

На правах рукописи



ЛАРИОНОВА Наталья Владимировна

**НАКОПЛЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ
РАСТЕНИЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ БЫВШЕГО
СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

Специальность: 03.01.01 – радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Обнинск – 2013

Диссертация выполнена в Филиале «Институт радиационной безопасности и экологии» Республиканского Государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»

Научный руководитель:

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАСХН **Санжарова Наталья Ивановна**

Официальные оппоненты:

Ратников Александр Николаевич, доктор сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, ведущий научный сотрудник

Латынова Наталья Евгеньевна, кандидат биологических наук, НОУ ДПО «ЦИПК» Росатома, старший преподаватель

Ведущая организация:

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, факультет почвоведения

Защита состоится «26» декабря 2013 года в 9 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 006.068.01 при Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии по адресу: 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, к. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии.

Отзывы на автореферат просим отправлять по адресу: 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, Диссертационный совет. Факс: (48439) 6-80-66.

Автореферат разослан «25» ноября 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета, кандидат биологических наук



Шубина Ольга Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие атомной промышленности и энергетики, осложненное рядом аварийных ситуаций и катастроф, и ядерные испытания привели к глобальному загрязнению биосферы Земли и, как следствие, к увеличению общего радиоактивного фона (Израэль Ю.А., Соколовский В.Г., 1987). Для Казахстана, помимо глобальных выпадений, дополнительными источниками радиоактивного загрязнения служат участки разработки многочисленных урановых месторождений. Не последнюю роль в загрязнении территории радиоактивными веществами сыграла деятельность бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП), расположенного на пересечении трех областей Восточно-Казахстанской, Павлодарской и Карагандинской и занимающего площадь 18,5 тыс. кв. км. За время функционирования СИП (1949-1989 годы) на его территории было проведено 456 ядерных испытаний, в том числе 30 наземных, 86 воздушных и 340 подземных ядерных взрывов. Многочисленные локальные участки с высоким радиоактивным фоном на СИП имеются до настоящего времени. Ситуация осложняется неоднородным характером загрязнения, обусловленным проведением различных испытаний (ядерных испытаний (атмосферных, подземных, экскавационных), гидроядерных испытаний, испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ), испытаний на реакторных установках и, возможно, других пока неизвестных нам экспериментов), а также климатическими и природными условиями (штормовые ветра, различные геологические и гидрологические условия) (Кадыржанов К.К., 2000, 1999; Батырбеков Г.А., 1999; Казачевский И.В., 2000; Лукашенко С.Н., 2012).

Для получения полноценной картины радиоэкологической ситуации на СИП необходимы статистически достоверные данные о параметрах перераспределения радионуклидов в системе «почва-растение» с учетом видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения. С момента закрытия СИП получен большой объем информации относительно текущей радиационной обстановки на его территории. Однако данные по изучению особенностей накопления радионуклидов растениями, полученные сотрудниками Национального ядерного центра Республики Казахстан до 2007 года (Тулеубаев Б.А., 2004, Кадырова Н.Ж., 2005, Кайрамбаев С.К., 2006), в силу отсутствия на тот момент соответствующих поставленных задач, не систематичны и охватывают лишь небольшую часть территорий СИП.

Не применимы для территории СИП с его почвенно-климатическими характеристиками и специфическим радиоактивным загрязнением и данные о параметрах накопления радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr растениями, полученные учеными для других климатических зон и регионов. При этом сравнительно слабо изученным в мировой практике остается вопрос о накоплении растениями трансурановых радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am , загрязнение которыми является весьма характерным для территории СИП.

Дополнительную актуальность исследования особенностей накопления искусственных радионуклидов растениями на СИП на сегодняшний день придает проведение масштабных работ по передаче части его земель в хозяйственный оборот. В этих условиях параметры перераспределения радионуклидов в системе «почва-растение» являются неотъемлемым звеном для прогноза уровней радиоактивного загрязнения продуктов питания, и, как следствие, используются при расчете доз для населения, проживающего на территории СИП.

Цель исследования: разработка методологии и методов радиоэкологического обследования СИП с учетом видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения, получение систематической информации о параметрах перераспределения искусственных радионуклидов в системе «почва-растение» для различных участков СИП и факторах, их определяющих.

Задачи исследования:

1 - разработать методологию и методы радиоэкологического обследования СИП с учетом видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения;

2 - определить количественные параметры накопления радионуклидов растениями в зависимости от характеристик радиоактивного загрязнения, видовых особенностей растений и типа почв степных и луговых экосистем;

3 - изучить характер перераспределения и динамику содержания радионуклидов в надземной части растений для луговых экосистем;

4 - оценить подвижность радионуклидов в системе «почва-растение» в зависимости от физико-химических свойств почв и характеристик радиоактивного загрязнения;

5 - провести анализ радиоэкологической обстановки для различных участков территории СИП для обоснования возможности их передачи в хозяйственное использование.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология и методы радиоэкологического обследования СИП, учитывающие виды проведенных испытаний, механизмы формирования радиоактивного загрязнения и факторы их определяющие.

2. Параметры накопления радионуклидов в растениях в зависимости от вида проведенных испытаний, характеристик загрязнения территории, подвижности радионуклидов в почвах и видовых особенностей растений. Установлено уменьшение накопления радионуклидов растениями для эпицентров наземных испытаний, увеличение в зонах «следов» и на условно «фоновых» территориях, максимальное накопление в зонах радиоактивных водотоков и в местах испытания БРВ. Различия в Кн ^{137}Cs достигают 71 раза, Кн ^{90}Sr – 74 раз, Кн $^{239+240}\text{Pu}$ – 14 раз, Кн ^{241}Am – 11 раз.

3. Получен ряд радионуклидов по их способности к накоплению растениями из почв: $^{90}\text{Sr} > ^{137}\text{Cs} > ^{239+240}\text{Pu} > ^{241}\text{Am}$. Кн ^{90}Sr в среднем в 8 раз превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Значения Кн $^{239+240}\text{Pu}$ до 3 раз выше Кн ^{241}Am .

4. Максимальные коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr получены для растений луговых экосистем, почвенный покров которых представлен почвами с легким механическим составом. Установлено влияния содержания в почве Ca, Mg и Sr на Кн ^{90}Sr и Al, Fe на Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Видовые особенности растений луговых и степных экосистем обуславливают различия в накоплении радионуклидов от 2 до 10 раз.

Предмет и объект исследования. Предметом исследований является разработка методологии и методов, определение количественных параметров миграции радионуклидов в системе «почва-растение» для оценки радиационной обстановки на территории СИП. Объектом исследования являются почвы и доминантные виды растений степных и луговых экосистем.

Научная новизна работы. Разработана методология радиоэкологического обследования СИП с учетом проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения. Впервые для территории СИП получены системные статистически достоверные данные параметров накопления искусственных

осколочных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и трансурановых $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am доминантными растениями степных и луговых экосистем. Проведен сравнительный анализ параметров накопления искусственных радионуклидов растениями для участков СИП с различным характером радиоактивного загрязнения.

Теоретическая и практическая значимость работы: Теоретическая значимость работы обусловлена разработкой уникальной методологии радиоэкологического обследования СИП с учетом видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения. Исследованы закономерности поведения широкого спектра радионуклидов в экосистемах, выявлены факторы и оценены параметры миграции радионуклидов в системе «почва-растение». Полученные параметры накопления искусственных радионуклидов доминантными растениями степных и луговых экосистем могут быть применены для прогнозирования радиоэкологической ситуации на территории СИП и являются входными параметрами моделей, используемых для описания поведения радиоактивных веществ и оценки риска загрязнения компонентов природной среды. Материалы являются основанием для разработки как конкретных практических рекомендаций, направленных на решение проблемы радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова исследуемой территории, так и для комплекса мероприятий по снижению содержания радионуклидов в продукции, получаемой в условиях радиоактивного загрязнения. Полученные параметры накопления радионуклидов растениями используются для расчета доз облучения населения, проживающего на территории СИП, и научного обоснования возможности передачи территории СИП в хозяйственное использование (Материалы комплексного экологического обследования, 2010, 2011, 2013).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 03.01.01 «Радиобиология», охватывающей проблемы последствий ядерных катастроф и радиоэкологии (п. 9), принципы и методы радиационного мониторинга (п. 10), в диссертационном исследовании представлен сравнительный анализ радиоэкологической обстановки для различных участков СИП.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов основывается на достаточном объеме материала и применении современной измерительной базы аккредитованных лабораторий. За время исследований всего отобрано и проанализировано 734 пробы объектов луговых и степных экосистем (223 пробы почвы и 511 проб растений).

Личный вклад диссертанта в работу. Соискателем поставлена цель исследования, выполнена постановка всех натурных экспериментов, включая организацию экспедиционных работ, отбор проб окружающей среды (почва, растения) и обработку результатов их анализа, рассчитаны коэффициенты накопления, проведено обобщение и анализ полученных данных.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и региональных конференциях, конкурсах, совещаниях и конгрессах: Международная конференция «Environmental radioactivity» (Рим, 2010); Международное совещание «Technical Working Group Meeting on the environmental assessment for long term monitoring and remediation in and around Fukushima» (Tokyo, 2012); V Всемирный конгресс инжиниринга и технологий – WCET-2012 «Наука и технологии: шаг в будущее» (Алматы, 2012); IV Международная научная конференция «Современные проблемы загрязнения почв» (Москва, МГУ, 2013); IX Всероссийская (с международным

участием) научно-практическая конференция «Тобольск научный - 2012» (Тобольск, 2012); 7-я, 8-я и 9-я Международные конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, 2009, 2011, 2013); Международная конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии» (Алматы, 2012); III-я, IV-я и V-я Международные научно-практические конференции «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и проблемы нераспространения» (Курчатов, 2008, 2010, 2012); Конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК (Курчатов, 2005, 2008, 2010, 2011, 2012).

Результаты исследования были включены в отчёты при выполнении работ по следующим программам: научно-техническая программа 0346 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан», республиканская бюджетная программа «Обеспечение радиационной безопасности на территории РК» (мероприятие 1 «Обеспечение безопасности бывшего СИП») и др.

