

На правах рукописи

УСАЧЕВА АННА АНДРЕЕВНА



**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЦЕЗИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ
ВЫПАДЕНИЙ В ТУНДРОВЫХ И ТАЕЖНЫХ ЛАНДШАФТАХ ЗАПАДНОЙ
СИБИРИ**

25.00.36 – геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2020

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН).

Научный руководитель: кандидат геолого-минералогических наук, **Мирошников Алексей Юрьевич**, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Официальные оппоненты: **Евсеев Александр Васильевич**, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), г. Москва

Кузьменкова Наталья Викторовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова» УрО РАН (ФИЦКИА УрО РАН)

Защита диссертации состоится «15» октября 2020 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 002.122.01, функционирующего на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии Наук (ИГЕМ РАН), по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35.
(e-mail секретаря: oandreeva@igem.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, а также на сайте ИГЕМ РАН (<http://www.igem.ru/>).

Автореферат диссертации также размещен на официальном сайте ВАК (<http://vak.ed.gov.ru/>)

Автореферат диссертации разослан «___» августа 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



О.А. Андреева

Введение

Актуальность работы.

Актуальность исследований, проведенных на шести ключевых участках Западной Сибири, пять из которых расположены в пределах Арктической зоны Российской Федерации, диктуется национальными интересами, обозначенными в «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике» (Основы..., 2020; указ Президента РФ, 2014). Одной из главных задач, обеспечивающих социально-экономическое развитие страны, является обеспечение дальнейшего накопления знаний и экологической безопасности региона, решение проблем фундаментальной науки, организация экологического мониторинга арктических территорий и акваторий.

Испытания ядерного оружия в атмосфере обусловили глобальное загрязнение поверхности Земли продуктами радиоактивного распада, в том числе ^{137}Cs , который является одним из главных дозообразующих радионуклидов. Определенную долю внесли и крупные радиационные аварии, такие, как Кыштымская (1957), Чернобыльская (1986) и Фукусима (2011).

Поведение ^{137}Cs достаточно хорошо изучено на территориях, загрязненных в результате аварий (Алексахин, 1997, 2006, 2008, 2009; Анисимов, 1991; Израэль, 2014; Квасникова, 2009; Панов, 2007; Спиридонов, 2007; Бобовникова, 1990; Бондарь, 1990; Коноплев, 2016; Коробова, 2007; Линник, 2016а,б, 2017, Мамихин, 2016; Парамонова, 2017; Страх, 1999; Mourí, 2014; Konoplev, 2016; Aarkrog, 1997, 2000).

В то же время в фоновых тундровых и таежных ландшафтах, занимающих более половины территории России, геохимия ^{137}Cs изучена слабо (Парамонова, 2008; Пузанов, 2008; Балыкин, 2013; Miroshnikov, 2012), так как уровни его активности на этих территориях не являются опасными для человека.

В пределах таежной зоны на большей части России существуют локальные участки повышенной активности ^{137}Cs (Карта..., 1994; Щеглов, 2000; Линник, 2008; Маликова, 2012). Зарубежные исследования ^{137}Cs глобальных выпадений, преимущественно, направлены на разработку региональных и глобальных моделей, отражающих интенсивность его поступления из атмосферы (Bergan, 2002; Isaksson, 2000; Palsson, 2006, 2013) и выноса с речным стоком.

На территории России в большей степени изучены ландшафты Восточно-Европейской равнины. Однако до сих пор остаются слабо изученными миграция и аккумуляция ^{137}Cs в фоновых таежных и тундровых ландшафтах Западной Сибири, которые в силу своих геохимических особенностей обладают пониженным потенциалом удержания радиоцезия (Карта..., 1994; Национальный атлас..., 2007). Кроме того, латеральное распределение ^{137}Cs в глобально-загрязненных почвах сопряженных ландшафтов изучено слабее, чем вертикальное.

В отличие от территорий, загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС, где происходило фракционирование радиоактивных выпадений, глобальным выпадениям, представленным частицами конденсационного типа, свойственно более однородное и длительное поступление и распределение в ландшафтах, поэтому в последнем случае влияние ландшафтно-геохимических условий на поведение ^{137}Cs является более значимым. Все это определяет актуальность

изучения закономерностей его миграции в компонентах таежных и тундровых ландшафтов Западной Сибири.

Достаточно длительный период полураспада (30,17 лет), а также слабая подвижность ^{137}Cs , по сравнению с другими радионуклидами и тяжелыми металлами в большинстве типов почв, обуславливает выбор данного радионуклида для изучения.

Целью исследования является выявление закономерностей аккумуляции и миграции ^{137}Cs в фоновых автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных тундровых и таежных ландшафтах Западной Сибири.

Основные задачи исследований:

- определить характер вертикального распределения ^{137}Cs в почвах под влиянием наиболее значимых ландшафтно-геохимических факторов;
- изучить параметры распределения радиоцезия в растениях зонального ряда ландшафтов тундры и тайги;
- выявить почвенно-биоклиматическую зональность миграции и аккумуляции ^{137}Cs в ландшафтах Западной Сибири;
- оценить уровни фонового загрязнения ландшафтов Западной Сибири радиоцезием.

Объектом исследований являлись почвы и растительность сопряженных ландшафтов Западно-Сибирской равнины.

Фактический материал. В основу исследований положены материалы, собранные лично автором в ходе экспедиций 2012 – 2013 гг. На основных четырех участках, характеризующих типичные тундры, северо- и среднетаежные ландшафты, заложен 51 разрез, отобрано 323 образца почв и 27 проб растительности.

Для получения данных об уровнях активности ^{137}Cs в почвах южной тундры и лесотундры заложены два дополнительных участка в южной тундре и лесотундре Западной Сибири. На них изучено 16 разрезов на 11 точках и отобрано 76 образцов почв. В отличие от основных ключевых участков, где пробы отбирали послойно с фиксированной площади с шагом 3-10 см, на дополнительных участках – почвы опробованы погоризонтно, растения не отбирали. .

Полевые работы на основных ключевых участках в тайге выполнены в рамках программы президиума РАН №4 (ИГЕМ РАН), в тундровой зоне – при поддержке проекта РФФИ №12-05-33050 (ИФА РАН), на дополнительных участках – проекта РФФИ № 11-05-00544 (ИКЗ СО РАН). В 436 образцах почв и растительности выполнено более 1400 аналитических определений.

Методологической основой диссертационного исследования являются ландшафтно-геохимические принципы, заложенные в работах А.И. Перельмана (1999), М.А. Глазовской (2002), Н.С. Касимова (2004), а также радиоэкологические методы, разработанные Р.М. Алексахиним, Ю.А. Израэлем, и развитые в работах Ф.А. Тихомирова, Л.Г. Бязрова, А.И. Щеглова, Г.Н. Бондаренко, В.Г. Линника, Е.В. Квасниковой, Е.М. Коробовой и др.

В ходе исследования автор опирался на сравнительно-географический и ландшафтно-геохимический методы исследований, а также на комплекс химико-аналитических методов и статистический анализ.

На ключевых участках исследований почвенные разрезы закладывали в пределах основных элементарных ландшафтов в наиболее типичных геоботанических и геоморфологических условиях для анализа вертикальной миграции радиоцезия. Катенарное профилирование проводили для изучения латеральной миграции радионуклида в ландшафте.

В почвенных пробах, а также в растениях определяли активность ^{137}Cs , потери массы при прокаливании (ППП), углерод органических веществ (гумус), валовые содержания углерода и азота, емкость катионного обмена (ЕКО), актуальную кислотность (величину $\text{pH}_{\text{водн}}$) и гранулометрический состав.

Личный вклад автора. Автор участвовал в полевых работах Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Института физики атмосферы (ИФА) РАН, Института криосферы Земли (ИКЗ) СО РАН, отбирал образцы почв и растений, подготавливал их к химико-аналитическим работам и гамма-спектрометрическому анализу, выполнил 50% определений углерода органических веществ, величины $\text{pH}_{\text{водн}}$, потери массы при прокаливании, 100% измерений емкости катионного обмена, самостоятельно формулировал цели и задач работы. Все результаты получены автором лично либо при его непосредственном участии.

Положения, выносимые на защиту.

1. В тундровых и таежных почвах Западной Сибири на фоне наиболее распространенного поверхностно-аккумулятивного вертикального распределения ^{137}Cs установлены два новых типа накопления – элювиально-иллювиальный и аккумулятивно-элювиально-иллювиальный, которые возникают в процессе крио- и биотурбаций и при осаждении радионуклидов на щелочно-сорбционном барьере.

2. Доля ^{137}Cs , накапливаемая в растительном ярусе системы «почва-растение», увеличивается от автоморфных почв к гидроморфным и от среднетаежных ландшафтов к тундровым, составляя в среднем в напочвенном покрове около 30 % общих запасов.

3. Латеральное распределение ^{137}Cs в почвах подчиняется ландшафтной зональности в направлении от типичной тундры к северной и средней тайге и характеризуется увеличением его плотности, контрастности и глубины проникновения.

4. Современный уровень загрязнения радиоцезием ландшафтов Западной Сибири, обусловленный глобальными выпадениями, является низким и составляет в среднем $0,4 \text{ кБк/м}^2$ в тундре, $0,8 \text{ кБк/м}^2$ в северной тайге и $2,1 \text{ кБк/м}^2$ в средней тайге, что не превышает 6% от предельно допустимой нормы.

Научная новизна работы заключается в том, что в выявлении закономерностей вертикального и латерального распределения радиоцезия в зональном ряду сопряженных ландшафтов от типичной тундры до средней тайги Западной Сибири.

Теоретическая и практическая значимость. Установлен современный уровень загрязнения ^{137}Cs фоновых тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири. Результаты исследования могут быть использованы для оценки интенсивности биологического круговорота вещества, а также при радиоэкологическом мониторинге и для пополнения баз данных радиационного состояния земель.

Характеристика текущего уровня фонового загрязнения экосистем радиоцезием и детальный анализ особенностей его миграции может служить основой для быстрого реагирования в случае аварийных выпадений и поступления радионуклида в окружающую среду.

Получена информация о закономерностях миграции и аккумуляции ^{137}Cs в различных геохимических обстановках тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири, которая может быть использована в рамках мониторинговых работ при освоении месторождений, а также математических моделях, описывающих миграцию радиоцезия. В работе решена важная для геоэкологии задача – охарактеризовано латеральное и вертикальное распределение ^{137}Cs в почвах и катенах фоновых тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири.

