчатов, С. 64-65. – ISBN 978-601-80602-4-3.
 25. **Kunduzbayeva A.E.** Speciation of artificial radionuclides in soils of Semipalatinsk test site / A.E. Kunduzbayeva, S.N. Lukashenko // Book of abstracts and program of Second International Conference on Radioecological Concentration Processes. 06-09 November 2016. – Sevilla, Spain. – 2016. – P. 58.
 26. **Кундузбаева А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах различных объектов СИП / А. Е. Кундузбаева, А. М. Кабдыракова, С. Н. Лукашенко // Сборник докладов междунар. конф. «Современные проблемы радиологии и агроэкологии, пути реабилитации техногенно-загрязненных угодий», 15 декабря 2016 г. – Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. - С. 132-139.
 27. **Кундузбаева, А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах Семипалатинского испытательного полигона. / А. Е. Кундузбаева, С. Н. Лукашенко // Радиобиология: вызовы XXI века: материалы Междунар.науч. конф., 27-30 сентября 2017 г. – Гомель, 2017. – С.103-105.
 28. Стрильчук, Ю.Г. Радиоэкологическое состояние "юго-восточной" части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук [и др.] // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана : сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2014-2016 гг. / под ред. С.Н. Лукашенко. – Павлодар : Дом печати, 2017. – Вып. 6. – Т.1. – С. 11-90.
 29. **Kunduzbayeva, A.Ye.** Peculiarities of artificial radionuclides speciation in soils of Semipalatinsk test site / A.Ye. Kunduzbayeva, S.N. Lukashenko // Book of abstracts of the IV Asian Congress of Radiation Research, Institute of radiobiology and radiation protection (16-18 August 2017), Astana, 2017. – P. 132.
 30. **Kunduzbayeva, A.** Speciation of artificial radionuclides in soils of the Atomic lake objects (site of excavation nuclear explosion) of Semipalatinsk test site / A. Kunduzbayeva, A.M. Kabdyrakova, N. Larionova, S.N. Lukashenko // Abstracts book of 4th International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity, 3-8 September, 2017. – Berlin, 2017. – P. 517-519.
 31. **Кундузбаева А.Е., Лукашенко С.Н.** Формы нахождения искусственных

- радионуклидов в почвах места проведения экскавационного взрыва на СИП ("Атомное озеро") / Тезисы 11-й международной конференции «Ядерная и радиационная физика» 12-15 сентября 2017 г., г. Алматы, С. 326
32. **Кундузбаева, А.Е.** Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах «Атомного» озера Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Кундузбаева, А.М. Кабдыракова, Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко // Актуальные вопросы радиэкологии Казахстана : сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2014-2016 гг. / под ред. С.Н. Лукашенко – Павлодар: Дом печати, 2017. – Вып. 6. – Т.1. – С. 288 – 305.
33. **Кундузбаева, А.Е.,** Лукашенко С.Н. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах места проведения экскавационного взрыва на СИП («Атомное» озеро) // Ядерная и радиационная физика: тез. XI Междунар. конф. 12-15 сентября 2017 г.- Алматы, 2017. – С. 324-325.
34. **Кундузбаева А.Е.,** Лукашенко С.Н. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах объекта «Атомное озеро» Семипалатинского испытательного полигона // Сборник докладов молодежного круглого стола в рамках XLVI Международных радиэкологических чтений, посвященных действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключковскому, г. Обнинск, 30 ноября – 1 декабря 2017 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2017. – С. 68-75.
35. **Кундузбаева, А.Е.,** Кабдыракова А.М., Бакирова Г.А., Паницкий А.В. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах площадки испытания боевых радиоактивных веществ на Семипалатинском испытательном полигоне // Современные проблемы радиобиологии, радиэкологии и агроэкологии: тез. докл. VII Междунар. молодежной конф., 03-04 октября 2019 г. – Обнинск, 2019. - С. 157-161.
36. **Кундузбаева А.Е.,** Кабдыракова А.М., Лукашенко С.Н. Формы нахождения искусственных радионуклидов в почвах Семипалатинского испытательного полигона / Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: сборник докл. IX Междунар. конф., 07-09 сентября 2021 г. – Курчатов: РГП НЯЦ РК, 2021. – С. 109-110.
37. **Kunduzbayeva, A.E.** Research al distribution of of artificial radionuclides ^{137}Cs , ^{241}Am speciation in soils of the test places of radiological warfare agents / A.E. Kunduzbayeva, T. Mussatayeva, A. Panitskiy, R. Kenzhebayev, K. Mustafina // Book of abstracts of the 6th International Conference on «Environmental Radioactivity: Fukushima Accident-10 years of Environmental Investigations, and New New Challenges Environmental Radioactivity Studies» (ENVIRA2021) (6-10 December 2021 г.), Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, 2021. – P. 81.

Кундузбаева Асия Еркебековна

Исследование подвижности искусственных радионуклидов в почвах Семипалатинского испытательного полигона при различных условиях формирования радиоактивного загрязнения

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата биологических наук.

Специальность 1.5.1. «Радиобиология»

Типография «_____»