

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

На правах рукописи

Попова Евгения Павловна

**РОЛЬ КОРНЕВЫХ СИСТЕМ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ^{137}Cs В ПОЧВАХ**

Специальность 03.02.08 – Экология (по отраслям) (биол. науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель: **Щеглов Алексей Иванович**
доктор биологических наук

Официальные оппоненты: **Переволоцкий Александр Николаевич,**
доктор биологических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории математического
моделирования и программно-
информационного обеспечения ФГБНУ
ВНИИРАЭ

Хомяков Дмитрий Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой агроинформатики
факультета почвоведения Московского
государственного университета имени
М.В. Ломоносова

Богатырев Лев Георгиевич, кандидат
биологических наук, доцент кафедры
общего почвоведения факультета почвоведения
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова

Защита состоится «26» ноября 2019 года в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.03.05 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП–1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, аудитория М-2.

E-mail: mmakarov@soil.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/203645852/>

Автореферат разослан «21» октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

Ковалева Наталия Олеговна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Все искусственные радионуклиды, поступающие на поверхность почвенного покрова из атмосферы, как правило, сосредотачиваются в верхнем слое, редко превышающем 30 см (Щеглов, 2000; Nimis et al., 1996; Winkelbauer, Matthias 2012; Konoplev, 2016; Ohte et al., 2016; Kocadag, Nimis et al., 2017). Вместе с тем, мониторинг территорий, подвергшихся значимому радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС свидетельствует о возрастании объемной активности радионуклидов чернобыльского выброса, в частности ^{137}Cs , в грунтовых водах ряда районов Брянской области (Госдоклад, 2008). При этом в ряде работ отмечается, что в почвах лесных территорий миграционная подвижность ^{137}Cs выше, чем в почвах травянистых экосистем (Konoplev, 2016). Очевидно, что миграция радиоцезия (^{137}Cs) представляет собой сложный комплексный процесс, определяющийся совокупностью разнообразных факторов, включающих как химические свойства и физико-химическое состояние радионуклида, так и характеристики экосистемы, такие как состав и свойства почв, особенности рельефа и геологии и ряд других. (Алексахин, 1963; Алексахин и др. 1992; Щеглов, 2000; Щеглов, Цветнова, 2002). Среди рассматриваемого комплекса процессов, обуславливающих миграцию ^{137}Cs , в наименьшей степени оценена роль корневых систем растений, в особенности древесных, имеющих значительную биомассу и глубину распространения в почве, что обеспечивает большее заглубление радионуклида. Вместе с тем, работ, рассматривающих влияния корней на миграцию радионуклидов, крайне мало (Щеглов, 2000; Машихин, 2001; Булгаков, Коноплев, 2002; Торшин, Фокин, 2008 и др.).

В связи с этим целью настоящей работы является оценка роли корневых систем древесных растений в миграции радиоцезия (^{137}Cs) в почвах лесных экосистем.

В задачи исследования входило:

1. Оценка удельной активности ^{137}Cs в корнях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Bétula péndula* Roth) и вмещающей почвенной массе в различных слоях корнеобитаемой толщи лесных фитоценозов Красногорского района Брянской области.
2. Оценка накопления радиоцезия (^{137}Cs) в различных фракциях корней сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Bétula péndula* Roth) в натурных исследованиях лесных фитоценозов исследуемого региона.
3. Оценка вклада ^{137}Cs , аккумулированного в корнях древесных растений-эдификаторов, в суммарный запас ^{137}Cs в различных слоях почвенного профиля в лесных фитоценозах Красногорского района Брянской области.
4. Количественная оценка поступления исследуемого радионуклида в корнеобитаемую среду в составе корневых выделений и корневого опада
5. Оценка возможности перемещения радионуклида в водной пленке на поверхности корневых систем в условиях модельных экспериментов с саженцами древесных растений.