Апробация работы. Основные положения, изложенные в настоящей работе, доложены на ряде различных научных форумов, как в России, так и за рубежом: XX Международная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2013); Международная конференция «Earth Cryology: XXI Century» (Пушино, 2013); III, V и VI Российская молодежная Школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2013, 2015, 2016); Международная конференция «International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity» (Барселона, 2014); Всероссийская научная конференция «Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана)» (Москва, 2016); X Международная конференция «Образование и наука для устойчивого развития» (Москва, 2018); «Металлогения древних и современных океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений» (Миасс, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК, и глава в коллективной монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, состоящего из 210 источников и 2 приложений. Содержательная часть работы изложена на 127 страницах текста, включает 26 рисунков, 20 таблиц и 2 приложения на 3-х страницах.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю в.н.с. Лаборатории радиогелологии и радиогеоэкологии (ЛРР) к.г.-м.н. А.Ю. Мирошникову, заведующему ЛРР ИГЕМ РАН член-корреспонденту РАН С.В. Юдинцеву, сотрудникам ЛРР к.г.-м.н. Э.Э. Асадулину, к.г.-м.н. Е.Н. Борисенко, д.ф.-м.н. В.И. Мальковскому, д.г.-м.н. А.А.Пэку, д.г.-м.н. Б.Т. Кочкину, Г.И. Надъярных, А.Л. Керзину, Р.В. Соломенникову.

Автор благодарен сподвижникам по полевым работам: к.г.н. И.Н. Семенкову, к.б.н. В.С. Казанцеву, К.А. Попову, д.г.-м.н. Д.С. Дроздову, сотрудникам кафедры «Геохимии ландшафтов и географии почв» географического факультета МГУ: к.г.н. И.А. Горбуновой, к.г.н. М.А. Смирновой, д.б.н. М.И. Герасимовой, Е.В. Терской, Л.В. Добрыдневой, сотруднику факультета почвоведения МГУ к.б.н. Т.А. Парамоновой за ценные советы, а также семье и друзьям за всестороннюю поддержку.

Глава 1. Источники радионуклидов и формы их нахождения в почвах

В первой главе рассмотрены источники поступления ^{137}Cs в ландшафты.

Основное загрязнение ландшафтов глобальными радиоактивными выпадениями обусловлено испытаниями ядерного оружия с конца 1940-х до середины 1960-х гг. (Израэль, 2000). К началу 1980-х гг. суммарная активность ^{137}Cs , поступившего в окружающую среду в результате атмосферных ядерных взрывов, составила 960 ПБк (Ионизирующее..., 1982; Михайлов, 2006).

Районы исследования удалены от Семипалатинского и Северного испытательных полигонов и их радиационное воздействие на территорию Западной Сибири несущественно (Щербов, 2001). Советские, а позднее российские радиохимические заводы способствовали более значимому загрязнению супераквальных ландшафтов пойм Течи, Исети, Тобола, Иртыша, Оби, Томи и Енисея.

Аварии на радиационно-опасных объектах также не оказали существенного воздействия на местный радиационный фон.

Глобальные выпадения ^{137}Cs с частицами диаметром 0,01-1,00 мкм в тундровых и таежных ландшафтах представлены на 60-90% мокрыми выпадениями и вносят основной вклад в их загрязнение (Марей, 1974; Болтнева, 1977). ^{137}Cs глобальных выпадений, поступивший в наземные экосистемы в подвижном состоянии, со временем вступал в миграционные процессы (Павлоцкая, 1974, Моисеев, 1975, Геохимия..., 2002).

В постоянно или периодически переувлажненных ландшафтах кислого класса отмечаются наиболее благоприятные условия для миграции ^{137}Cs как в почвах, так и в системе «почва – растение» (Марей, 1974). В минеральных почвах с большим количеством глинистых минералов ^{137}Cs прочно фиксируется твердой фазой за счет вхождения Cs^+ в межпакетное пространство кристаллических решеток глинистых минералов или в межпакетное пространство слоистых глинистых минералов (Титлянова, 1963 Коноплев, 1999; Санжарова, 2014).

В почвах радиоцезий находится в динамическом равновесии в жидкой и твердой фазы. В растворе ^{137}Cs присутствует в основном в виде катиона. В твердой фазе радионуклид может находиться в обменносорбированном состоянии, входить в состав нерастворимых соединений или быть необратимо сорбированным (Коноплева, 1999).

При определенных условиях, таких как изменение влажности почвы, термического режима и др., ионы, находящиеся в труднорастворимом состоянии, могут переходить в подвижные и наоборот (Krouglov, 1997; Санжарова, 2014). Соотношение обменных и необменных форм соединений в почвах со временем меняется (Марей, 1974). Фиксация, т.е. переход Cs^+ из обменной формы в необменную, является основным процессом, влияющим на динамику подвижности и биологическую доступность ^{137}Cs (Булгаков, 2009). С течением времени после попадания в почву подвижность и биологическая доступность ^{137}Cs уменьшается в результате различных физико-химических реакций, объединяемых термином «старение» (Санжарова, 1994; Булгаков, 2009).

Фиксация Cs^+ в минеральных почвах в основном определяется наличием глинистых минералов. Чем выше содержание илистой фракции в почве, тем

больше ^{137}Cs она способна удерживать. Наряду с гранулометрическим составом, существенное влияние на вертикальную миграцию радионуклидов оказывают турбационные процессы, порозность и влажность почвы.

Глава 2. Объекты и методы исследования

Полевые исследования проведены в 2012–2013 гг. на шести ключевых участках (рисунок 1), удаленных от зон воздействия ПО «Маяк» на 800-1750 км, Сибирского химического комбината на 850-1500 км и Горно-химического комбината на 1350-1750 км, а также от мест ядерных взрывов (Карта ..., 1994; Судакова, 1999; Квасникова, 2002). Все исследованные ландшафты являются естественными с минимальным антропогенным воздействием, а поступление радиоцезия в них происходило преимущественно с глобальными выпадениями, что подтверждается радиоэкологическими исследованиями в этом регионе (Сухоруков, 2000; Страховенко, 2008; Щербов, 2001). Выбор участков определялся охватом зонального ряда ландшафтов от средней тайги до типичных тундр.

Территория исследования включает в себя четыре основных района (Тазовский, Пурпе, Ноябрьск, Салым), расположенных в центральной части Западной Сибири и приуроченных к трем природным подзонам: участок Тазовский – к типичной тундре, участки Пурпе и Ноябрьск – к северной тайге, участок Салым – к средней тайге. Дополнительные участки УГКП-15 и УГКП-5 расположены в пределах южной тундры и лесотундры, соответственно.

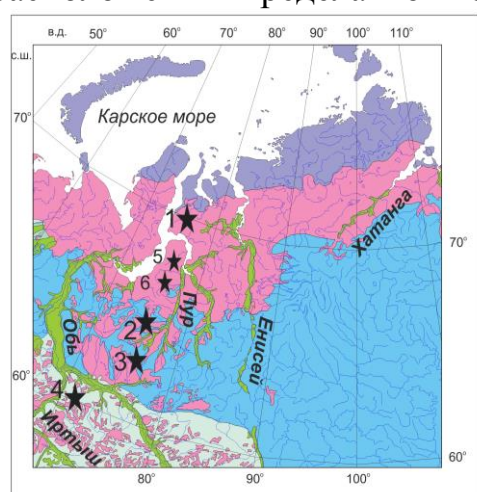


Рис. 1. Расположение ключевых участков на Карте ландшафтно-геохимических условий миграции радионуклидов... (1994). Основные участки: 1 – Тазовский, 2 – Пурпе, 3 – Ноябрьск, 4 – Салым. Дополнительные участки: 5 – УГКП-15, 6 – УГКП-5

Участок Тазовский расположен в западной части Гыданского полуострова, на слабо расчлененном междуречье рек Седеяха и Нероседеяха в пределах одноименной низменности, с трещинно-полигональными типичными тундрами с мохово-травянисто-кустарничковой растительностью на глееземах, криоземах и подбурах, сформировавшихся на четвертичных ледниково-морских супесчано-суглинистых отложениях в зоне практически сплошного распространения вечной мерзлоты (Геоэкология СССР, 1989), абсолютные высоты составляют – 55-60 м. На болотах формируются торфяные почвы.

Западная Сибирь является одной из крупнейших платформенных структур Евразии. В тектоническом отношении она представляет собой часть молодой Урало-Сибирской плиты (Региональная..., 1989; Западная Сибирь..., 2000) и располагается преимущественно в пределах одноименной эпигерцинской плиты – крупной морфоструктуры первого порядка, фундамент которой сложен палеозойскими отложениями.

Участок Пурпе находится в средней части бассейна реки Пур, в 2 км к северу от г. Губкинский в северной подзональной полосе северной тайги на четвертичных аллювиальных супесчаных отложениях с островным распространением мерзлоты и очень слабым расчленением рельефа (1‰). Абсолютные высоты достигают 45-50 м над уровнем моря. Автоморфные ландшафты междуречья сложены супесчаными аллювиальными отложениями и покрыты бором бруснично-голубично-беломошным на грубогумусовых подзолах. Полугидроморфные позиции заняты ерником осоково-зеленомошным на торфяно-подзолах. Поскольку леса по площади уступают верховым болотам (Атлас...,1971), широкое распространение получили торфяные олиготрофные мерзлотные и немерзлотные почвы под болотной кустарничково-осоковой долгомошно-сфагново-лишайниковая растительностью.

Участок Ноябрьск расположен в 4 км к северо-востоку от г. Ноябрьск, в южной подзональной полосе северной тайги (фактически на границе со средней тайгой) на Обь-Пуровском междуречье в зоне глубокого залегания (несколько сотен метров) островной мерзлоты. Почвообразующие породы представлены четвертичными флювиогляциальными песками и супесями (Архипов, 1971). В автоморфных условиях на вытянутых песчаных грядах, покрытых бором кустарничково-беломошно-зеленомошным, сформировались грубогумусовые подзолы. В полугидроморфных условиях на мелкобугорковатых склонах гряд, занятых бором голубично-беломошно-зеленомошным, обнаруживаются торфяно-подзолы. В гидроморфных условиях понижений формируются торфяные олиготрофные почвы под морошково-осоково-сфагновым сообществом. Для района исследования характерно длительное сезонное промерзание, в органогенных почвах единично отмечены ядра замерзшего торфа.

Участок Салым расположен в подзоне средней тайги на юго-западе Среднеобской низменности, представляющей собой сильно заболоченную и заозерную плоскую слабонаклонную равнину, в средней части бассейна р. Большой Салым, в 3 км к югу от пос. Салым. Абсолютные высоты не превышают 50-60 м, многолетнемерзлые породы отсутствуют. Территория отличается слабой дренированностью и сложена озерно-аллювиальными суглинистыми отложениями. В автоморфных условиях выровненных ландшафтов наиболее высоких участков междуречья формируются коренные смешанные мелколиственно-пихтовые рябиновые кустарничково-осоково-разнотравные леса на дерново-подзолистых почвах. Слабонаклонные склоны покрыты березово-сосновым кустарничково-хвощово-зеленомошным лесом на криометаморфических окисленно-глееватых почвах, а понижения – хвощово-сфагновым сообществом на глееземах и органо-аккумулятивных почвах. Междуречье и склоны покрыты бором багульниково-осоково-сфагновым и сосновым с примесью березы кустарничково-зеленомошным лесом, соответственно, на криометаморфических, реже глеевых почвах. В гидроморфных условиях проточных межрядовых понижений под сосновым кустарничково-осоково-зеленомошным сообществом развиты торфяные олиготрофные почвы.