По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе две статьи в рецензируемых журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 169 страницах, включает введение, 6 глав, выводы, 40 таблиц, 53 рисунка и список публикаций из 160 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, ставятся цель и задачи, обсуждается их научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

На основе анализа отечественной и зарубежной литературы рассмотрено загрязнение почвенно-растительного покрова, произошедшего, как вследствие нормальной, так и штатной работы атомно-энергетических объектов (радиационные аварии на Южном Урале, Чернобыльской АЭС, на АЭС «Фукусима-1» в Японии). Описан механизм поступления радионуклидов в растения и основные факторы, влияющие на него.

ГЛАВА II. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ СИП

Дана природно-климатическая характеристика территории СИП, включающая климат, рельеф, гидрогеологические условия, гидрографию, почвенные покров и растительный покров. Показан характер радиоактивного загрязнения отдельных территорий СИП: испытательных площадок «Дегелен» (штольни № 176 и № 177) и «Опытное поле», зоны радиоактивных выпадений при прохождении радиоактивного облака («след» от взрыва 1953 года), условно «фоновых» территорий СИП, а также площадка испытания БРВ (площадка «4а»).

ГЛАВА III. МЕТОДОЛОГИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология радиоэкологического обследования СИП основывается на учете видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения. Методологический подход включает выделение участков загрязнения, сформировавшихся в результате наземных испытаний, радиоактивных выпадений (ближних, дальних), выноса радионуклидов с водотоками из штолен и проведения испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ). При комплексном обследовании территории СИП на единой методической базе определяются радионуклидный состав загрязнения, основные физико-химические свойства почв, показатели подвижности радионуклидов в почвах, видовой состав луговой и степной растительности,

количественные параметры миграции.

Исследуемые участки: зоны радиоактивных водотоков (площадка «Дегелен»); эпицентры наземных испытаний (площадка «Опытное поле»); «следы» радиоактивных выпадений (площадка «Опытное поле» и «след» от взрыва 1953 года (р-н месторождения «Байтемир» и «юго-восточной» части СИП)); условно «фоновые» территории («северная», «западная» и «юго-восточная» части СИП; р-н месторождения «Коскудук»); места испытаний БРВ (площадка «4а») (рис. 1).

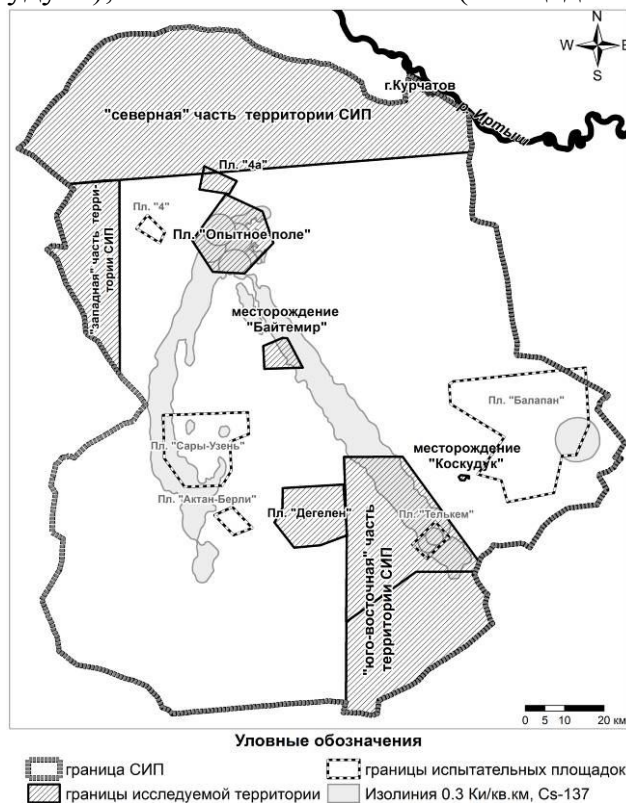


Рис. 1. Схема расположения исследуемых территорий

Отбор проб растений в основном производился по видовому составу (площадь отбора не превышала 2 кв. м). Для оценки параметров накопления радионуклидов сопряжено с растениями отбирались смешанные пробы почвы (методом конверта). Глубина отбора проб почвы определялась миграционной способностью радионуклидов по почвенному профилю и для степных экосистем составляла 5 см, а для луговых – 20 см.

Механический состав почвы определялся пипет-методом, устанавливающим количественное соотношение почвенных фракций в процентах. Определение содержания в почве гумуса проводилось по методу Тюрина в модификации Никитина. Карбонатность определялась объемным методом по Голубеву, основанном на измерении добавочного давления в кальциметре (Дюсенбеков З.Д., 1998). Измерение кислотности почвы проводилось методом, основанным на измерении величины рН водной вытяжки пород электродной системой (Метод определения рН водной вытяжки вскрышных и вмещающих пород, 1985). Элементный анализ на содержание Na, K, Ca, Mg, Fe, Al и Cs и Sr в пробах почв проводился методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Использовались следующие приборы: квадрупольный масс-спектрометр Elan 9000 фирмы «Perkin Elmer SCIEX» и оптический атомно-эмиссионный спектрометр iCAP 6300 Duo фирмы Thermo Scientific.

Формы нахождения исследуемых элементов и радионуклидов в почве определяли

методом последовательного выщелачивания и определением их содержания в полученных вытяжках (Минеева В.Г., 2001). Наиболее доступные растениям формы радионуклидов извлекали водой (водорастворимая форма) и 1М раствором уксуснокислого аммония (обменная форма).

Определение удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am проводилось на гамма-спектрометре Canberra GX-2020. Радионуклид ^{90}Sr определяли методом радиохимического выделения, высокие концентраций ^{90}Sr определяли на бета-спектрометре «Прогресс». Радионуклид $^{239+240}\text{Pu}$ определяли радиохимическим выделением с последующим измерением на альфа-спектрометре Canberra, мод.7401. Концентрация ^{137}Cs в растениях определялась в сухих (предварительно вымытых) измельченных образцах, ^{241}Am , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество. Предел обнаружения по ^{137}Cs составлял 1 Бк/кг (для проб растений) и 4 Бк/кг (для проб почвы), ^{241}Am – 0,3 Бк/кг и 1 Бк/кг, $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,1 Бк/кг и 1 Бк/кг соответственно, ^{90}Sr – 1 Бк/кг и 5 Бк/кг (до 200 Бк/кг на «Прогрессе»). Погрешность измерений для ^{137}Cs и ^{241}Am в основном не превышала 10-20 %, ^{90}Sr – 15-25 %, $^{239+240}\text{Pu}$ – 30%.

Для количественной оценки поступления радионуклидов из почвы в растения использовался коэффициент накопления (Кн) – отношение содержания радионуклида в единице массы растений и почвы соответственно. Полученные результаты обработаны с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel 2007.

ГЛАВА IV. РАДИОНУКЛИДЫ В РАСТЕНИЯХ ЛУГОВОГО БИОГЕОЦЕНОЗА В РАЙОНЕ ВОДОТОКОВ ШТОЛЕН НА ПЛОЩАДКЕ «ДЕГЕЛЕН»

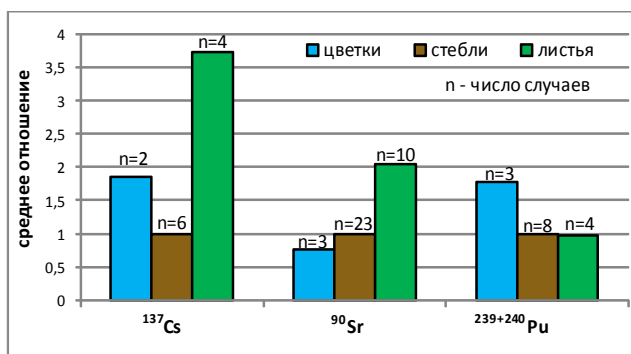
Исследования на площадке «Дегелен» (рис. 1) проводились на примере луговой экосистемы в районе водотоков штолен 176 и 177.

4.1 Изучение характера перераспределения и динамики содержания радионуклидов в надземной части растений

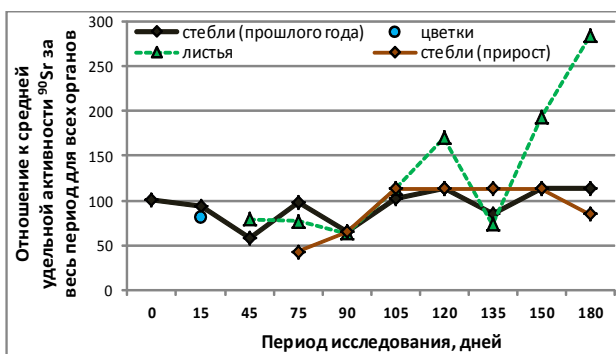
Для изучения характера перераспределения и динамики содержания радионуклидов в надземной части растений в районе поверхностного радиоактивно-загрязненного водотока штольни № 177 заложены 3 мониторинговые площадки. На каждой площадке в течение всего вегетационного сезона (с апреля по октябрь) производился периодический отбор (каждые 15 дней) проб отдельных органов (генеративных (цветки) и вегетативных (листья и стебли, в т.ч. стебли прошлого года и прирост)) кустарника – ивы (*Salix triandra*). Во всех пробах определялась удельная активность радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$.

На гистограмме (рис. 2а) показано усредненное отношение содержания радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в вегетативных (стеблях и листьях) и генеративных (цветках) органах ивы (*Salix triandra*) по данным с трех мониторинговых площадок за весь период исследования, нормированное на концентрацию в стеблях. Значения удельной активности ^{241}Am в растениях оказались ниже предела обнаружения.

Концентрация радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в генеративных органах (цветках) в целом ниже, чем в вегетативных (листьях и стеблях), хотя содержание ^{137}Cs в цветках превышает его содержание в стеблях, при этом основное содержание обоих радионуклидов отмечается в листьях. Значимые величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ чаще всего встречаются именно в цветках (1,4-2,3 Бк/кг) и сравнительно меньшие – в вегетативных органах (0,6-1,8 Бк/кг).