Научная новизна исследования. В условиях модельных экспериментов проведена оценка поступления ^{137}Cs в корнеобитаемую среду с корневыми выделениями и корневым опадом. Впервые для древесных растений при оценке роли корневых систем в геохимической миграции ^{137}Cs использован методологический подход, предусматривающий проведение параллельных нативных изысканий и модельных экспериментов. Соответствующие модельные эксперименты с использованными видами древесных растений ранее не проводились. На основе полевых и модельных экспериментов дана количественная оценка накопления и распределения ^{137}Cs в корневой системе древесных растений-эдификаторов, их вклада в перераспределении радионуклида в почвах лесных ландшафтов.

Практическая значимость исследования. Полученные количественные показатели поступления ^{137}Cs в почву с прижизненными корневыми выделениями и корневым опадом древесных растений вносят значимый вклад в оценку биогеохимических потоков (БГХ) ^{137}Cs в лесных биогеоценозах. Учет этих потоков в БГХ циклах позволит повысить надежность прогностических моделей поведения техногенных радионуклидов в лесных экосистемах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Удельная активность ^{137}Cs в корнях древесных растений неодинакова и меняется в зависимости от их диаметра. При этом удельная активность ^{137}Cs соответствующих фракций корней меняется с глубиной значительно меньше, чем удельная активность ^{137}Cs в соответствующих почвенных слоях.
2. Содержание ^{137}Cs в биомассе корневых систем древесных растений вносит значимый вклад в суммарный запас этого радионуклида, как в отдельных слоях, так и почвенном профиле в целом.
3. Корневые выделения являются одним из существенных процессов, определяющих нисходящую миграцию ^{137}Cs в почвенном профиле, вклад которого превышает ежегодное поступление этого радионуклида за счет корневого опада.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на заседаниях кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова. Положения работы были представлены на российских и международных конференциях: XX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2013» (Москва, 2013 г.); XXII международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2015» (Москва, 2015 г.); Генеральной ассамблее Европейского Союза наук о Земле (European Geosciences Union–EGU, 2015).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 печатных работ, из которых 3 статьи в рецензируемых научных журналах, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 03.02.08 – экология.

Личный вклад автора. Работа является результатом оригинальных исследований. Автором самостоятельно были осуществлены: планирование и постановка модельных экспериментов, отбор проб, проведение анализов в лабораторных условиях, математическая и статистическая обработка и интерпретация результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы, включающего 162 источников, из них 70 – зарубежные. Диссертация изложена на 126 машинописных страницах, включает 16 рисунков, 43 таблицы.

Благодарности. Автор выражает сердечную благодарность своему научному руководителю Щеглову Алексею Ивановичу за неоценимую помощь на протяжении всей работы, а также преподавательскому составу Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Автор признателен Касацкому А.А., Анисимову В.С., Цветновой О.Б., Мамихину С.В. и Парамоновой Т.А. за помощь в исследовании, ценные советы и замечания. Отдельную благодарность автор выражает своей семье за безграничную поддержку и понимание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объекты и методы исследования

Нативные исследования проводились на участках долговременного радиоэкологического мониторинга кафедры радиоэкологии и экотоксикологии МГУ в хвойных и лиственных фитоценозах Красногорского района Брянской области, подвергшихся значительному радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. На этих участках выбирали модельные деревья (сосна, береза) в направлении от

ствола которых закладывали траншеи на ширину кроны. Из нее послойно каждые 10 см отбирали образцы почвы до глубины 30-50 см с корнями древесных растений-эдикаторов с последующим фракционированием и отмывкой и корней разного диаметра: 0–3, 3–10, 10–20 и >20 мм. Определяли биомассу каждой фракции в слоях и суммарную биомассу корней.

Одновременно с пробами корней из каждого 0–10-сантиметрового слоя отбирали образцы почвы для определения удельной активности ^{137}Cs . Подготовленные образцы корней и почв высушивали при температуре 105° и размалывали на мельнице до однородной массы. Удельную активность определяли в 3-кратной повторности на гамма-анализаторе со сцинтилляционным NaI (Tl) детектором с использованием программного обеспечения «Прогресс 5.1».

Модельные эксперименты.