На каждом участке заложено от 9 до 18 разрезов, изучено 1-3 катены. На всех точках проведены геоморфологические (положение в мезорельефе, наличие и характер микрорельефа), геоботанические (видовой состав растений) и почвенные

описания. Названия почв давали по субстантивно-генетической классификации (Классификация..., 2004).

На основных ключевых участках из верхней части почв до глубины 15-30 см пробы отбирали послойно с фиксированной площади с шагом 3-10 см в зависимости от мощности органогенной или органоминеральной толщи для последующего определения запаса ^{137}Cs в слое почвы. Из нижележащей толщи опробование выполнено погоризонтно для уточнения классификационного положения почв. Укос общей надземной фитомассы производили на фиксированной площади от 630 до 5600 см².

В МГУ имени М.В. Ломоносова определены актуальная кислотность, содержание углерода органического вещества почв (гумуса), а также зольность органогенных горизонтов и растений традиционными методами (Аринушкина, 1970, ГОСТ 27784-88).

В 29 пробах органогенных горизонтов почв определены валовые содержания С и N на элементном анализаторе Vario EL (Германия) и определена емкость катионного обмена (ЕКО) по методу Каппена-Гильковица (Теория и практика..., 2006). Гранулометрический состав определен пирофосфатным методом на лазерном дифрактометре «Analizeter-22» (Германия) в 27 органоминеральных и минеральных пробах почв.

Элементный состав почв определен рентген-флуоресцентным методом на вакуумном спектрометре PANalytical (Нидерланды) последовательного действия с дисперсией по длине волны (аналитик – А.И. Якушев) в ИГЕМ РАН.

В лаборатории радиогеологии и радиогеоэкологии ИГЕМ РАН удельная активность ^{137}Cs в 372 пробах почв и растительности измерена Керзиным А.Л. и Соломенниковым Р.В. с помощью прямого γ -спектрометрического анализа с использованием низкофонового γ -спектрометрического комплекса оснащенного NaI(Tl) детектором 160×160 мм с колодцами 55×110 мм. Длительность экспозиции составила 3600 сек. Для измерения образцов использовали "Стакан 200"(объем пробы 200 мл, вес пробы 200 г), для которого минимально детектируемая активность ^{137}Cs за 1 час составляет 1Бк (погрешность измерений – 15-60%).

Данные химических анализов группировали в выборки и подвергали статистической обработке в пакетах «Excel» и «Statistica»: рассчитывали средние, ошибки среднего, средние квадратичные отклонения, коэффициенты вариации (Cv), максимальные и минимальные значения, коэффициенты корреляции и другие статистические показатели.

Все изученные почвы относятся к двум стволам: постлитогенные и органогенные. Из-за существенных морфологических и химических различий между ними они рассмотрены отдельно. Среди почв постлитогенного ствола по условиям миграции выделены 2 большие группы: 1) почвы тундровых и северотаежных ландшафтов; 2) почвы среднетаежных ландшафтов.

Для оценки влияния физико-химических свойств на вертикальную миграцию ^{137}Cs почвы сгруппированы по типам и подтипам в 12 подгрупп: глееземы, торфяно-глееземы, торфяно-криоземы, подбуры, торфяно-подбуры, подзолы, торфяно-подзолы, органо-криометаморфические, органо-аккумулятивные, дерново-подзолистые, торфяные олиготрофные и эутрофные.

При оценке вертикальной миграции криоземы и глееземы как слабо отличающиеся друг от друга по условиям миграции ^{137}Cs и классификационной диагностике, а также подбуры и подзолы, занимающие сходные ландшафтные позиции, рассмотрены вместе.

Для оценки радиационного состояния ландшафтов посчитаны запасы и плотность загрязнения ^{137}Cs в почвах и растениях. Под запасом радионуклида в слое почвы ($A_{\text{сп}}$) понимают физическую характеристику радиоактивного загрязнения слоя почвы, которая выражается в единицах активности радионуклида, находящегося в слое, на единицу площади (Закон РФ, 1991) и рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{сп}} = A_{\text{п}} m / S,$$

где $A_{\text{п}}$ – удельная активность радионуклида в слое почвы, Бк/кг;

m – масса образца, кг;

S – площадь образца, м^2 .

Плотность загрязнения почвы радионуклидом – это запас ^{137}Cs в почвенном разрезе, суммированный на всю глубину. Обе величины измеряются в Бк/ м^2 , кБк/ м^2 или Ки/ км^2 .

На ключевых участках отбиралась общая наземная фитомасса без разделения на отдельные виды, межвидовые особенности накопления ^{137}Cs растениями оценивались по преобладающему виду или типу сообщества. Растительные ассоциации, представленные мохово-травянисто-кустарничковыми ярусами, объединены в 6 групп: зеленомошная и кустарничково-зеленомошная, долгомошная и кустарничково-долгомошная, беломошная, кустарничковая, осоковая (кустарничково-осоковая и осоково-сфагновая), сфагновая и разнотравно-кустарничково-сфагновая.

Для оценки неоднородности первичных глобальных атмосферных выпадений ^{137}Cs в ландшафтах были сформированы выборки данных по открытым местообитаниям, опушкам и под пологом леса. Для выявления особенностей накопления радионуклидов разными видами растений данные группировали по преобладающему виду растительной ассоциации.

Для выявления особенностей накопления ^{137}Cs в ландшафтах сформированы выборки данных по природной подзоне и степени гидроморфизма почв. Оценена глубина его проникновения в разных типах почв по обнаружению значимой (более 1 Бк/кг) активности.

Латеральное распределение ^{137}Cs оценено с помощью коэффициента латеральной миграции, L – отношения плотности загрязнения в подчиненном ландшафте к плотности загрязнения в автономном. Контрастность латерального распределения ^{137}Cs в почве и ландшафтах оценивали с помощью отношения максимального коэффициента L (L_{max}) к минимальному (L_{min}) внутри одной катены, а также при помощи вариабельности (C_v) плотности загрязнения ^{137}Cs . За слабоконтрастные катены по распределению ^{137}Cs приняты катены, в которых отношение L_{max} к L_{min} составляло менее 2,5, а C_v плотности загрязнения ^{137}Cs менее 35% контрастные характеризуются $L_{\text{max}} / L_{\text{min}}$ от 2,5 до 5 и C_v от 25% до 70%, сильноконтрастные – более 5 и C_v более 70%, соответственно.

Глава 3. Особенности аккумуляции ^{137}Cs в почвах

Поскольку ^{137}Cs поступает в изученные ландшафты центральной части Западной Сибири, преимущественно, с атмосферными осадками и прочно фиксируется в верхней части профиля на сорбционном и биогеохимическом барьерах, в постлитогенных почвах ($n=22$), представленных глеевыми, криотурбированными, криометаморфическими, альфегумусовыми, текстурно-дифференцированными и органо-аккумулятивными, традиционно отмечается поверхностно-аккумулятивное распределение ^{137}Cs (рисунок 2).

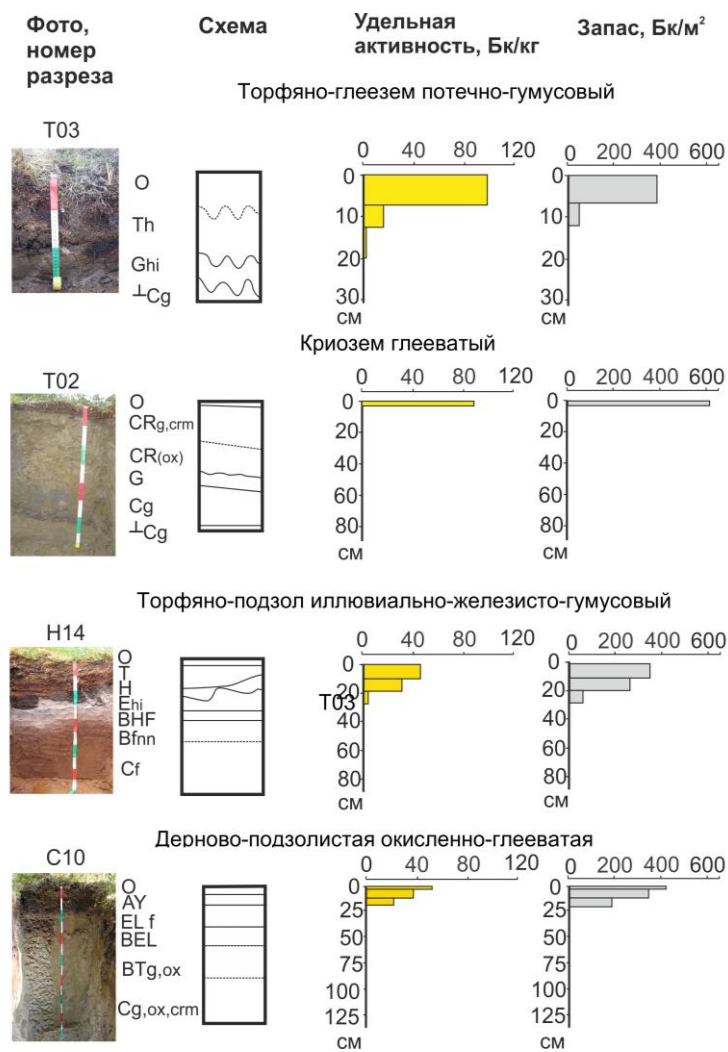


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в постлитогенных почвах тундры и тайги Западной Сибири

массообмена и образованием педотурбаций. В криоземах пятен-медальонов типичной тундры, формирующихся в результате интенсивного промерзания сильновлажных горизонтов, значимые активности ^{137}Cs не обнаружены, что вероятно связано с механизмом образования пятен: изливанием минеральной массы из нижних незагрязненных горизонтов. По литературным данным в почвах пятен Западной, Средней и Восточной Сибири ^{137}Cs также либо не обнаружен, либо сосредоточен в верхнем 0,5-2 см слое (Собакин, 2015; Усачева, 2017). То есть криогенные процессы в почвах пятен приводят к снижению удельной активности радионуклида при перемешивании с низкоактивным материалом из нижних горизонтов почв.

В типичной тундре и северной тайге на автономных позициях междуречья и трансэлювиальных ландшафтах пологих склонов формируются постлитогенные оторфованные почвы (криоземы, глееземы, подбуры и подзолы), характеризующиеся сходным морфологическим строением (под маломощной торфяной подстилкой формируется срединный или элювиальный горизонт) и условиями миграции (реакция среды изменяется от сильноокислых значений $\text{pH}_{\text{водн}}$ до близких к нейтральным), при которых ^{137}Cs очень слабо мигрирует по профилю.

Для почв северотаежных и тундровых ландшафтов характерна небольшая глубина проникновения ^{137}Cs , которая в среднем составляет 6-12 см в пределах органогенной толщи. Нарушение поверхностно-аккумулятивного распределения в этих почвах, в первую очередь, связано с процессами криогенного

В северотаежной подзоне в профиле подзола и торфяно-подзола (рисунок 3) в нескольких образцах погребенных органических и турбированных прослоев выявлена небольшая активность ^{137}Cs не превышающая 3,5 Бк/кг. Обнаружение низких активностей в погребенном материале с высоким содержанием органического вещества и турбированном материале верхней и средней части профиля почвы связано с формированием криотурбаций и фитогенных турбаций.