а



б

Рис.2. Среднее отношение содержания радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в различных органах ивы (*Salix triandra*) (а); динамика содержания ^{90}Sr в иве (*Salix triandra*) (б)

Динамика содержания радионуклидов в отдельных органах ивы (*Salix triandra*) в течение вегетационного периода, показанная на графике (рис. 2б), представлена только для одной мониторинговой площадки и только для радионуклида ^{90}Sr из-за отсутствия достаточного количества значимых величин активностей ^{137}Cs , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$. Определенная тенденция роста концентрации радионуклида ^{90}Sr в иве (*Salix triandra*) прослеживается для листьев и стеблей прироста, при этом значения удельной активности ^{90}Sr в стеблях прошлого года в среднем варьируют в пределах погрешности. В целом, динамика содержания ^{90}Sr в рассмотренных вегетативных органах ивы (*Salix triandra*) имеет достаточно сложный характер, что может быть связано как с условиями произрастания (непосредственно в радиоактивно-загрязненном водотоке), так и с физиологическими особенностями исследуемого растения.

Дополнительные исследования динамики содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в надземной части растений в течение вегетационного периода в зависимости от основных фаз вегетации проводились для отдельных видов естественных луговых трав в районе штольни № 176. Для этого на 6 мониторинговых площадках производился периодический (через каждые 15 дней) отбор проб надземной части растений (волоснец (*Leymus angustus*) и пижмы (*Tanacetum vulgare*)). Динамика средних значений удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr для каждого вида представлена в виде графиков (рис. 3).

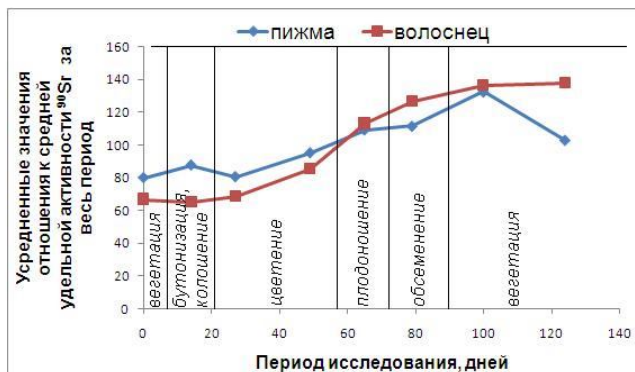
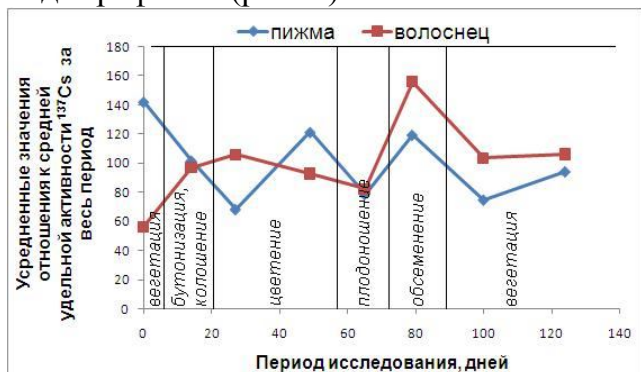


Рис. 3. Динамика средних величин удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в исследуемых растениях в зависимости от основных фаз вегетации

На основании полученных результатов можно сказать, что динамика содержания радионуклида ^{137}Cs для разных видов исследуемых растений не одинакова и носит несколько хаотичный характер. Более равномерное накопление в течение всего вегетационного периода можно наблюдать для радионуклида ^{90}Sr . Анализ

полученных данных показывает, что его содержание в исследуемых видах растений резко увеличивается с началом цветения и возрастает на протяжении всего вегетационного периода. Максимальное накопление радионуклида ^{90}Sr , также как и ^{137}Cs , приходится на обсеменение, а также на осеннюю фазу вегетации.

4.2 Выявление количественных параметров переноса радионуклидов из почвы в надземную часть растений

Для установления статистически достоверных значений Кн для отдельных видов растений луговых экосистем в местах радиоактивного загрязнения вдоль водотоков штолен №176 и №177 заложено соответственно 30 и 36 исследовательских площадок, на которых сопряженно производился отбор проб почвы и надземной части растений. В качестве опытных видов растений в районе штольни №176 выбраны пижма (*Tanacetum vulgare*), шиповник (*Rosa spinosissima*) и волоснец (*Leymus angustus*), в районе штольни №177 – пижма (*Tanacetum vulgare*), иван-чай (*Chamaenerium angustifolium*) и бодяк (*Cirsium arvense*).

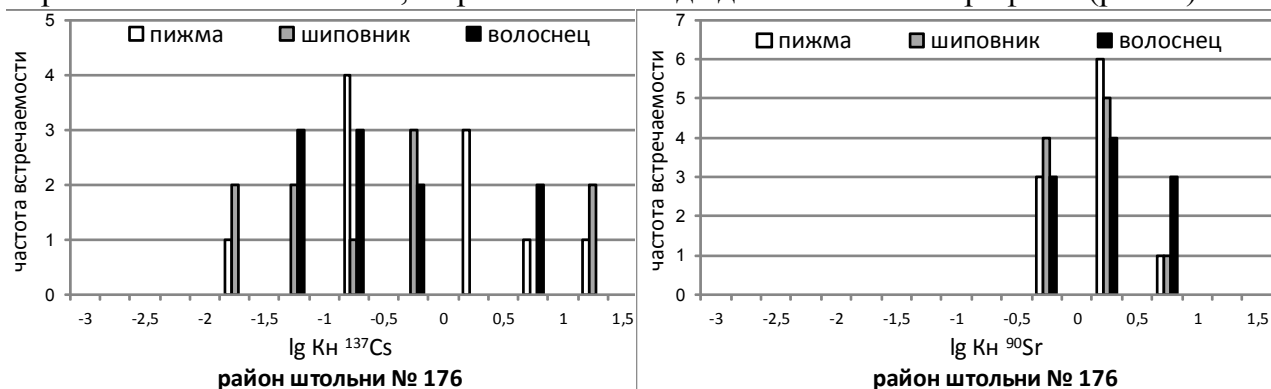
В пробах, отобранных в районе штольни №176, определялась удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , в районе штольни №177 – ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am . Данные содержания радионуклидов в исследуемых видах растений и почвах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в исследуемых растениях и почвах в районе штолен №176 и №177

Объект исследования	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг							
	^{137}Cs		^{90}Sr		$^{239+240}\text{Pu}$		^{241}Am	
	Min	max	min	max	min	max	min	max
район штольни №176								
пижма	$(0,12 \pm 0,02) \cdot 10^3$	$(8,7 \pm 0,1) \cdot 10^4$	$(12 \pm 2) \cdot 10^3$	$(2,5 \pm 0,3) \cdot 10^4$	-	-	-	-
шиповник	$(0,03 \pm 0,01) \cdot 10^3$	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^4$	$(4,4 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(2,7 \pm 0,4) \cdot 10^4$	-	-	-	-
волоснец	$(0,03 \pm 0,01) \cdot 10^3$	$(5,4 \pm 0,1) \cdot 10^4$	$(3,9 \pm 0,8) \cdot 10^3$	$(2,1 \pm 0,3) \cdot 10^4$	-	-	-	-
почва	$(0,03 \pm 0,01) \cdot 10^3$	$(45,2 \pm 0,1) \cdot 10^4$	$(0,6 \pm 0,2) \cdot 10^3$	$(3,3 \pm 0,4) \cdot 10^4$	-	-	-	-
район штольни №177								
пижма	-**	101 ± 3	$(30 \pm 4) \cdot 10^3$	$(85 \pm 10) \cdot 10^3$	$0,9 \pm 0,2$	57 ± 1	-*	-*
иван-чай	-**	38 ± 4	$(7 \pm 1) \cdot 10^3$	$(150 \pm 20) \cdot 10^3$	-*	35 ± 5	-*	2 ± 1
бодяк	-**	540 ± 4	$(100 \pm 10) \cdot 10^3$	$(320 \pm 40) \cdot 10^3$	-*	90 ± 10	-*	4 ± 1
почва	16 ± 3	11300 ± 100	$(1,8 \pm 0,4) \cdot 10^3$	$(130 \pm 15) \cdot 10^3$	$(2,9 \pm 0,04) \cdot 10^3$	$(12,2 \pm 0,1) \cdot 10^3$	-*	580 ± 10
Примечание: * - ниже предела обнаружения: ^{137}Cs - $<0,1$; ^{241}Am - $<0,3$								

Уровень радиоактивного загрязнения как почв, так и растений выбранных исследовательских площадок варьирует в довольно широком диапазоне. Значения удельной активности ^{241}Am в растениях минимальны и зачастую количественно не определены.

Сравнительное распределение Кн радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr исследуемыми видами растений в районе обеих штолен представлено в виде гистограмм частоты встречаемости их значений, выраженных в виде десятичных логарифмов (рис. 4).



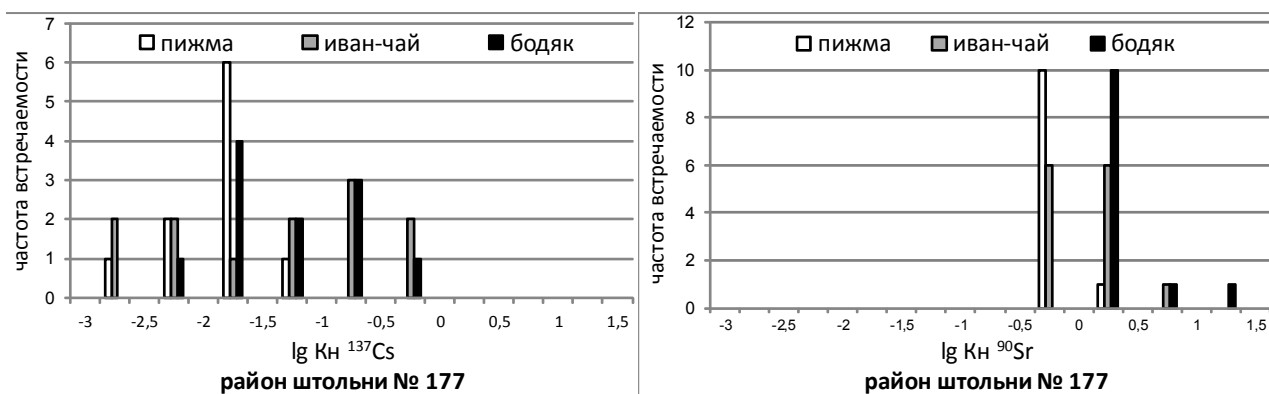


Рис. 4. Распределение значений $\lg K_d$ ^{137}Cs и ^{90}Sr исследуемыми растениями в районе штолен № 176 и № 177

Различия в распределении значений K_d видны как для отдельных видов растений, так и для разных радионуклидов, причем более резко выражены для ^{137}Cs , чем для ^{90}Sr . Так, в районе штольни № 176 для волоснеца диапазон значений K_d ^{137}Cs меньше (два порядка), чем для пижмы и шиповника (по три порядка), а в районе штольни № 177 диапазон значений K_d ^{137}Cs меньше для пижмы (один порядок), чем для бодяка (два порядка) и иван-чая (три порядка). Средние же значения K_d ^{90}Sr , в отличие от ^{137}Cs , в целом смещены в сторону больших величин, следовательно, в большей степени в растениях накапливается именно ^{90}Sr . Определенное исключение составляют данные для пижмы в районе штольни № 177, средние значения K_d ^{90}Sr которой не превышают единицы. Также необходимо отметить, что определенный сдвиг значений K_d ^{137}Cs в сторону меньших величин прослеживается для всех исследуемых растений в районе штольни № 177.