1. *Модельный эксперимент с внесением ^{137}Cs на поверхность хвои саженцев сосны обыкновенной.* Основная цель эксперимента - оценка количества радионуклида, поступающего в корнеобитаемую среду (почву/вытяжку) в результате деятельности корневых систем. Эксперимент включал внесение хлористого радиоцезия (^{137}Cs) ($3,718 \cdot 10^6$ Бк) на поверхность хвои молодых деревьев сосны обыкновенной, помещенных в сосуды (рис.1).



Рис. 1. Схема конструкции модельного эксперимента с почвенной (слева) и водной культурами (справа) сосны обыкновенной.

При этом создавались условия, при которых единственным путем поступления ^{137}Cs в почву являлась его миграция за счет корневых систем после внекорневого поглощения и перераспределения между структурными компонентами растений. Это обеспечивалось изоляцией сосуда от попадания радионуклида на поверхность почвы в составе кроновых, стволовых вод и опада. Параллельно проводили эксперимент с «водной» культурой сосны обыкновенной, помещенной в почвенную вытяжку. Аэрация и постоянное перемешивание раствора обеспечивалась с помощью маломощного компрессора (рис.1). Длительность эксперимента с почвенной культурой сосны составила 45 суток, с водной культурой – 12 суток. Удельную активность ^{137}Cs измеряли на гамма-спектрометре DeskTop InSpector Model 1270 с полупроводниковым детектором из особо чистого германия (ППД ОЧГ(HPGe)), с использованием программы обработки гамма-спектров: Genie.2000.

2. *Модельный эксперимент с изолированным питанием ели обыкновенной в растворах.* Основная цель данного эксперимента - оценка количества ^{137}Cs поступающего в чистый раствор за счет корневых выделений и возможности перемещения радионуклида по поверхностной водной пленке корневых систем. Эксперимент заключался в разделении корневой системы саженца ели обыкновенной примерно на две части и помещение одной из них в 0,5 литровый сосуд с чистым питательным раствором, а другой – в аналогичный сосуд с почвенной вытяжкой (рис. 2), содержащий ^{137}Cs с активностью 1237 ± 131 Бк/кг. Сверху сосуды с растворами накрывали специальными крышками, исключая внешнее загрязнение. Для аэрации растворов использовали многоканальный компрессор JEBO LifeTech 9860 Q с производительностью каждого канала 3 л/мин. Данный эксперимент проводился в 4-х кратной повторности с контролем. Длительность эксперимента составляла 7 суток. Измерение удельной активности ^{137}Cs в растительных образцах, а также растворах производили при помощи гамма-спектрометрии с использованием

спектрометра энергии гамма-излучения полупроводникового ГАММА-1П (полупроводниковый детектор типа GEM-38195 Ortee) с нижним порогом регистрации 0,9 Бк.

Постановка модельного эксперимента такого типа предполагает два возможных пути попадания радиоцезия (^{137}Cs) в чистый питательный раствор – за счет корневых выделений и за счет перемещения радионуклида в водной пленке на поверхности корневых систем.

Для оценки перемещения ^{137}Cs в водной пленке по поверхности корней

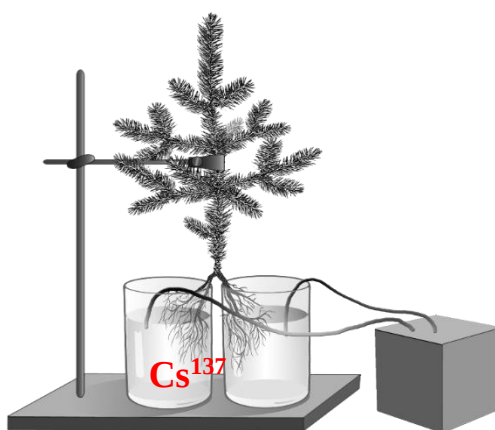


Рис. 2. Схема конструкции модельного эксперимента с растворами

дополнительно был поставлен аналогичный модельный эксперимент с мертвым корнем ели. Для этого было осуществлено разделение корневой системы мертвой ели на две части и по аналогии с основным экспериментом одну поместили в сосуд с чистым питательным раствором, другую с раствором, в котором присутствовал радиоцезий. В этом случае перемещение радионуклида из загрязненного раствора в чистый было возможно лишь за счет движения ^{137}Cs в пленке на поверхности корней, поскольку в мертвых корнях поглощение питательных веществ, как и процессы выделения экссудатов, отсутствуют.