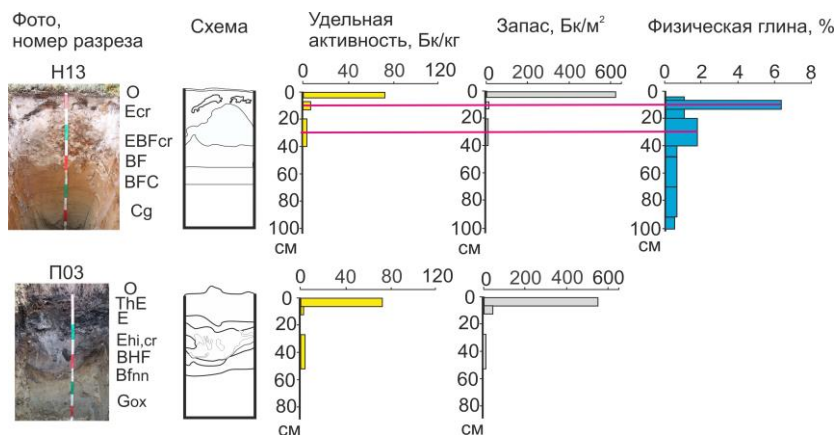


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{137}Cs в турбированном подзоле и торфяно-подзоле

и также способствуют захоронению верхних наиболее загрязненных горизонтов. Кроме того, изученные погребенные и турбированные образцы содержат максимальное количество физической глины во всем разрезе (розовая линия на рисунке 3) и способны удерживать больше ^{137}Cs . Так как ^{137}Cs является малоподвижным в минеральных почвах элементом, то обнаружение его значимых активностей в погребенном материале, свидетельствует о погребении этого материала не ранее середины XX века. Следовательно, ^{137}Cs можно использовать как маркер современных почвенных турбаций.

Среди изученных постлитогенных почв в средней тайге отмечается наибольшее разнообразие, связанное с более тяжелой по гранулометрическому составу (суглинистой) почвообразующей породой, а также в целом более контрастными геохимическими и физико-географическими условиями, по сравнению с почвами тундры и северной тайги. Исследованные постлитогенные почвы средней тайги ($n=8$) принадлежат 4 отделам: криометаморфические, глеевые, органо-аккумулятивные и текстурно-дифференцированные.

Поверхностно-аккумулятивное распределение активности ^{137}Cs в этих почвах отмечается с частотой 50%, запасов – в 4 раза меньше – всего 12,5%. Заглубление максимума активности радиоцезия может быть связано с его захоронением под наросшей биомассой после прекращения наиболее интенсивных радиоактивных выпадений. Слой максимальной активности и запаса радионуклидом чаще всего не совпадают: наиболее часто встречаемый (частота 63%) тип распределения запасов ^{137}Cs – элювиально-иллювиальный с наибольшими запасами на глубине 5-13 см (рисунок 4) или 15-25 см.

В первую очередь, это связано с тем, что в отличие от почв более северных участков, в среднетаежных под органическими горизонтами (Т и О) формируются уплотненные серогумусовые горизонты. Плотность горизонта Т на одном и том же

Криотурбации формируются в период смыкания сезонной мерзлоты с многолетней, в результате чего происходит прорыв грунта на дневную поверхность и погребение верхних, горизонтов почвы (Дюкарев, 2007). Фитогенные турбации появляются при корневом перемешивании или при вывалах деревьев (Бобровский, 2012; Лойко, 2013)

участке в постлитогенных почвах в 3-5 раз меньше, чем в сергогумусовом, а в горизонте O – в 5-8 раз.

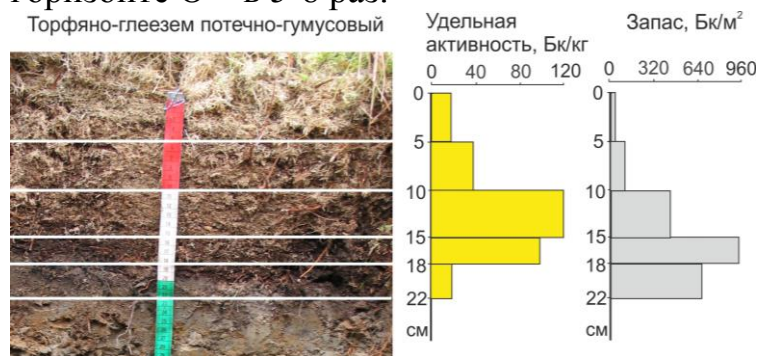


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{137}Cs , Салым

содержит Fe в 2,5-4,6 раз и Mn в 2,7-7,1 раз больше, чем выше и ниже лежащие горизонты. Небольшая аккумуляция ^{137}Cs в этих прослоях может быть связана с осаждением радионуклидов на сорбционном барьере в Fe-Mn конкрециях и пленках, формирующихся в результате смены окислительно-восстановительной обстановки, что ранее описано для почв Белоруссии (Кузнецов, 1994).

Таким образом, в постлитогенных почвах типичнотундровых ландшафтов ^{137}Cs аккумулируется преимущественно в органической толще почв, что, вероятно, связано с очень низким потенциалом радиальной миграции (Ландшафтно-геохимическая карта..., 2013) из-за короткого лета в тундре. В отличие от более северных ландшафтов, в почвах средней тайги, достаточно высокие активности ^{137}Cs обнаруживаются не только в органической толще, но и в органико-минеральном и минеральном субстрате. В горизонтах AU и Ghi величины активности ^{137}Cs достигают десятков Бк/кг, в минеральном субстрате – 6,8-12 Бк/кг. В северной тайге единично (n=2) обнаруживаются низкие активности (не более 1,5 Бк/кг) в минеральном (горизонт E) и турбированном минеральном субстрате.

В тундре и тайге Западной Сибири наиболее увлажненные позиции заняты органическими почвами (рисунок 5) – торфяными олиготрофными (n=23) и значительно реже эутрофными (n=2) типами.

Ограниченное распространение торфяных эутрофных почв в Западной Сибири отмечалось ранее (Караваева, 1973, 1977) в связи с широким распространением бедных озерно-аллювиальных кварцевых песков, подстилающих торфа и вмещающих слабо минерализованные грунтовые воды.

В отличие от минеральных постлитогенных почв, для которых характерна прочная «необменная» фиксация ^{137}Cs , для торфяных почв характерна сорбция радионуклида по катионообменному типу.

Так же как и в постлитогенных почвах, в торфяных преобладает поверхностно-аккумулятивное распределение ^{137}Cs (рисунок 5 а). Однако оно может нарушаться вследствие его более высокой миграционной способности при очень кислых значениях $\text{pH}_{\text{водн}}$, а также при увеличении ЕКО (голубая линия на рисунке 5).

Для болотных почв северотаежной подзоны отмечается сильная ($r > 0,8$, $n=9$) и умеренная прямая корреляция ($r=0,66$, $n=6$) между ЕКО, которая характеризует поглотительную способность почвы, и величиной удельной активности ^{137}Cs . В торфяных олиготрофных почвах средней тайги (рисунок 5 г, д), несмотря на отсутствие значимой корреляции, при увеличении активности ^{137}Cs в 2-6 раз на

Значимые активности ^{137}Cs (6,8-6,9 Бк/кг) отмечаются в нижних ожелезненных (со значительным количеством ржавых и коричневатых Fe-Mn конкреций) частях стратифицированных горизонтов органико-аккумулятивных и глеевых почв на глубине 24-27 см. Прослой из конкреций

глубине 30-40 см по сравнению с вышележащим слоем, ЕКО также существенно возрастает (в 4-6 раз). Высокая ЕКО определяет более прочную сорбцию радионуклидов в торфяных почвах. В одном из разрезов (рисунок 5 г) торфяной олиготрофной почвы при увеличении ЕКО, возрастает в 2-5 раз содержание ряда химических элементов, в том числе Rb и K – геохимических аналогов ^{137}Cs . Наряду с этим нахождение второго или единственного максимума содержания ^{137}Cs в таежных почвах может быть связано с его накоплением при увеличении $\text{pH}_{\text{водн}}$ более чем на 0,6 единиц в интервалах с 3,3-3,8 до 3,9-4,5 (рисунок 5 б, г, д) на щелочном геохимическом барьере. При этом зольность торфов низкая и не превышает 7%.

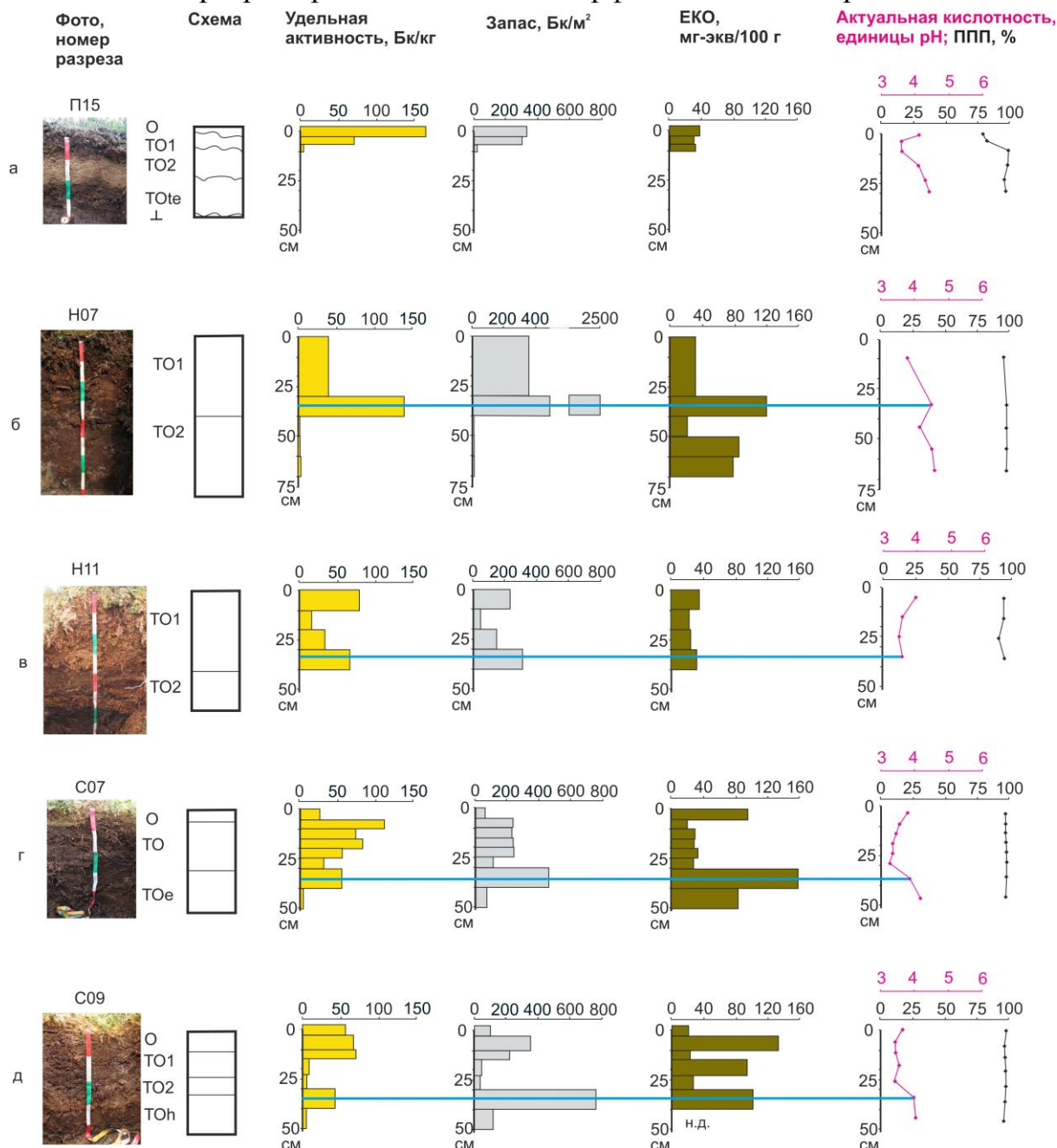


Рис. 5. Физико-химические свойства и вертикальное распределение ^{137}Cs в торфяных олиготрофных почвах таежных ландшафтов