Видовые особенности растений обуславливают различия в накоплении радионуклида ^{137}Cs от 2 до 10 раз, ^{90}Sr – от 2 до 6 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ – в 2 раза.

Учитывая все полученные данные (в том числе результаты дополнительных исследований в районе штольни № 176, приведенные в диссертации), выполнено обобщение параметров накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ растениями луговых экосистем в районе водотоков штолен на площадке «Дегелен». В таблице 2 представлены некоторые статистические показатели K_d данных радионуклидов.

Таблица 2. Статистические показатели K_d ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для растений луговых экосистем в районе радиоактивных водотоков штолен на площадке «Дегелен»

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
^{137}Cs	134	0,0014 – 16	0,20	7,3	1,07	2,4
^{90}Sr	137	0,10 – 29	1,7	2,1	2,3	2,8
$^{239+240}\text{Pu}$	32	0,00016 – 0,13	0,0059	5,9	0,021	0,034

Как видно из представленной таблицы, параметры накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для исследуемой территории характеризуются большими диапазонами значений K_d данных радионуклидов. Прежде всего, это может быть обусловлено состоянием самих радионуклидов, формы нахождения которых напрямую зависят от характера их поступления в экосистему водотоков штолен и их дальнейшего взаимодействия со всеми ее компонентами. Учитывая постоянный вынос водорастворимых форм радионуклидов водотоками из штолен, на исследуемой территории имеют место два механизма поступления радионуклидов в растения лугового биогеоценоза: из почвы и из раствора. Накопление всех исследуемых радионуклидов изменяется в следующем ряду убывания: K_d ^{90}Sr > K_d ^{137}Cs > K_d

4.3 Оценка влияния некоторых физико-химических свойств почв на накопление радионуклидов растениями

Возможность причинно-следственной связи между параметрами накопления радионуклидов растениями, т.е. Кн, и некоторыми физико-химическими свойствами луговых почв рассмотрена при обобщении результатов по штольням № 176 или № 177 для одного вида растений (пижмы (*Tanacetum vulgare*)) (рис. 5).

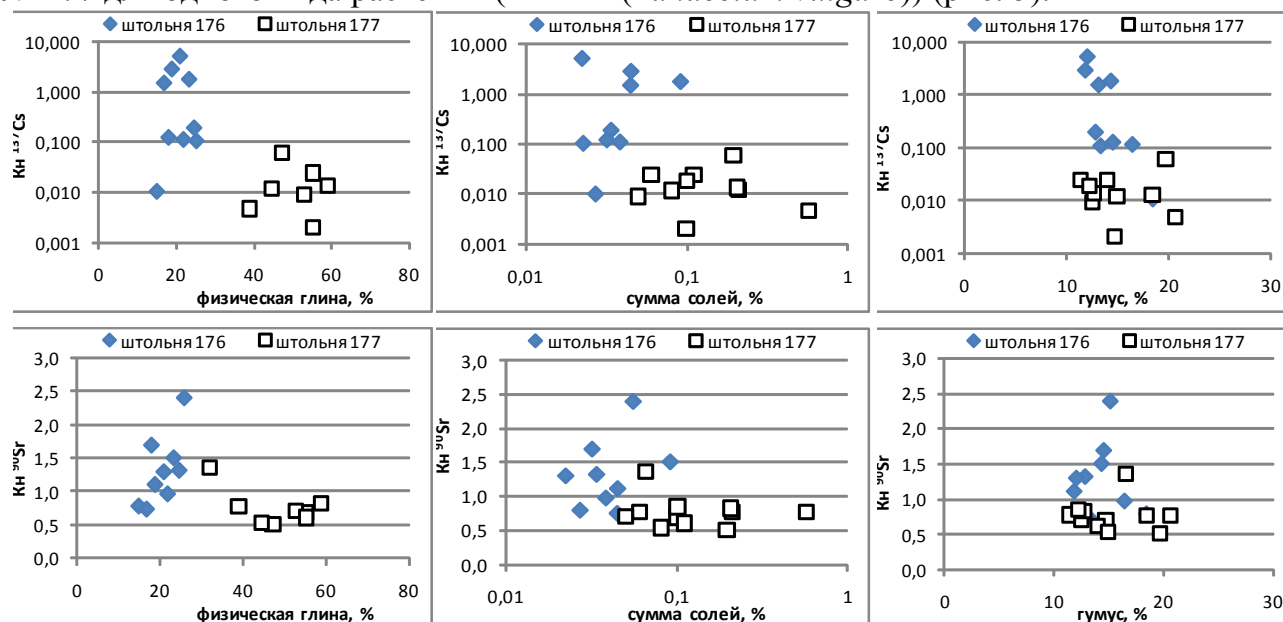


Рис. 5. Зависимость Кн от некоторых физико-химических свойств луговых почв (для пижмы)

Представленные графики отражают как разницу в значениях Кн, так и разницу в физико-химических свойствах почв для обеих штолен. Так, почвы в районе штольни № 176 характеризуются более легким механическим составом и лучше промыты от водорастворимых солей, чем почвы в районе штольни № 177, при этом содержание гумуса в районе обеих штолен относительно одинаковое, а Кн как ^{137}Cs , так и ^{90}Sr для пижмы в районе штольни № 176 выше, чем в районе штольни № 177. Таким образом, можно предположить, что сравнительно меньшее накопление радионуклидов растениями в районе штольни № 177 может быть связано именно с более тяжелым механическим составом и повышенным содержанием солей в почвах в районе этой штольни.

4.4 Оценка влияния форм нахождения радионуклидов в почве на их накопление растениями

Некоторая прямая зависимость была установлена между Кн ^{137}Cs и обменной формой содержания данного радионуклида в почвах, а также для всех исследуемых видов растений между Кн ^{90}Sr и его водорастворимой формой содержания в почвах в районе штольни № 176, и обменной – в районе штольни № 177. Сравнительный анализ проведен для пижмы (*Tanacetum vulgare*) в районах штолен № 176 и № 177 (рис. 6).

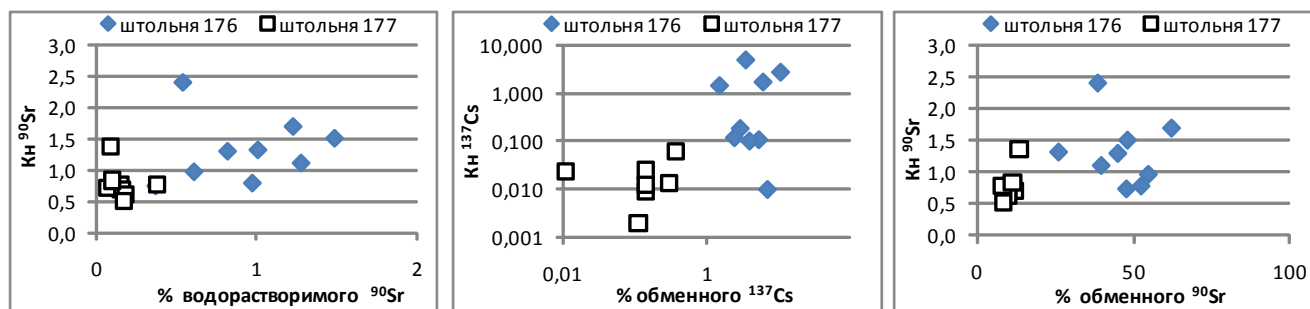


Рис. 6. Зависимость K_n от форм нахождения радионуклидов (для пижмы)

Полученные зависимости также в целом подтверждают определенное влияние более высокого содержания в почвах наиболее доступных растениям форм радионуклидов (водорастворимой и обменной) на повышение уровня их накопления растениями, в частности, пижмой в районе штольни № 176.

4.5 Оценка влияния некоторых макроэлементов и стабильных изотопов на накопление радионуклидов растениями

Зависимости накопления радионуклида ^{137}Cs растениями от содержания в почвах его элементов аналогов (K, Na) и стабильного изотопа Cs не установлено. Некоторая обратная взаимосвязь накопления наблюдается для радионуклида ^{90}Sr от содержания в почвах в районе штолен № 176 и № 177 водорастворимых и обменных форм элементов-аналогов Ca и Mg и его стабильного изотопа Sr (рис. 7).