3. *Модельный эксперимент с саженцами ели обыкновенной в почвогрунте.* Цель данного эксперимента – сравнение поглощения ^{137}Cs саженцами ели из почвогрунта и вытяжки. По аналогии с предшествующим

экспериментом использовались саженцы ели обыкновенной высотой около 30 см, которые высаживали в почвогрунт (рН водн. 4,6; N 250 мг/л; K 330 мг/л; P 180 мг/л; Сорг -9%). В ходе модельного эксперимента образцы ели высаживали в сосуды без дренажных отверстий и вносили в каждый по 500 мл активного раствора. Растения насыщались ^{137}Cs вследствие корневого потребления радионуклида из почвогрунта при поливах, а отсутствие отверстий исключало потери ^{137}Cs . Для предотвращения пересыхания системы по мере необходимости производили полив чистой водой. Повторность эксперимента – 4-х кратная, срок эксперимента варьировал от 3-х до 10 недель. После этого установку разбирали, образцы ели разделяли на структурные компоненты: хвоя, ветви, ствол, корень, а ствол саженцев – на кору и древесину. Затем полученные пробы почвы и ели высушивали и в них определяли удельную активность ^{137}Cs . Измерения проводили на гамма-анализаторе со сцинтилляционным NaI (Tl) детектором с использованием программного обеспечения «Прогресс 5.1».

Результаты и обсуждение

Результаты полевых исследований. Суммарная плотность загрязнения корнеобитаемой толщи почв по ^{137}Cs составила соответственно 4411,4 и 2731,1 кБк/м² с вариациями по почвенным слоям от 3,7 до 3631,5 кБк/м² в сосняке и от 195,5 до 1455,3 кБк/м² в березняке. При этом наибольшие запасы ^{137}Cs обнаружены в 0-10 см слое исследуемых почв (рис. 3). Фитомасса корней древесных растений – эдификаторов в 0 – (30) 50 см толще почв рассматриваемых растительных сообществ различалась примерно в 1,5 раза и составляла 5,2 кг/м² в березняке и 3,3 кг/м² – в сосняке. Наибольший вклад в суммарную биомассу вносят крупные фракции диаметром 10 – 20 и > 20 мм; вклад остальных фракций менее значим. Следует подчеркнуть, что распределение по профилю почв корней различного диаметра у березы и сосны также заметно различается.

Так, у сосны наибольшее количество корней всех размеров сосредоточено в верхнем (0-10) см слое почв, вниз по профилю оно заметно снижается (рис. 4). У березы в отличие от сосны распределение корней характеризуется большим заглублением и наличием 3-х максимумов на глубинах 0-10, 20-30 и 40-50 см (рис. 5).