В торфяных почвах тайги максимум активности ^{137}Cs находится на глубине 30-40 см. По данным радиоуглеродного датирования древесных углей из северотаежных участков Пурпе и Ноябрьска, отобранных в краевой части болот, на границе гумусового горизонта подзолов и подбуров и нижней части торфяной

толщи, скорость торфонакопления составляет 2 мм/год (Эколого-геохимический..., 2020). То есть за 10 лет могло сформироваться 2 см торфа, а за 70 лет (с начала первых испытаний ядерного оружия) - 14 см, что подтверждает внутрипрофильную миграцию ^{137}Cs и исключает возможность его захоронения вследствие процесса торфонакопления.

Таким образом, нарушение поверхностно-аккумулятивного распределения в торфяных почвах, как правило, связано с осаждением ^{137}Cs на щелочно-сорбционном геохимическом барьере, который диагностирован по увеличению емкости катионного обмена и величины актуальной кислотности.

Автоморфные почвы (подзолы, подбуры, глееземы, криоземы, органо-криометаморфические и дерново-подзолистые) формируются преимущественно в автономных позициях, реже в трансэлювиальных, и имеют наименьшие ($4,3 \pm 3,9$ см, $n=8$) глубины проникновения ^{137}Cs , поскольку здесь формируются маломощные органомные и гумусовые горизонты, являющиеся сорбционным барьером для радионуклида. *Постлитогенные полугидроморфные почвы* имеют торфяную толщу мощностью более 10 см и среднюю глубину проникновения ^{137}Cs в 3 раза больше: $12,8 \pm 8,8$ см ($n=8$). *Гидроморфные почвы* занимают подчиненные позиции. Для них характерно наибольшее проникновение ^{137}Cs вглубь по почвенному профилю, которое в среднем составляет $17,7 \pm 14,5$ см ($n=31$), поскольку высокая насыщенность этих почв влагой ускоряет процессы конвективного и диффузионного переносов (Лоцилов, 1991; Щеглов, 2000).

В связи с существенным почвенным разнообразием на исследуемых участках и небольшой выборкой по отдельным типам почв, для расчета средней глубины проникновения ^{137}Cs (таблица 1) в отдельных группах почв также использованы данные автора по глубине проникновения ^{137}Cs в почвах южной тундры и лесотундры Западной Сибири и южной тундры и северной тайги Средней Сибири (Усачева, 2017).

Таблица 1.
Глубина проникновения ^{137}Cs в основных типах почв, см

Почвы (число разрезов)		Среднее \pm станд. отклонение
Глееземы	Типичные (10)	$6,5 \pm 6,7$
	Торфяные (11)	$12,1 \pm 5,1$
Криоземы	Типичные (6)	$4,2 \pm 3,3$
	Торфяные (1)	13
Подбуры	Типичные (11)	$9,6 \pm 9,8$
	Торфяные (2)	$12,0 \pm 2,0$
Подзолы	Типичные (2)	$5,5 \pm 0,5$
	Торфяные (4)	$25,5 \pm 12,8$
Криометаморфические	Типичные (0)	-
	Органо (6)	$11,3 \pm 8,7$
Торфяные	Олиготрофные (23)	$16,0 \pm 13,5$
	Эуτροφные (2)	$18,0 \pm 8,0$

В торфяных типах и подтипах почв ^{137}Cs проникает в 1,3-1,5 раз глубже, чем в типичных, что, по-видимому, связано с низкой удерживающей способностью торфов по сравнению с минеральными и органо-минеральными горизонтами, в которых содержание глинистых минералов выше.

Таким образом, нахождение второго или

единственного максимума ^{137}Cs на некоторой глубине в минеральных почвах связано с турбационными процессами, а в торфяных – с его осаждением на щелочно-сорбционном барьере. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs во всех изученных почвах не превышают 200 Бк/кг.

Глава 4. Накопление ^{137}Cs в растительности.

Выделяют 2 основных пути поступления ^{137}Cs в растения. Первый путь – аэральный (первичное поступление), при котором радионуклид попадает из воздуха в результате его осаждения на наземные органы растений (Марей, 1974) за счет ионно-обменных реакций и диффузии. Аэральное поступление ^{137}Cs является доминирующим в период интенсивных атмосферных выпадений радионуклида. Кроме того, радионуклиды, осевшие на почву, могут подниматься ветром или дождем и повторно оседать на растительности. В дальнейшем наибольшее влияние на содержание радионуклида в растениях оказывает его поступление из почвы (вторичное) с почвенными растворами по корневой системе (Марей, 1974, Щеглов, 2000). На поступление ^{137}Cs из почвы в растение влияет множество факторов, основными из которых являются физико-химические и механические свойства почвы, а также количество его обменных соединений (Репях, 2000; Белова, 2009). Так как ^{137}Cs является нуклидом с умеренно пониженной интенсивностью перехода из почв в растения (Парамонова, 2017а), его удельная активность в сосудистых растениях фоновых ландшафтов зачастую находится ниже предела обнаружения γ -спектрометрическим методом (Репях, 2000).

В напочвенном покрове по степени перехвата ^{137}Cs , установлен следующий ряд: травянистые растения и кустарнички < лишайники << мхи (Щеглов, 2000; Щербов, 2000; Михайловская, 2015). Мхи и лишайники, являющиеся индикаторами атмосферного загрязнения различными поллютантами за счет отсутствия корневой системы, накапливают существенные количества радионуклидов, поскольку обладают высокой сорбционной емкостью и прочно фиксируют высокодисперсные радиоактивные частицы. В тундровых и таежных ландшафтах Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин с конца XX века уменьшается удельная активность ^{137}Cs во мхах и лишайниках из-за незначительного поступления радионуклидов и их естественного распада, что соответствует данным по глобальным радиоактивным выпадениям (Sources..., 2010; 2011). Поскольку в настоящее время для древесной растительности фоновых ландшафтов характерны минимальные уровни содержания ^{137}Cs , нами был изучен преимущественно живой напочвенный покров, представляющий собой совокупность мхов, лишайников, травянистых растений и кустарничков, произрастающих на лесопокрытых и непокрытых лесом территориях.

Во всех исследованных ландшафтах, вне зависимости от природной подзоны, средние величины активности ^{137}Cs уменьшаются от бриевых мхов (представители родов *Dicranum* и *Politrichum*) к лишайниковым (*Cladonia* и *Cetraria*), кустарничковым (доминанты *Vaccinium*, *Lédum*, *Rubus chamaemorus*, *Salix polaris*), осоковым (*Erióphorum vaginátum*) и сфагновым (таблица 2), что, вероятно, связано с филогенетическими особенностями накопления металлов (Авессаломова, 2006). С другой стороны, такое распределение может быть связано с принадлежностью многих мхов к калиефильным организмам (Михайловская, 2015), а поведение ^{137}Cs коррелирует с содержанием К (Robison, 2009). Ряд изученных растительных сообществ тундр и тайги Западной Сибири по уменьшению средних величин запасов ^{137}Cs сходен с рядом по активности: зеленомошная и долгомошная > лишайниковая, сфагновая, кустарничковая >> осоковая.

Во мхах родов *Dicranum* и *Politrichum* активность радионуклида больше, чем в сфагновых, что ранее отмечалось на Алтае и Пур-Тазовском междуречье (Щербов, 2000). Среди всех моховых ассоциаций сфагновые характеризуются не только наименьшими средними величинами активности и запасов ^{137}Cs (66 Бк/кг и 162 Бк/м²), но и максимальной вариабельностью: *Cv* составляет 81 и 148% соответственно. По-видимому, относительно низкие уровни накопления ^{137}Cs в сфагновых мхах, связаны с особенностями гидрологического режима болотных экосистем, которые способствуют более быстрому вымыванию радионуклида из сфагнумов (Нифонтова, 2003), по сравнению с бриевыми мхами, произрастающими в лесах.

Таблица 2.

^{137}Cs в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе изученных тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири

Растительная ассоциация	Доминант	Удельная активность, Бк/кг	Запасы, Бк/м ²
Зеленомошная и кустарничково-зеленомошная (3)	<i>Dicranum sp.</i>	$\frac{120 \pm 23}{94-150}$	$\frac{293 \pm 34}{256-337}$
Долгомошная и кустарничково-долгомошная (5)	<i>Politrichum sp.</i>	$\frac{116 \pm 35}{82-165}$	$\frac{302 \pm 99}{96-410}$
Беломошная (5)	<i>Cladonia sp.</i> , <i>Cetraria sp.</i>	$\frac{87 \pm 44}{52-170}$	$\frac{173 \pm 50}{116-237}$
Кустарничковая (8)	<i>Vaccinium, Lédum</i> , <i>Salix p.</i>	$\frac{71 \pm 36}{6-110}$	$\frac{120 \pm 128}{4-410}$
Осоковая (кустарничково-осоковая и осоково-сфагновая) (4)	<i>Erióphorum</i> <i>vaginátum</i>	$\frac{68 \pm 58}{6-150}$	$\frac{30 \pm 25}{4-70}$
Сфагновая и разнотравно-кустарничково-сфагновая (12)	<i>Sphagnum sp.</i>	$\frac{66 \pm 47}{6-165}$	$\frac{162 \pm 219}{4-736}$

Примечание. Над чертой – среднее значение и стандартное отклонение, под чертой – минимум и максимум, в скобках – число проб.

Усредненные величины активности и запасов ^{137}Cs в зональных и болотных ландшафтах тундры и тайги максимальны в напочвенном покрове открытых пространств (таблица 3), они превышают аналогичные показатели в лесных биогеоценозах в 2-3 раза. При этом содержания ^{137}Cs в почвах, сформировавшихся под пологом леса, напротив, характеризуются более высокими величинами, чем непокрытые лесом территории.

Таблица 3.