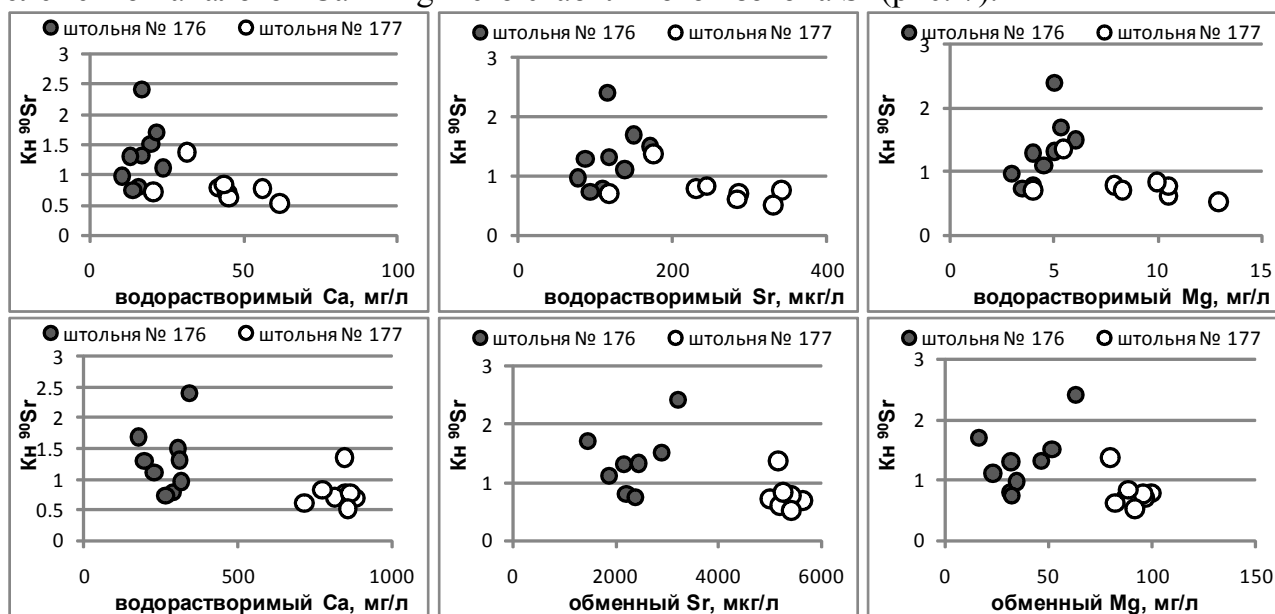


Рис.7. Зависимость K_n ^{90}Sr от содержания в почвах в районах штолен № 176 и № 177 водорастворимых и обменных форм некоторых элементов и стабильных изотопов

Влияние элементов K, Na, Ca и Mg на накопление $^{239+240}\text{Pu}$ растениями отсутствует. Некоторая обратная связь просматривается лишь для Fe и Al, что может быть связано с сорбцией $^{239+240}\text{Pu}$ гидроксидами этих металлов.

4.6 Исследование зависимости накопления ^{137}Cs растениями от содержания в почве его стабильного изотопа

В районе штольни № 176 проведен натурный эксперимент в естественных условиях по исследованию зависимости накопления ^{137}Cs растениями от содержания в почве его стабильного изотопа. Полученные данные показали отсутствие влияния внесенного стабильного Cs на накопление растениями ^{137}Cs в условиях проведенного эксперимента.

ГЛАВА V. НАКОПЛЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СИП

5.1 Количественные параметры переноса радионуклидов из почвы в надземную часть растений на площадке «Опытное поле»

Для выявления количественных параметров переноса радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am из почвы в надземную часть растений степных экосистем в местах проведения наземных испытаний было заложено 32 исследовательские площадки на 12-ти выявленных эпицентрах на площадке «Опытное поле» (по 2-4 площадки на каждом эпицентре) (рисунок 1). На основании данных загрязнения почв трансурановыми радионуклидами, в том числе ^{241}Am , на «Опытном поле» дополнительно было заложено 10 исследовательских на радиоактивно-загрязненных участках между эпицентрами – в местах ближних выпадений от наземных испытаний. С каждой площадки сопряженно отобраны надземные части исследуемых видов растений ковыль (*Stipa capillata*), типчак (*Festuca alesiaca*) и полынь (*Artemisia sublessingiana*, *A. marschalliana*) и смешанная проба почвы. Во всех пробах определена удельная активность радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ (таб. 3).

Таблица 3. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в исследуемых растениях и почвах степных экосистем на «Опытном поле»

Объект исследования	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг							
	^{137}Cs		^{90}Sr		$^{239+240}\text{Pu}$		^{241}Am	
	min	max	min	max	min	Max	min	max
эпицентры наземных испытаний								
ковыль	2,1±0,2	103±1	9,4±1,1	1970±10	1,8±0,1	9500±300	0,26±0,07	530±1
типчак	0,87±0,4	33±1	5,4±0,6	260±20	2,4±0,1	120±4	0,36±0,09	14,1±0,3
полынь	0,48±0,1	43±1	3,1±1,6	2090±10	1,8±0,1	1600±100	0,18±0,07	198±2
почва	340±30	9000±1000	560±240	29000±3800	900±100	1300000±80000	700±70	101600±10000
зона ближних выпадений								
ковыль	0,82±0,3	31±1	5,4±0,6	72±6	2,3±0,1	35±1	0,39±0,20	2,5±0,3
типчак	1,5±0,7	6,8±0,9	8,1±2,7	26±4	1,1±0,1	18±1	0,4±0,2	2,2±0,3
полынь	2,5±0,3	22±4	7,3±0,9	180±30	2,9±0,1	4800±200	0,21±0,11	94±1
почва	18±1	860±10	300±120	2600±500	105±15	41000±3000	49±2	1460±10

Распределение значений K_n ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ между различными видами растений в эпицентрах проведения наземных испытаний и между ними представлены в виде гистограмм частоты встречаемости $\lg K_n$ данных радионуклидов (рис. 8).

В целом значения K_n ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для участков, расположенных в зонах ближних выпадений, сдвинуты в сторону больших величин. Наибольший диапазон значений K_n в эпицентрах проведения наземных испытаний отмечается для полыни (*Artemisia sublessingiana*), в зонах ближних выпадений – для ковыля (*Stipa capillata*).

Видовые особенности растений обуславливают различия в накоплении радионуклида ^{137}Cs от 2 до 4 раз, ^{241}Am – от 2 до 5 раз, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – в 3 раза.

Определенные различия в накоплении радионуклидов растениями отмечаются на отдельных эпицентрах. На рис. 9 представлены средние значения K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr для растения ковыль (*Stipa capillata*).

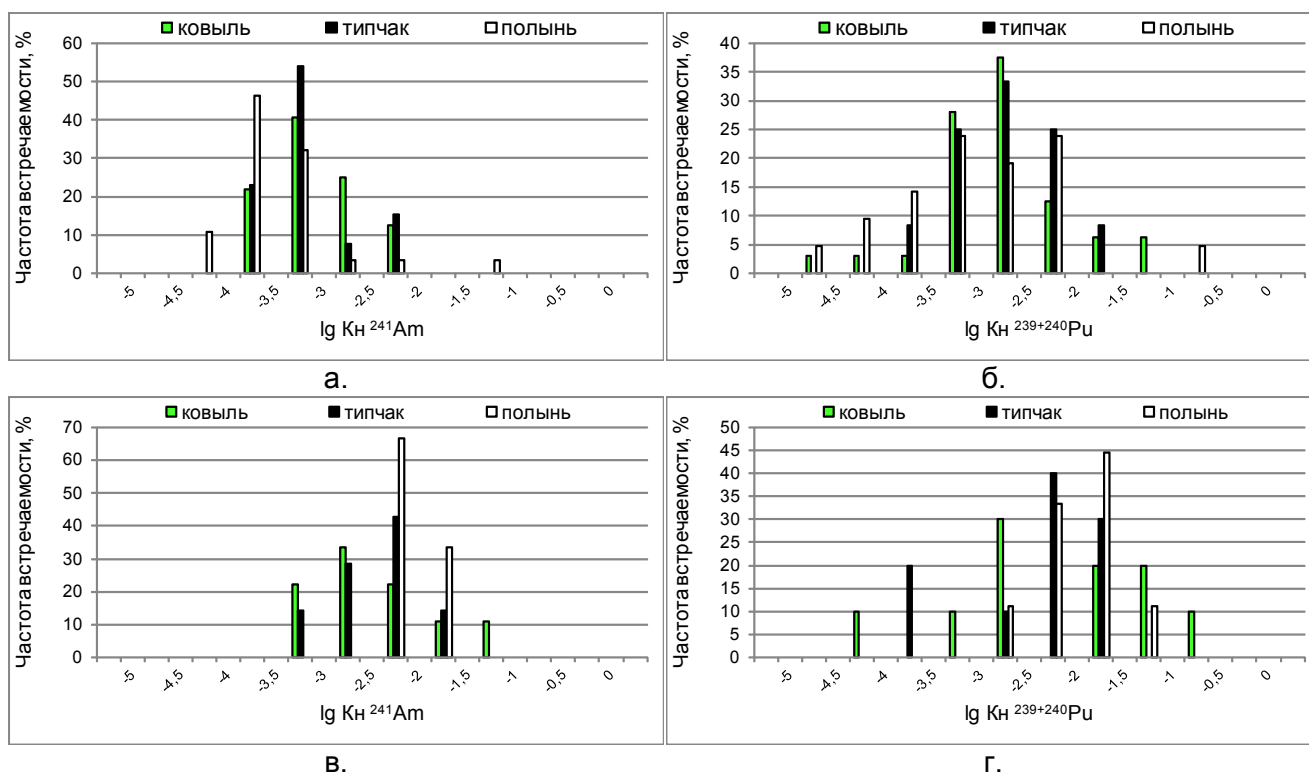


Рис. 8. Распределение значений $\lg K_n^{241}\text{Am}$ и $^{239+240}\text{Pu}$ для исследуемых видов растений в эпицентрах (а, б) и между ними (в, г)

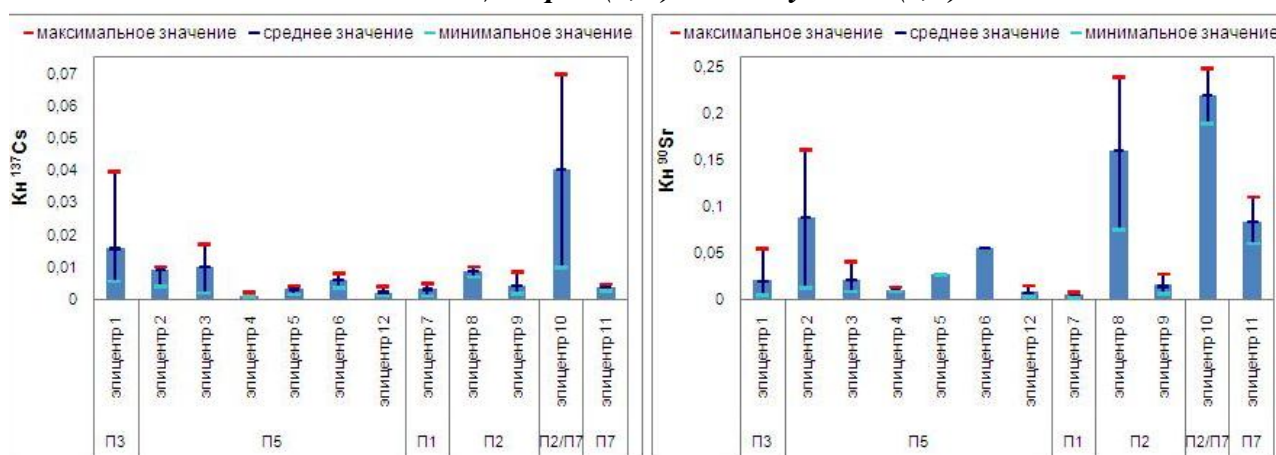


Рис. 9. Средние значения $K_n^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr для каждого из исследуемых эпицентров (для растения ковыль (*Stipa capillata*))

Явное смещение значений K_n в сторону больших величин отмечается для радионуклида ^{90}Sr на 8-м, 10-м и 11-м эпицентрах и ^{137}Cs – на 10-м эпицентре.