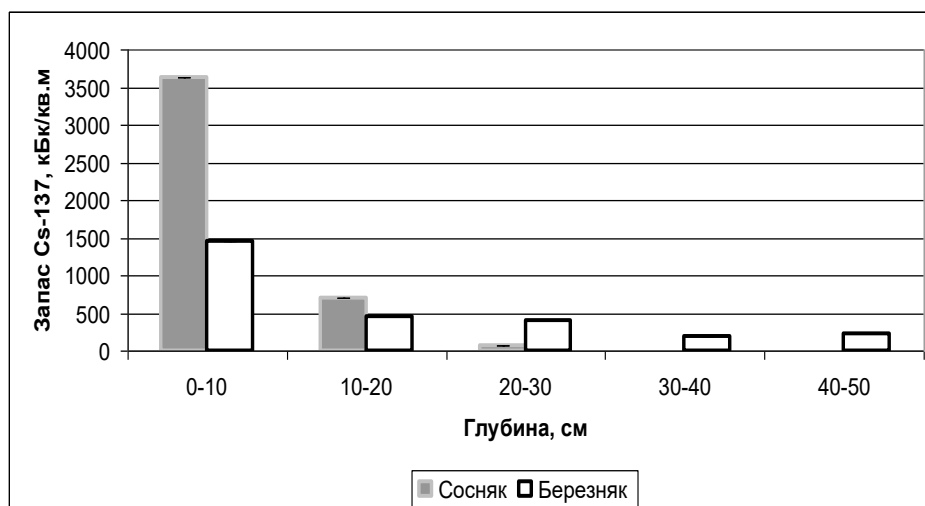


Рис. 3. Запасы ^{137}Cs в различных слоях почвенного профиля исследуемых фитоценозов

Определение удельной активности ^{137}Cs в корнях различных фракций выявило зависимость этого показателя от их диаметра. Так, его наименьшее значение характерно для крупных, а наибольшее – для мелких фракций корней (табл. 1). На фоне общих закономерностей в накоплении ^{137}Cs различными фракциями корней сосны и березы наблюдаются и заметные различия.

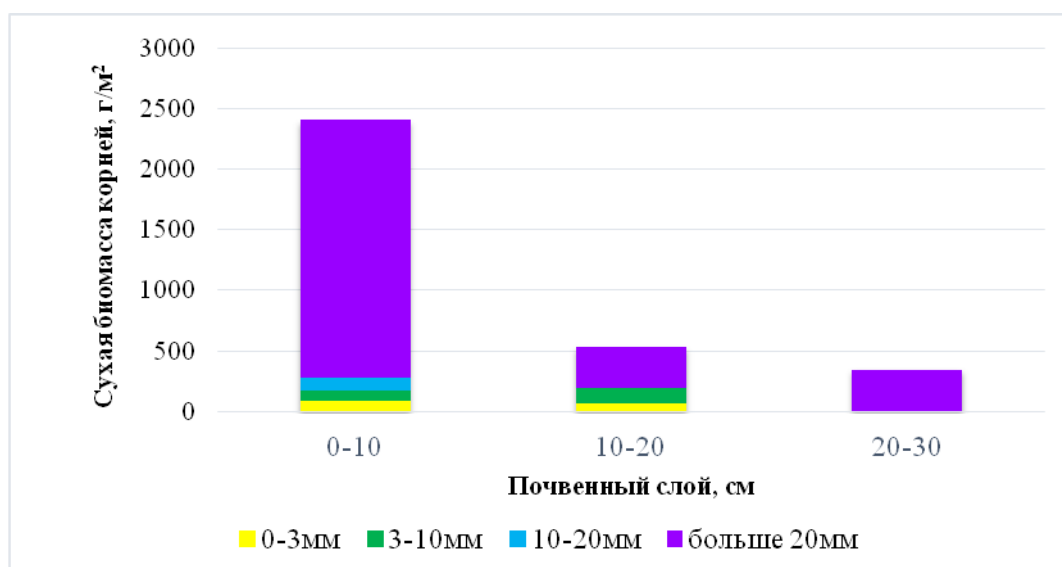


Рис. 4. Распределение запасов биомассы различных фракций корней сосны обыкновенной в сосняке-зеленомошнике по профилю почв.