^{137}Cs в напочвенном покрове изученных местообитаний Западной Сибири

Местообитание	Сомкнутость крон	Активность, Бк/кг	Запасы, Бк/м ²
Лес (8)	0,4–0,7	$\frac{53/98}{0-150}$	$\frac{78/138}{0-337}$
Разреженный лес или опушка (13)	0,1–0,3	$\frac{89/42}{52-160}$	$\frac{203/52}{55-351}$
Открытые местообитания (5)	<0,1	$\frac{94/50}{25-170}$	$\frac{227/93}{13-736}$

На лесные массивы выпадает большее количество осадков, значительная часть которых задерживается кронами (Щеглов, 2000). На открытых пространствах весь выпавший ^{137}Cs попадает сразу на напочвенный покров, минуя верхние ярусы растительности.

Примечание. Над чертой – среднее значение и коэффициент вариации (%), под чертой – минимум и максимум, в скобках – число проб.

Более высокое содержание ^{137}Cs в почвах под лесом подтверждает, что хвойный и лиственный опад пиковых глобальных радиоактивных выпадений полностью разложился. С другой стороны, к

изученным в Западной Сибири открытым местообитаниям или опушкам чаще всего приурочены ландшафты верховых болот, в которых отмечаются оптимальные условия для миграции радионуклида в системе «почва-растение».

От средней тайги к северной в напочвенном покрове увеличивается частота обнаружения высокоактивных (более 100 Бк/кг) проб, что приводит к росту средних величин активности и запасов ^{137}Cs в растениях.

На растительность Западной Сибири в среднем приходится 27% от суммарных запасов в системе «почва-растение» при очень высокой вариабельности ($C_v=95\%$), вклад растительности в суммарное загрязнение ^{137}Cs возрастает от среднетаежных к тундровым ландшафтам (рисунок 6).

Так, в напочвенном покрове средней тайги (Салым, $n=8$) в среднем сосредоточено 4 % от суммарных запасов в ландшафте, южной подзональной полосы северной тайги (Ноябрьск, $n=6$) - 35%, северной подзональной полосы северной тайги (Пурпе, $n=11$) - 36% и в тундре – 39%. По-видимому, такое соотношение связано с особенностями вторичной миграции из почв в растения, зависящим от типа водного режима, зольности торфяных и оторфованных горизонтов и гранулометрического состава почв.

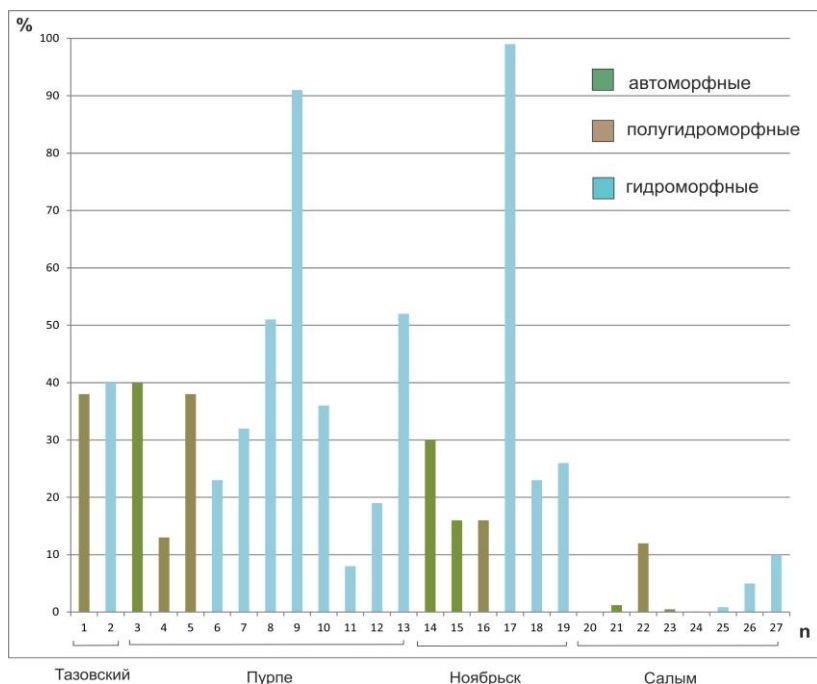


Рис. 6. Вклад напочвенного покрова (%) в суммарное загрязнение ландшафтов (n)

что, вероятно, связано с повышенным содержанием его подвижных форм, характерным для почв легкого гранулометрического состава (Коробова, 2016). Доля запасов радионуклида, приходящаяся на растительность, возрастает от автоморфных почв к гидроморфным, поскольку биологическая доступность ^{137}Cs в торфяных почвах, сформировавшихся в гидроморфных условиях, значительно выше, чем в автоморфных минеральных почвах.

В зональных ландшафтах средней тайги с легкосуглинистыми почвами и породами, на долю растительности приходится, как правило, менее 1% от суммарных запасов ^{137}Cs , что, по-видимому, связано с более тяжелым гранулометрическим составом, способствующим необменной фиксации ^{137}Cs , а также более высокой актуальной кислотностью по сравнению с подзоной северной тайги. В ландшафтах северной тайги на легких песчаных и супесчаных отложениях, доля ^{137}Cs в растительности возрастает,

Глава 5. Особенности накопления ^{137}Cs в ландшафтах и оценка радиационного состояния

Дифференциация латерального распределения ^{137}Cs в ландшафтах на локальном уровне

Слабоконтрастные катены типичной тундры и северной тайги

Радиоцезий слабоконтрастно распределен в трех катенах на двух ключевых участках в типичной тундре и северной тайге. В тундровой катене (рисунок 7) плотность загрязнения ^{137}Cs , преимущественно, варьирует в пределах 400-800 Бк/м² ($L=0,7-1,4$ и $Cv = 25\%$), что отражает его поступление лишь с глобальными выпадениями (Sources..., 2011).

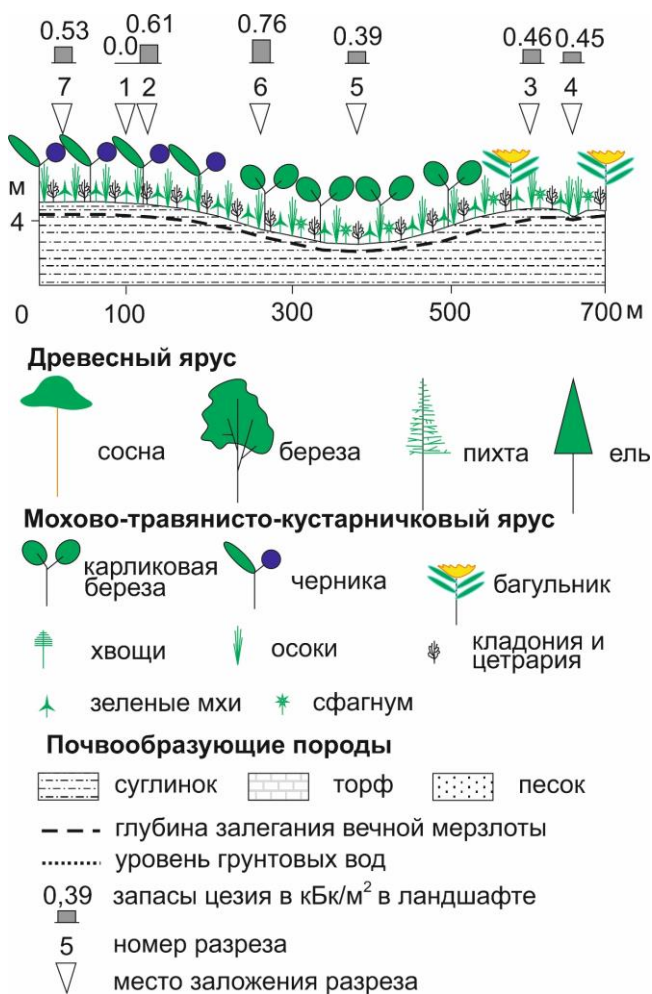


Рис. 7. Типичнотундровая слабоконтрастная катена

^{137}Cs (36%) в гидроморфных условиях отмечалась ранее в почвах хвойных и мелколиственных лесов Брянского полесья и связана с сильной первичной неоднородностью выпадений (Линник, 2008).

Контрастные таежные катены

Общей чертой всех контрастных катен является приуроченность максимума накопления ^{137}Cs к автономному ландшафту, что, по-видимому, также связано с первичной пространственной неоднородностью выпадений радионуклида в условиях минимальной горизонтальной миграции при равнинном или слабовсхолмленном рельефе в лесных ландшафтах (Богачев, 1997).

На пятнах-медальонах существенно снижается плотность загрязнения ^{137}Cs , что, по-видимому, связано с криогенным перемешиванием неактивного минерального материала из нижних горизонтов почвы с верхними. В результате активность ^{137}Cs снижается до уровня ниже инструментально определяемого.

Радионуклиды накапливаются в трансэлювиальной позиции склонов, что, вероятно, связано с нахождением линейного механического барьера. В целом, довольно слабая латеральная миграция в этих ландшафтах в первую очередь определяется низкой расчлененностью рельефа. В слабоконтрастных северотаежных болотных катенах с торфяными олиготрофными почвами под сфагновыми и осоково-сфагновыми ерниками наблюдается сходная латеральная дифференциация: L изменяется от 0,8 до 1,8 (300-700 Бк/м²), при $Cv = 31\%$ в первом случае и от 1 до 2,5 (330-800 Бк/м²) при $Cv = 30\%$ во втором. Схожая вариабельность запаса

В северотаежной катене (рисунок 8, участок Пурпе), несмотря на очень низкую расчлененность рельефа, L варьирует в пределах 0,2-1,0 с максимумом содержания ^{137}Cs в ландшафтах междуречья, представленных борами на подзолах (1100 Бк/м^2) и Cv 42%. Такое распределение, вероятно, связано с интенсивным выносом радионуклидов из очень кислых торфяных почв с величиной $\text{pH}_{\text{водн}}$ ниже 4,0 и слабым выносом из менее кислых подзолов с $\text{pH}_{\text{водн}}$ верхних горизонтов 4,0 – 4,6 (Щеглов, 2000, 2005; Величкин, 2012; Семенов, 2015).

На границе средней и северной тайги (участок Ноябрьск) L изменяется от 0,2 до 1,0 и Cv 50%, при повышенной (1600 Бк/м^2) плотности загрязнения ^{137}Cs в автономных ландшафтах и минимуме в подчиненных (300 Бк/м^2). Вероятно, это связано с более высокими значениями $\text{pH}_{\text{водн}}$ почв автономных ландшафтов, в которых радионуклиды менее подвижны (Щеглов, 2000, 2005; Величкин, 2012).