Для того, чтобы в целом рассмотреть особенности накопления радионуклидов степными растениями в местах проведения наземных ядерных испытаний на «Опытном поле» проведем обобщение всех полученных данных. В таблице 4 представлены некоторые статистические показатели $K_n^{137}\text{Cs}$, ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$.

Как видно из представленной таблицы, параметры накопления радионуклидов для исследуемой территории характеризуются большими диапазонами значений K_n , которые для ^{137}Cs составляют 2 порядка, для ^{90}Sr – 3 порядка, а для радионуклидов трансуранового ряда (^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$) достигают 4-х порядков.

Таблица 4. Статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для растений степных экосистем на площадке «Опытное поле»

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
Эпицентры						
^{137}Cs	72	0,00023 – 0,07	0,0028	3,6	0,0061	0,01
^{90}Sr	67	0,002 – 1,1	0,023	3,6	0,065	0,16
^{241}Am	73	0,000004 – 0,064	0,00052	3,8	0,0019	0,0075
$^{239+240}\text{Pu}$	66	0,000011 – 0,13	0,0014	5,6	0,0060	0,018
участки между эпицентрами						
^{137}Cs	30	0,0029 – 0,30	0,020	3,1	0,042	0,068
^{90}Sr	24	0,0038 – 0,18	0,026	2,7	0,040	0,041
^{241}Am	23	0,00050 – 0,42	0,0056	4,2	0,025	0,086
$^{239+240}\text{Pu}$	29	0,000090 – 0,27	0,0068	6,6	0,024	0,051
n – число случаев; GM – ср. геом. (GSD – станд. откл.), AM – ср. ариф. (SD – станд. откл.)						

Несмотря на высокую вариабельность, значимая разница в накоплении радионуклидов отмечается для отдельных участков площадки «Опытное поле» – сравнительно более низкие значения Кн ^{137}Cs , а также ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ отмечаются в эпицентрах проведения наземных испытаний, тогда как более высокие в зонах ближних выпадений. Более равномерное накопление наблюдается для радионуклида ^{90}Sr , что может быть связано с его большей подвижностью в системе «почва-растение». Однако, исходя из полученных данных, в целом на территории «Опытного поля» можно выделить 2 территории с принципиально разными типами радиоактивного загрязнения: эпицентры непосредственного проведения наземных испытаний и участки так называемых «следов» ближних выпадений, расположенных между ними. Накопление всех исследуемых радионуклидов изменяется в следующем ряду убывания:

$$\text{Кн } ^{90}\text{Sr} > \text{Кн } ^{137}\text{Cs} > \text{Кн } ^{239+240}\text{Pu} > \text{Кн } ^{241}\text{Am}$$

5.2 Особенности поступления радионуклидов из почвы в растения в зонах радиоактивных выпадений при прохождении радиоактивного облака («след» от взрыва 1953 года)

В разделе 5.2 рассмотрено распределение значений Кн радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в зависимости от расстояния по оси «следа» от эпицентра взрыва 1953 года, произведенного на площадке П-1. Выявлено, что по мере удаления по «следу» от эпицентра проведения испытания увеличиваются и значения Кн радионуклидов, что говорит о повышении биологической доступности радионуклидов в почвах. Минимальные значения Кн ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am наблюдаются в районе непосредственного эпицентра проведения наземного термоядерного испытания, а максимальные – на расстоянии более 100 км по «следу» от него (рис. 10).

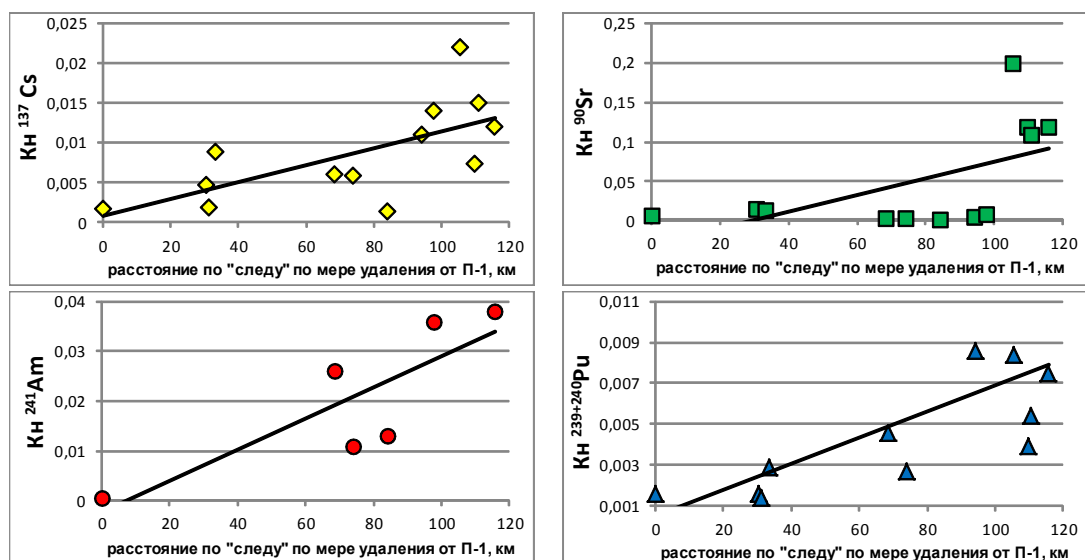


Рис. 10. Распределение значений Кн радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am по оси «следа» по мере удаления от эпицентра взрыва

5.3 Переход радионуклидов из почвы в растения на условно «фоновых» территориях СИП

На большей части территорий СИП не проводилось каких-либо ядерных испытаний, но их загрязнение, помимо глобальных выпадений может быть обусловлено выпадениями от наземных испытаний, проведенных на площадке «Опытное поле». Для оценки параметров перехода радионуклидов из почвы в растения на таких условно «фоновых» территориях СИП («северная», «западная», «юго-восточная» части СИП, а также район месторождения «Коскудук» (рисунок 1)) на участках со сравнительно повышенными значениями удельной активности радионуклидов в почве заложено 52 исследовательские площадки. На каждой площадке сопряжено произведен отбор проб почвы и степного разнотравья (табл. 5).

Таблица 5. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в исследуемых растениях и почвах на условно «фоновых» территориях

Объект исследования	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг							
	^{137}Cs		^{90}Sr		$^{239+240}\text{Pu}$		^{241}Am	
	min	max	min	max	Min	max	min	max
растения	0,21±0,08	7,9±0,2	0,92±0,29	30±6	0,059±0,016	2,5±1,3	*-	*-
почва	4,5±0,2	110±2	1,0±0,3	204±8	1,2±0,4	190±6	*-	17±4

Примечание: * - ниже предела обнаружения: ^{241}Am - <0,3 (для растений), <1 (для почвы)

В таблице 6 представлены некоторые статистические показатели Кн радионуклидов.

Таблица 6. Статистические показатели Кн ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для растений степных экосистем на условно «фоновых» территориях СИП

Радионуклиды	n	min – max	GM	GSD	AM	SD
^{137}Cs	39	0,003 – 0,3	0,030	3,2	0,057	0,073
^{90}Sr	18	0,0079 – 1,73	0,25	4,1	0,45	0,42
$^{239+240}\text{Pu}$	32	0,00075 – 0,21	0,019	3,4	0,036	0,044

n – число случаев; GM – ср. геом. (GSD – станд. откл.), AM – ср. ариф. (SD – станд. откл.)

Параметры накопления радионуклидов для исследуемой территории, по сравнению с участками водотоков штолен площадки «Дегелен» и «Опытным полем», характеризуются меньшими диапазонами значений Кн, которые для ^{137}Cs составляют 2 порядка, а для ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – по 3 порядка. Более равномерное накопление может объясняться более однородным характером радиоактивного загрязнения исследуемой

территории. В этих условиях разница в накоплении радионуклидов растениями, прежде всего, будет зависеть от физико-химических свойств почв и биологических особенностей самих растений. Накопление радионуклидов изменяется в следующем ряду убывания: $\text{Кн } ^{90}\text{Sr} > \text{Кн } ^{137}\text{Cs} > \text{Кн } ^{239+240}\text{Pu}$.

5.4 Параметры накопления радионуклидов степными растениями на площадке проведения испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ)

Кроме ядерных взрывов на территории СИП были проведены наземные испытания радиологического оружия, снаряженного боевыми радиоактивными веществами (БРВ), на площадке «4а» (рисунок 1). Для оценки параметров накопления радионуклидов в местах испытания БРВ на участках радиоактивного загрязнения заложено 10 исследовательских площадок. На каждой площадке произведен сопряженный отбор проб растений по видовому составу (ковыль (*Stipa capillata*), типчак (*Festuca valesiaca*) и полынь (*Artemisia sublessingiana*)) и смешанных образцов почв. Из-за высоких концентраций радионуклида ^{90}Sr возникли сложности с определением удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am , предел обнаружения которых оказался существенно завышенным (табл. 7).