В среднетаежной катене (участок Салым) L – 0,4-1,0. Несмотря на невысокую вариабельность ($Cv=29\%$) плотности загрязнения радионуклидом, его максимальное содержание (2200 Бк/м^2) больше, чем в аналогичных катенах в 1,4-2,0 раза. Максимум ^{137}Cs содержится в автономном ландшафте (2200 Бк/м^2), минимум – в трансэлювиальном (900 Бк/м^2). Выявлен существенный вынос ^{137}Cs из ландшафтов склонов со смешанным березово-сосновым лесом на органо-аккумулятивной почве, где по-видимому происходит латеральное внутрипочвенное перемещение ^{137}Cs из ландшафтов повышенных элементов рельефа в почвы подчиненных позиций. Отсутствие интенсивного латерального выноса радионуклидов из торфяных олиготрофных почв подчиненных позиций связано с внутрипрофильной аккумуляцией ^{137}Cs в глубинных почвенных слоях за счет вертикального перемещения.

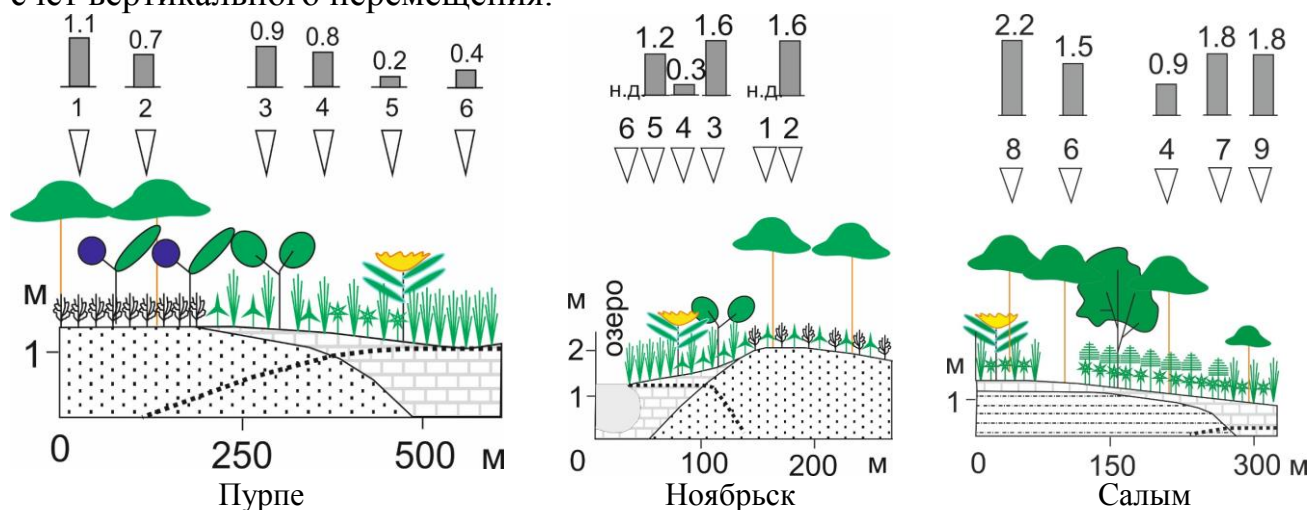


Рис. 8. Контрастные катены северной и средней тайги

Сильноконтрастные катены средней тайги и на границе с ней

На границе средней и северной тайги (рисунок 9, участок Ноябрьск) L изменяется в 10 раз от 0,1 до 1,0. Плотность загрязнения ^{137}Cs варьирует ($Cv=71\%$) в широких пределах от 2860 Бк/м^2 в торфяно-подзолах автономных ландшафтов до 470 Бк/м^2 в торфяных олиготрофных почвах транзитных позиций. В супераквальных ландшафтах также наблюдается накопление в торфяных олиготрофных почвах.

Среднетаежная катена (участок Салым) характеризуется максимальной вариабельностью ($C_v=76\%$) и запасом ^{137}Cs среди всех изученных катен, L изменяется от 0,7 до 3,9. Радионуклид аккумулируется в глееземах (р.5) и органо-аккумулятивных почвах (р.3) супераквальных ландшафтов, где его запасы составляют 3840–5530 Бк/м², при аналогичном показателе в органо-криометаморфических почвах трансэлювиальных ландшафтов (р.1,2) и дерново-подзолистых почвах автономного ландшафта (р.10) – 1050–1430 Бк/м².

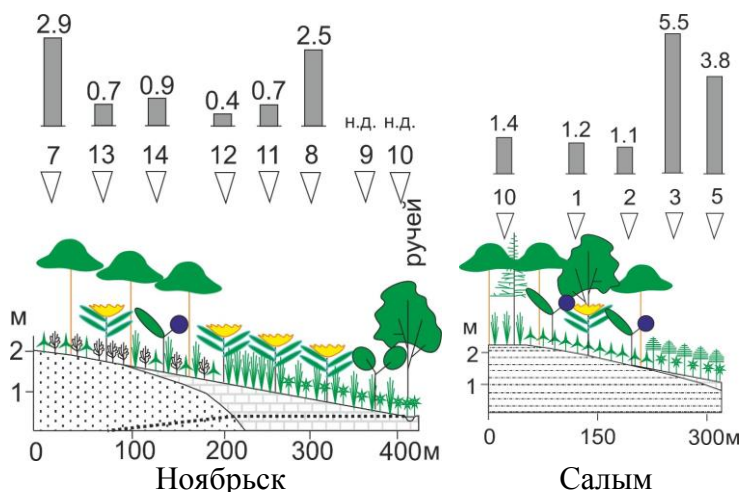


Рис. 9. Сильноконтрастные катены северной и средней тайги

подзолистых и органо-криометаморфических почвах, занимающих вершины и склоны гряд, слой со значимой активностью ^{137}Cs находится на глубине до 10-15 см. С другой стороны, максимальная аккумуляция ^{137}Cs в супераквальных ландшафтах может свидетельствовать о вторичном перераспределении радионуклидов и их вторичном накоплении (Глазовская, 2002; Коробова, 2016).

Таким образом, в тундровых и северотаежных катенах латеральное распределение ^{137}Cs слабоконтрастно, в средней тайге и на границе с ней – более контрастно, что объясняется с одной стороны большей расчлененностью рельефа, с другой – большим разнообразием почв и их свойств на более южных участках, а также существованием латерального биогеохимического барьера для миграции ^{137}Cs в краевых частях болот (Страх, 1999) и тяжелых металлов в почвах подчиненных ландшафтов таежных катен (Авессаломова, 2012; Семенков, 2016).

Дифференциация распределения ^{137}Cs на региональном уровне

В изученных болотных почвах Западной Сибири глубина обнаружения основных количеств ^{137}Cs увеличивается в таежных ландшафтах с севера на юг в 5 раз: от $8,4\pm 2,6$ см – в северной тайге до $45,0\pm 7,1$ см – в средней тайге. В типичной тундре глубина проникновения радионуклида больше, чем в северной подзональной полосе северной тайги, что, скорее всего, связано с маленькой выборкой органогенных почв. Кроме того, в болотных ландшафтах от типичных тундр к средней тайге средние значения плотности загрязнения ^{137}Cs увеличиваются почти в 7 раз: от 262 ± 264 Бк/м² – в типичных тундрах до 1785 ± 17 Бк/м² – в средней тайге (таблица 4).

Сходная, однако менее контрастная, картина отмечается для зональных почв и ландшафтов: по направлению с севера на юг в диапазоне 70° - 60° с.ш. плотность

По-видимому, накопление ^{137}Cs в почвах подчиненных позиций в первую очередь происходит за счет его радиального и латерального внутрипрофильного перемещения по катене. Так, в торфяно-глееземах значимые величины активности и запасов ^{137}Cs обнаружены в образцах, отобранных непрерывно из слоев почвенной колонки до глубины 60 см, а в органо-аккумулятивной почве – до глубины 27 см. В то время, как в дерново-

загрязнения ^{137}Cs увеличивается в 5 раз от 443 ± 240 Бк/м² до 2212 ± 1638 Бк/м², а глубина проникновения радионуклида возрастает в 3-3,5 раза. Такое распределение ^{137}Cs в первую очередь связано с годовым количеством осадков, которое увеличивается от северных широт к южным. Кроме того, существенное влияние оказывает водный режим почв, изменяясь от мерзлотного водозастойного в типичных тундрах до промывного в средней тайге.

В Западной Сибири широтная зональность глобальных радиоактивных выпадений ^{137}Cs и локальные отклонения от нее тесно связаны с закономерностями в распределении осадков (Болтнева, 1977). Прямая связь между годовой суммой осадков и интенсивностью глобальных выпадений ^{137}Cs при подчиненной роли широтной зональности показана на примере тундровых ландшафтов Исландии (Wright, 1999), таежных ландшафтов Швеции (Almgren, 2006), тундровых и таежных ландшафтах Восточной Сибири (Собакин, 2010), а также выявлена при анализе данных наблюдений за период 1954–1976 гг. на 10659 метеостанциях по всему миру (Palsson, 2013).

Таблица 4.

Глубина проникновения ^{137}Cs в почвах (Г) и плотность загрязнения (П) в ландшафтах Западной Сибири

Ландшафты	Постлитогенные зональные			Органогенные болотные			Безморозный период, дней	Годовое количество осадков, мм
	Г, см	П, Бк/м ²	n	Г, см	П, Бк/м ²	n		
Типичная тундра	7,1±5,0	457±237	7	12,0±2,8	262±264	2	50-60	270
Северная тайга	6,1±5,8	878±150	4	8,4±2,6	481±177	13	70-80	490
Граница северной и средней тайги	12,0±15,6	1310±505	3	23,0±13	1134±1032	8	80-90	520
Средняя тайга	21,1±17,2	2212±1638	8	45,0±7,1	1785±17	2	90-100	545

Радионуклиды, высвобождающиеся при минерализации и гумификации растительных остатков, переходят в почву с образованием мобильных металлорганических комплексов (Шошин, 2014). Поскольку процессы минерализации и гумификации протекают на протяжении всего безморозного периода (Тулина, 2010), то чем длиннее безморозный период и биогеохимический потенциал миграции (Касимов, 2009), тем больше в почвах контрастность накопления ^{137}Cs на геохимических барьерах и глубже его проникновение. На одних и тех же участках интенсивность миграции радионуклида в 1,4-2,1 раза выше в болотных ландшафтах, чем в зональных, что в первую очередь связано с поведением микроколичеств радионуклидов аналогично типоморфным элементам (переходу в более подвижное состояние и перераспределение по почвенному профилю) при избыточном увлажнении (Шошин, 2014).

В почвах пробы с активностью ^{137}Cs более 100 Бк/кг диагностированы только в приповерхностных органогенных горизонтах (до глубины 12 см) с зольностью более 12% ($n = 14$), причем частота обнаружения таких проб увеличивается с севера на юг. Относительно высокая зольность в этих горизонтах свидетельствует о наличии достаточного количества глинистых минералов, способных сорбировать большое количество ^{137}Cs . Обратный тренд отмечается для растительности.

Экологическая оценка радиационного состояния ландшафтов

Так же как и в фоновых ландшафтах Восточно-Европейской равнины, Урала и Восточной Сибири (Парамонова, 2008; Собакин, 2010; Михайловская, 2015), в Западной Сибири от типичной тундры к средней тайге плотность загрязнения ^{137}Cs увеличивается в среднем в 5 раз (рисунок 10) и в среднем составляет 400 Бк/м^2 в тундре, 800 Бк/м^2 в северной тайге и 2100 Бк/м^2 в средней тайге.

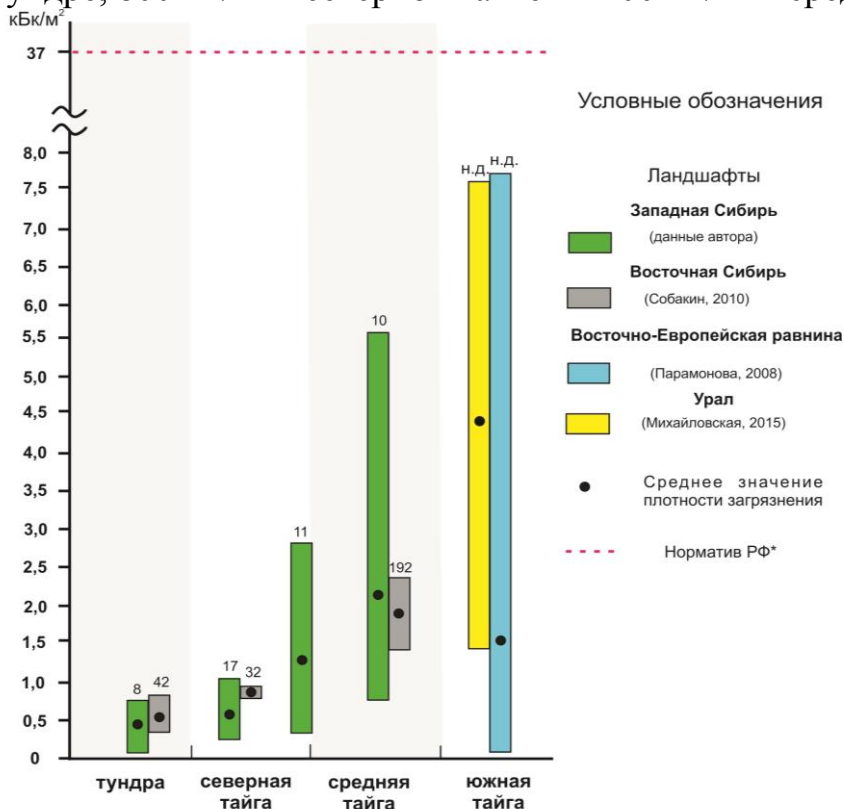


Рис. 10. Плотность загрязнения ^{137}Cs в ландшафтах: среднее и размах.

Цифры над столбцами – количество опробованных почв
* 37 кБк/м^2 – верхняя граница допустимого уровня

установленного в РФ норматива (Закон РФ, 1991), а максимальные – в 7–49.

Таким образом, радиационной фон, обусловленный глобальными выпадениями радиоцезия, является низким. Изученные ландшафты тундры и тайги Западной Сибири не загрязнены ^{137}Cs : средние величины плотности загрязнения не превышают 6% от установленного в РФ норматива, а максимальные – 15%. С течением времени активность и запасы ^{137}Cs в почвах и растительности будут снижаться в связи с естественным распадом радионуклида и его незначительным поступлением из атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Накопление радиоцезия в почвах тундры и тайги Западной Сибири происходит преимущественно в органогенной толще до глубины 20 см. При этом максимальные значения удельной активности ^{137}Cs , как правило, приурочены к верхнему подстилочно-торфяному горизонту и не превышают 200 Бк/кг . Это обусловлено с одной стороны тем, что радионуклиды поступают из атмосферы, с другой стороны тем, что даже незначительное количество глинистых частиц представляют собой сорбционный барьер для ^{137}Cs .

В тундровых и таежных ландшафтах Якутии средний уровень загрязнения ^{137}Cs близок к аналогичным ландшафтам Западной Сибири, однако последние характеризуются существенно большей вариабельностью.

Поскольку для почв и растений отсутствуют нормативы по величине активности ^{137}Cs , а есть только допустимые величины плотности загрязнения радиоцезием почвы, то нормирование идет в соответствии с ними. В фоновых ландшафтах Западной Сибири средние величины плотности загрязнения ^{137}Cs меньше в 17-82 раза от

2. Нарушение поверхностно-аккумулятивного распределения в постлитогенных почвах связано с процессами криогенного массообмена и образованием педотурбаций. Приуроченность значимых уровней активности ^{137}Cs к погребенному и турбированному материалу позволяет идентифицировать почвенные турбации различного генезиса как современные, перемещение которых произошло во второй половине XX века.
3. В очень кислых ($\text{pH}_{\text{водн}} 3,3-4,2$) торфяных олиготрофных почвах ^{137}Cs активнее мигрирует, чем в кислых ($\text{pH}_{\text{водн}} 4,0-5,0$) альфегумусовых, глеевых, криометаморфических, криотурбированных и текстурно-дифференцированных почвах.
4. Средние величины активности ^{137}Cs в растительных сообществах тундры и тайги Западной Сибири уменьшаются в ряду: зеленомошная и долгомошная >> лишайниковая > кустарничковая, осоковая, сфагновая. Более высокие уровни радиоактивности во мхах и лишайниках определяются филогенетическими особенностями растений, проявляющимися в процессе накопления радионуклидов. Выявленная закономерность отмечалась и ранее для других регионов России.
5. Частота встречаемости уровней активности, превышающей 100 Бк/кг, в пробах растительности увеличивается от средней тайги к северной, что приводит к росту средних величин активности и запасов ^{137}Cs в напочвенном покрове. Вклад растительности в суммарное загрязнение радиоцезием системы «почва-растение» возрастает от 4% в средней тайге до 39% в тундре.
6. Процессы латерального перераспределения ^{137}Cs в катенах выражены слабо. Пространственная вариабельность запасов радиоцезия в ландшафтах преимущественно связана с первичной неоднородностью радиоактивных выпадений. Контрастность латерального распределения ^{137}Cs в почвах увеличивается от тундровых к среднетаежным ландшафтам, что объясняется с одной стороны большей степенью расчлененности рельефа, с другой – бóльшим разнообразием почв и их свойств на южных участках.
7. На региональном уровне в изученных зональных и болотных ландшафтах Западной Сибири глубина обнаружения значимой активности ^{137}Cs в почвах увеличивается с севера на юг в 3,5-5 раз, а средние запасы радионуклида – в 5-7 раз. Такое распределение ^{137}Cs , в первую очередь, связано с годовым количеством осадков, которое увеличивается от северных широт к южным. Существенное влияние оказывает водный режим почв, изменяясь от мерзлотного водозастойного в типичных тундрах до промывного в средней тайге. Также влияет и продолжительность безморозного периода, во время которого происходит минерализация и гумификация растительных остатков, способствующие накоплению и проникновению ^{137}Cs непосредственно в почву.
8. Испытания на Семипалатинском и Новоземельском полигонах, а также авария на ПО «Маяк» существенно не повлияли на радиационное состояние тундровых и таежных ландшафтов Западной Сибири, в связи с их удаленностью на 800-2100 км от ключевых участков. Средние и максимальные величины плотности загрязнения ^{137}Cs в почвах значительно ниже предельно допустимой величины, поскольку основное поступление ^{137}Cs в изученные ландшафты связано с глобальными радиоактивными выпадениями.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Семенов, И.Н. Цезий как маркер современных почвенных турбаций / И.Н. Семенов, А.А. Усачева // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №10 – Выпуск 7. – С.1478-1481.
2. Семенов, И.Н. Обская макроарена как источник загрязнения Карского моря цезием-137 глобальных выпадений/ И.Н. Семенов, А.Ю. Мирошников, Эн.Э. Асадулин, А.А. Усачева, В.И. Величкин, Н.П. Лаверов // *Доклады Академии наук* – 2015. – Т. 463. – № 1. – С. 99–101.
3. Семенов, И.Н. Распределение цезия-137 глобальных выпадений в таежных и тундровых катенах бассейна реки Обь / И.Н. Семенов, А.Ю. Мирошников, А.А. Усачева // *Геология рудных месторождений*. – 2015. – Т. 57. – № 2. – С. 154–173.
4. Усачева, А.А. Распределение ^{137}Cs в растениях и почвах фоновых западно-сибирских ландшафтов тундры и тайги / А.А. Усачева, И.Н. Семенов, А.Ю. Мирошников // *Успехи современного естествознания* – 2016. – № 9. – С. 185–189.

Другие публикации

1. Усачева, А.А. ^{137}Cs в растениях и почвах таежных и тундровых ландшафтов Западной и Средней Сибири / А.А. Усачева, И.Н. Семенов // *Геохимия ландшафтов. К 100-летию со дня рождения Александра Ильича Перельмана* – АПР Москва, 2017. – С. 498–521.
2. Семенов, И.Н. Применимость ^{137}Cs для выявления современных криотурбаций в почвах таежной зоны Западной Сибири / И.Н. Семенов, А.А. Усачева // *ЛОМОНОСОВ-2013: XX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Секция «Почвоведение»*– М.: МАКС Пресс, 2013. – С. 85-86
3. Semenov I.N., Current Turbation Identification in Podzols of Western Siberia/ I.N. Semenov, А.А. Usacheva // *International conference «Earth Cryology: XXI Century» Pushchino, 2013.* – P. 119
4. Усачева А.А. Радиальное распределение цезия-137 глобальных атмосферных выпадений в фоновых бореальных ландшафтах юга Ямало-Ненецкого автономного округа./ А.А. Усачева, И.Н. Семенов.// *Материалы Третьей Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»* – М.: ИГЕМ РАН, 2013. – С. 226-229.
5. Usacheva A. Cesium-137 as a tracer of soil turbation: example of the taiga landscapes of the Western Siberia, Russia / А.А. Usacheva, I.N. Semenov, // *International conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, Barcelona (<http://radioactivity2014.pacifico-meetings.com/>)*
6. Усачева А.А. Цезий-137 в фоновых ландшафтах тундровой и таежной зон / А.А. Усачева, И.Н. Семенов // *Материалы Пятой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»* – М.: ИГЕМ РАН, 2015. – С. 242-245.
7. Усачева А.А. Цезий-137 в растительности севера Европейской территории России и Западной Сибири / А.А. Усачева, И.Н. Семенов // *Материалы Шестой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»* – М.: ИГЕМ РАН, 2016 – С. 340-342.
8. Усачева А.А. Цезий-137 в мохово-травянисто-кустарничковом ярусе фоновых ландшафтов тундры и тайги центра Западной Сибири/ А.А. Усачева, И.Н. Семенов // *Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Доклады Всероссийской научной конференции, Москва, 18-20 октября 2016 г* – Изд-во МГУ. 2016.
9. Усачева. А.А. Распределение радиоцезия в фоновых тундровых и таежных ландшафтах Западной Сибири / А.А. Усачева // *X-ая Международная конференция «Образование и наука для устойчивого развития»* – М., 2018. – С. 25-28.
10. Усачева А.А. ^{137}Cs в ландшафтах тундры и тайги Западной Сибири / А.А. Усачева // *Металлогения древних и современных океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений. Научное издание.* – Миасс: ООО «Форт-Диалог-Исеть», 2019. –С. 288-290.