Таблица 7. Диапазоны значений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в исследуемых растениях и почвах в районе испытаний БРВ

Объект исследования	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг					
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{241}Am	
	min	max	min	Max	min	max
ковыль	*-	280±60	$7,9 \cdot 10^3 \pm 1,2 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^5 \pm 0,4 \cdot 10^5$	*-	*-
типчак	*-	270±70	$1,9 \cdot 10^4 \pm 0,3 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^5 \pm 0,6 \cdot 10^5$	*-	*-
полынь	*-	550±110	$5,6 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^6 \pm 0,2 \cdot 10^6$	*-	*-
почва	7±1	10600±2100	$3,6 \cdot 10^4 \pm 0,4 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^5 \pm 0,3 \cdot 10^5$	*-	160±30
Примечание: * - ниже предела обнаружения: ^{137}Cs - <10-50; ^{241}Am - <4-40 (для растений), <7-20 (для почвы)						

Значения $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$ (от 0,15 до 6,3, GM – 1,2 (GSD – 2,4), AM – 1,7 (SD – 1,4)), в большинстве случаев превышающие единицу, в границах исследуемой территории до 2-х порядков выше, чем имеющиеся количественные значения $\text{Кн } ^{137}\text{Cs}$ (от 0,025 до 0,052).. Определенная разница отмечается в накоплении радионуклидов разными видами растений – $\text{Кн } ^{137}\text{Cs}$ и $\text{Кн } ^{90}\text{Sr}$ для полыни в среднем в 2-3 раза выше, чем для ковыля и типчака.

5.5 Изучение и оценка влияния некоторых физико-химических свойств почв на накопление радионуклидов растениями на площадке «Опытное поле»

Проведенные исследования показали отсутствие влияния кислотности, содержания в почве гумуса и физической глины на накопление радионуклидов ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ для растения ковыль (*Stipa capillata*) в эпицентрах проведения наземных испытаний.

5.6 Исследование зависимости накопления ^{137}Cs растениями от содержания в почве его стабильного изотопа

На данном этапе исследований явных различий в накоплении ^{137}Cs степными видами растений в зависимости от количества внесенного стабильного цезия (CsNO_3) не выявлено.

ГЛАВА VI. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ РАСТЕНИЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ СИП

6.1 Сравнительный анализ параметров накопления радионуклидов растениями для различных участков СИП

Для оценки параметров накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am растениями для различных участков СИП проведен сравнительный анализ полученных коэффициентов накопления (K_n) для эпицентров проведения наземных испытаний, «следов» радиоактивных выпадений, условно «фоновых» территорий и зон радиоактивных водотоков. Дополнительно рассмотрены K_n ^{90}Sr для мест испытаний БРВ. Распределение значений K_n ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ для различных исследуемых территорий СИП рассмотрим в виде гистограммы частоты встречаемости $\lg K_n$ (рис. 11).

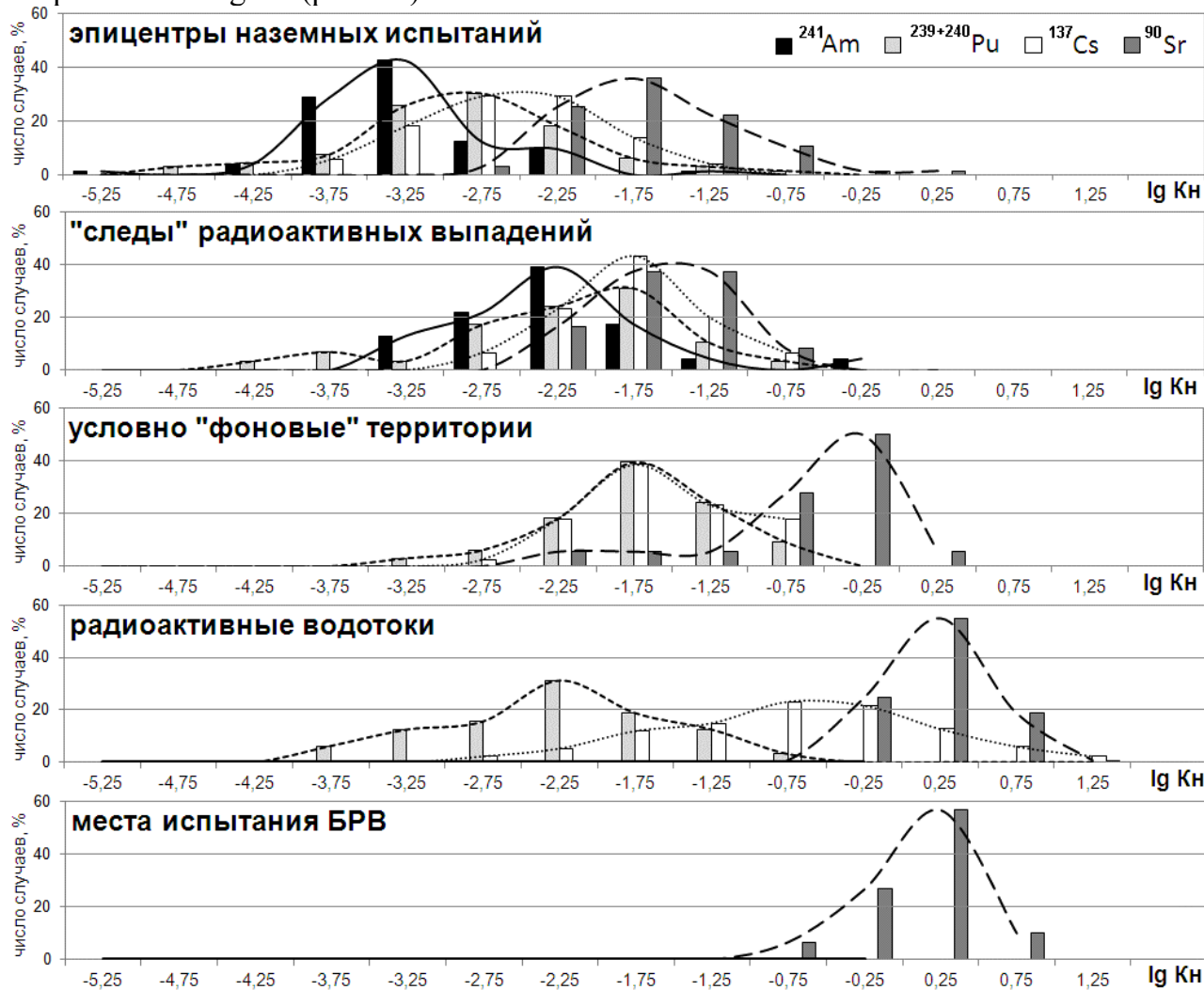


Рис. 11. Распределение значений $\lg K_n$ ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{137}Cs и ^{90}Sr для исследуемых территорий СИП

Представленная гистограмма наглядно демонстрирует, что характер распределения $\lg K_n$ ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am близок к нормальному, поэтому в качестве средних величин K_n данных радионуклидов для исследуемых территории наиболее верно будет использовать среднее геометрическое (GM). Таким образом, в таблице 8 приведены установленные в результате проведенных исследований средние значения K_n радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am .

Таблица 8. Установленные средние значения коэффициентов накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am для исследуемых территорий

Исследуемая территория	Установленные средние значения коэффициентов			
	^{137}Cs	^{90}Sr	$^{239+240}\text{Pu}$	^{241}Am
	n = 275	n = 276	n = 159	n = 96
эпицентры наземных испытаний	0,0028	0,023	0,0014	0,00052
«следы» радиоактивных выпадений	0,020	0,026	0,0068	0,0056
условно «фоновые» территории	0,030	0,25	0,019	-
зоны радиоактивных водотоков	0,20	1,7	0,0059	-
места испытаний БРВ	-	1,2	-	-
n – общее число случаев				

В среднем минимальное накопление всех рассмотренных радионуклидов отмечается на «Опытном поле», далее увеличивается по «следам» радиоактивных выпадений и на условно «фоновых» территориях. Наибольшие значения коэффициентов накопления характерны для зон радиоактивных водотоков и мест испытания БРВ. Различия в Кн для ^{137}Cs достигают 71 раза, ^{90}Sr – 74 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ – 14 раз, ^{241}Am – 11 раз. Тем не менее, ряд убывания радионуклидов по их способности к накоплению растениями имеет следующий вид: $\text{Кн } ^{90}\text{Sr} > \text{Кн } ^{137}\text{Cs} > \text{Кн } ^{239+240}\text{Pu} > \text{Кн } ^{241}\text{Am}$. Кн ^{90}Sr в среднем в 8 раз превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Значения Кн $^{239+240}\text{Pu}$ до 3 раз выше Кн ^{241}Am .

Полученные количественные характеристики радиоактивного загрязнения и разница параметров накопления радионуклидов растениями являются основой для радиоэкологического зонирования территории СИП, на основании которой выделены участки с низкими темпами миграции радионуклидов в системе «почва-растение» (эпицентры наземных испытаний) и высокими (зоны радиоактивных водотоков и места испытания БРВ), а также территории, которые могут быть возвращены в хозяйственное использование.

6.2 Использование параметров накопления для оценки радиоактивного загрязнения растительного покрова отдельных территорий СИП с целью их дальнейшей передачи в хозяйственное использование

Учитывая неоднородность радиоактивного загрязнения территории СИП, делать выводы о среднем содержании радионуклидов в растительном покрове на основании отдельных анализов растений не корректно. Для более объективной оценки среднее содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в растительном покрове рассчитывается на основании средних значений Кн данных радионуклидов для соответствующих участков СИП и их средней удельной активности в почвах исследуемых территорий. Например, для «северной», «западной», «юго-восточной-1» (ЮВЧ-1) и «юго-восточной-2» (ЮВЧ-2) частей СИП (рисунок 1), территории которых по характеру радиоактивного загрязнения отнесены к условно «фоновым», в качестве Кн ^{137}Cs , Кн ^{90}Sr и Кн $^{239+240}\text{Pu}$ было принято считать средние значения Кн для соответствующих территорий (табл. 8), в качестве Кн ^{241}Am использованы литературные данные (МАГАТЭ, 2009) (табл. 9).

Исходя из проведенного расчета, предполагаемое содержание радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениях не превышает 3 % от предельно-допустимых уровней радиоактивного загрязнения кормовых трав (^{137}Cs – 74 Бк/кг, ^{90}Sr – 111 Бк/кг), установленных Минсельхозом Республики Казахстан (1994). Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в растениях не нормируется, однако, исходя из степени общей радиотоксичности каждого, можно предположить, что допустимые уровни по $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am будут ориентировочно на порядок меньше, чем по ^{90}Sr (Гигиенические нормативы, 2012), примерно по 10 Бк/кг. При этом расчетные значения удельной

активности $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am составляют менее 2 % от предполагаемых допустимых уровней.

Таблица 9. Расчет удельной активности искусственных радионуклидов в растениях условно «фоновых» территорий СИП

Исследуемая территория	Средняя удельная активность, Бк/кг	Искусственные радионуклиды			
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
Коэффициенты накопления		0,030	0,25	0,019	0,002
«северная» часть	в почве	17	10	4,1	0,8
	в растениях (расчетная)	0,51	2,5	0,078	0,0016
«западная» часть	в почве	18	6	6,5	1,1
	в растениях (расчетная)	0,54	1,5	0,12	0,0022
ЮВЧ-1	в почве	19	3,4	3,7	0,7
	в растениях (расчетная)	0,57	0,85	0,070	0,0014
ЮВЧ-2	в почве	23	6,3	7,4	0,8
	в растениях (расчетная)	0,69	1,6	0,14	0,0016

Таким образом, уровни загрязнения травянистой растительности искусственными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am «северной», «западной» и «юго-восточной» зон СИП не превышают установленных нормативов, выделенные участки могут использоваться под сенокосы и пастбища при возвращении территории в хозяйственное использование.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методология радиоэкологического обследования СИП с учетом видов проведенных испытаний и механизмов формирования радиоактивного загрязнения. Методологический подход включает выделение участков загрязнения, сформировавшихся в результате наземных испытаний, радиоактивных выпадений (ближних, дальних), выноса радионуклидов с водотоками из штолен и проведения испытаний боевых радиоактивных веществ (БРВ). При комплексном обследовании территории СИП на единой методической базе определяются радионуклидный состав загрязнения, основные физико-химические свойства почв, показатели подвижности радионуклидов в почвах, видовой состав луговой и степной растительности, количественные параметры миграции.

2. Определены параметры накопления радионуклидов в растениях в зависимости от вида проведенных испытаний, характеристик загрязнения территории, подвижности радионуклидов в почвах и видовых особенностей растений. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs (87 кБк/кг) отмечены в районе радиоактивных водотоков, ^{90}Sr (1500 кБк/кг) – в местах испытания БРВ, $^{239+240}\text{Pu}$ (9,5 кБк/кг) и ^{241}Am (0,53 кБк/кг) – в эпицентрах проведения наземных испытаний. Выявлено увеличение коэффициентов накопления радионуклидов растениями в зонах «следов» и на условно «фоновых» территориях по сравнению с территориями эпицентров наземных испытаний, максимальное накопление отмечено в зонах радиоактивных водотоков и в местах испытания БРВ. Различия в Кн для ^{137}Cs достигают 71 раза, ^{90}Sr – 74 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ – 14 раз, ^{241}Am – 11 раз. Минимальные Кн для эпицентров проведения наземных испытаний составили: ^{90}Sr – 0,023 > ^{137}Cs – 0,0028 > $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,0014 > ^{241}Am – 0,00052; максимальные Кн для зон радиоактивных водотоков: ^{90}Sr – 1,7 > ^{137}Cs – 0,20 > $^{239+240}\text{Pu}$ – 0,0059.

3. Получен ряд радионуклидов по их способности к накоплению растениями из почв: ^{90}Sr > ^{137}Cs > $^{239+240}\text{Pu}$ > ^{241}Am . Кн ^{90}Sr в среднем в 8 раз превышают Кн ^{137}Cs и до 16 раз Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Значения Кн $^{239+240}\text{Pu}$ до 3 раз выше Кн ^{241}Am .

4. Максимальные коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr получены для растений луговых экосистем, почвенный покров которых представлен почвами с легким механическим составом, что обусловлено повышенным содержанием доступных растениям форм радионуклидов (водорастворимой и обменной). Установлено влияния содержания в почве Ca, Mg и Sr на Кн ^{90}Sr и Al, Fe на Кн $^{239+240}\text{Pu}$. Влияния рассмотренных физико-химических свойств светло-каштановых почв на накопление радионуклидов растениями не выявлено. Увеличение параметров накопления радионуклидов растениями отмечено по оси «следа» от взрыва 1953 года по мере удаления от эпицентра, что может быть обусловлено влиянием форм нахождения радионуклидов в почвах.

5. Показано, что видовые особенности растений луговых экосистем обуславливают различия в накоплении радионуклида ^{137}Cs от 2 до 10 раз, ^{90}Sr – от 2 до 6 раз, $^{239+240}\text{Pu}$ – в 2 раза, растений степных экосистем – ^{137}Cs от 2 до 4 раз, ^{241}Am – от 2 до 5 раз, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – в 3 раза. Максимальная концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr отмечена в листьях, $^{239+240}\text{Pu}$ – в цветках. Содержание радионуклида ^{90}Sr в растениях резко увеличивается с началом цветения и возрастает в течение всего вегетационного периода, максимальное накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr приходится на осенние месяцы (фаза обсеменения).

6. Полученные количественные характеристики радиоактивного загрязнения и параметры миграции радионуклидов в системе «почва-растение» позволили оценить радиационную обстановку и провести зонирование территории СИП, на основании которого были выделены участки с высокими темпами миграции, а также территории, которые могут быть возвращены в хозяйственное использование.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ларионова, Н.В. Поступление радионуклидов из почвы в растения в зоне радиоактивных выпадений на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко // Бюллетень Радиация и риск. – 2013. - № 3 – С. 65-71.
2. Ларионова, Н.В. Параметры накопления радионуклидов растениями в местах испытания боевых радиоактивных веществ на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, Н.И. Санжарова // Бюллетень Радиация и риск. – 2013. - № 4 – С. 85-64.

В журналах, сборниках статей и материалов конференций:

3. Ларионова, Н.В. Изучение параметров накопления искусственных радионуклидов растениями лугового биогеоценоза / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова [и др.]. // Вестник НЯЦ РК. - Курчатов, 2008. - Вып. 3. – С.33 -38.
4. Ларионова, Н.В. Особенности накопления техногенных радионуклидов растениями лугового биогеоценоза / Н.В. Ларионова, С. Н. Лукашенко // Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2010. – Вып. 2. – С.136-144.
5. Ларионова, Н.В. Состояние растительного покрова / Актуальные вопросы радиозэкологии Казахстана [Радиозэкологическое состояние «северной» части территории Семипалатинского испытательного полигона] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 1. – Павлодар: Дом печати, 2010. – 234с. - ISBN 978-601-7112-28-8.
6. Ларионова, Н.В. Особенности накопления техногенных радионуклидов растениями в районе штольневых водотоков площадки «Дегелен» / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова [и др.]. // Актуальные вопросы радиозэкологии Казахстана [Сборник трудов Института радиационной безопасности и экологии за 2007 – 2009 гг.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Вып. 2. – Павлодар: Дом печати, 2010. – С. 301-320. - ISBN 978-601-

7. Ларионова, Н.В. Особенности распределения искусственных радионуклидов в системе «почва-растение» в условиях лугового биогеоценоза / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова, Р.Ю. Магашева // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010. - № 3 (14). – С.137-143.
8. Ларионова, Н.В. Особенности накопления искусственных радионуклидов степными растениями на площадке «Опытное поле» бывшего СИП / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.Е. Кундузбаева, С.А. Келлер // Вестник НЯЦ РК. - Курчатов, 2011. - Вып. 3. – С. 120-124.
9. Стрильчук, Ю.Г. Радиоэкологическое состояние «западной» части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, А.О. Айдарханов, С.В. Генова, Н.В. Ларионова [и др.]. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т.1. - Вып. 3. – С. 81-164. - ISBN 978-601-7112-32-5.
10. Ларионова, Н.В. Особенности перехода искусственных радионуклидов из почвы в растения степных экосистем на площадке «Опытное поле» бывшего СИП / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.Е. Кундузбаева [и др.]. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2010 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2011. – Т.2. - Вып. 3. – С. 85-100. - ISBN 978-601-7112-32-5.
11. Ларионова, Н.В. Искусственные радионуклиды в растительном покрове на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко // Сб.тез. V всемирного конгресса инжиниринга и технологий – WCET-2012 «Наука и технологии: шаг в будущее» 1-2 июня 2012 г. - Алматы, 2012. - С. 215.
12. Ларионова, Н.В. Параметры накопления техногенных радионуклидов растениями на различных участках бывшего СИП // Н.В. Ларионова, С.Н.Лукашенко // Тобольск научный -2012: IX Всероссийская (науч.-практическая конф. с междунар. участием), 9-10 ноября 2012 г. –Тюмень: ОАО «Тюменский изд.дом», 2012. – С.32-36.
13. Ларионова, Н.В. К вопросу о влиянии характера радиоактивного загрязнения почв на накопление искусственных радионуклидов растениями на территории бывшего СИП / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова, А.Т. Кундузбаева // Современные проблемы загрязнения почв: сб. мат. IV Междунар. науч. конф., 27-31 мая 2013 г. – Москва: МГУ, 2013. – С.128-131.
14. Стрильчук, Ю.Г. Радиоэкологическое состояние «юго-восточной» (район с. Саржал) части территории СИП / Ю.Г. Стрильчук, С.Н. Лукашенко, В.В. Каширский, Ю.Ю. Яковенко, А.О. Айдарханов, О.Н. Ляхова, Н.В. Ларионова [и др.]. // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана [Сборник трудов Национального ядерного центра Республики Казахстан за 2011-2012 г.] / под рук. Лукашенко С.Н. – Павлодар: Дом печати, 2013. – Т.1. - Вып. 4. – С. 15-116. - ISBN 978-601-7112-74-5.
15. Ларионова, Н.В. Сравнительный анализ параметров накопления радионуклидов растениями для различных участков бывшего Семипалатинского испытательного полигона / Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.М. Кабдыракова, А.Е. Кундузбаева, А.В. Паницкий, А.Р. Иванова, А.Б. Янкаускас, С.А. Келлер // Актуальные вопросы радиоэкологии 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. 149-158. - ISBN 978-601-7112-74-5.