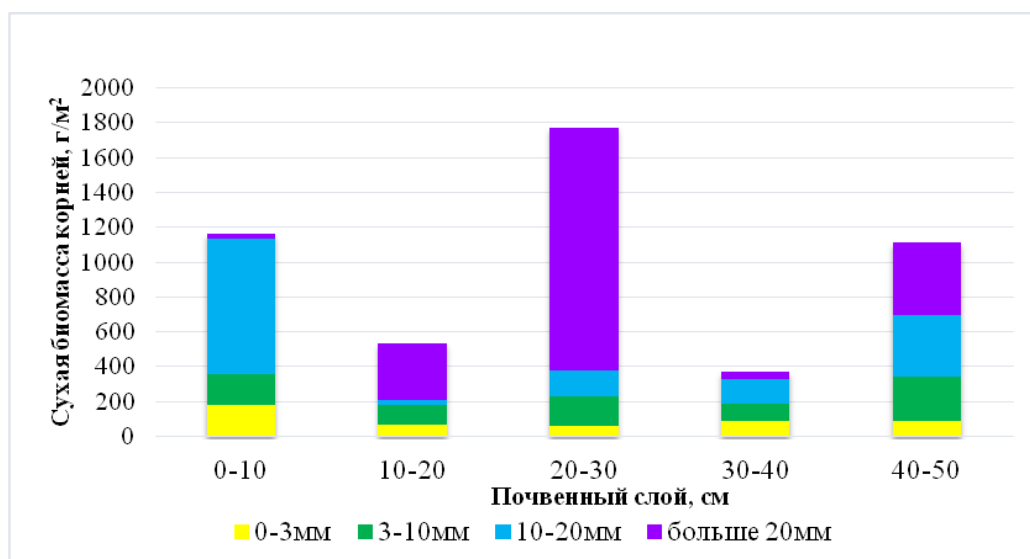


Рис. 5. Распределение запасов биомассы различных фракций корней березы повислой в березняке злаково-разнотравном по профилю почв.

Так, удельная активность ^{137}Cs в корнях березы в зависимости от глубины их залегания и размера фракции варьирует от 5,2 до 37,3 кБк/кг. Максимальные величины этого показателя отмечаются в тонких корнях (0-3 мм), локализованных в самом поверхностном почвенном слое (0-10 см). С глубиной наблюдается заметное падение удельной активности радионуклида, особенно в тонких фракциях корней.

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs в различных фракциях корней сосны и березы в 0-50 см толще почв исследуемых биогеоценозов, кБк/кг

Слой, см	Фракции корней (диаметр, мм)				Почвенная масса
	0-3	3-10	10-20	> 20	
Береза					
0-10	37,3 ± 3,7	11,0 ± 1,1	9,5 ± 0,9	-	10,50 ± 1,20
10-20	21,2 ± 2,1	10,7 ± 1,1	-	7,7 ± 0,8	3,16 ± 0,47
20-30	19,8 ± 2,0	10,6 ± 1,0	6,9 ± 0,7	6,5 ± 0,7	2,58 ± 0,33
30-40	16,1 ± 1,6	9,7 ± 1,0	6,0 ± 0,6	-	1,16 ± 0,17
40-50	14,9 ± 1,5	8,6 ± 0,8	5,9 ± 0,6	5,2 ± 0,5	1,30 ± 0,20
Сосна					
0-10	45,4 ± 4,5	55,74 ± 5,19	17,0 ± 1,7	10,1 ± 1,0	27,00 ± 3,00
10-20	46,8 ± 4,6	56,41 ± 5,71	-	11,2 ± 1,1	3,80 ± 0,05
20-30	46,5 ± 4,8	57,10 ± 5,69	-	13,7 ± 1,3	0,40 ± 0,07

Удельная активность $^{137}\text{Cs} \pm$ ошибка измерения

Удельная активность ^{137}Cs в корнях сосны и ее изменение в зависимости от вышеуказанных факторов характеризуется более высокими показателями, но несколько меньшим размахом их колебаний – 11,2 - 57,1 кБк/кг. При этом максимальная активность отмечается во фракциях наименьшего и среднего диаметров (0-3 мм и 3-10 мм), а минимальная - в корнях диаметром >20 мм. При этом в почвенном профиле с глубиной удельная активность ^{137}Cs в соответствующих фракциях корней сосны, в отличие от березы, изменяется мало. Отмеченные различия в удельной активности ^{137}Cs в различных фракциях корней объясняются тем, что радиоцезий, как и другие металлы распределяется между тканями растений неравномерно. Большая его часть аккумулируется в ризодерме, коре или эндодерме (Щеглов, 2000; Титов и др. 2011). В свою очередь соотношение различных тканей в корнях исследуемых фракций неодинаково - долевой вклад коры в мелких корнях выше, чем в крупных. Это, по всей видимости, и обеспечивает в них наибольшую удельную активность ^{137}Cs .

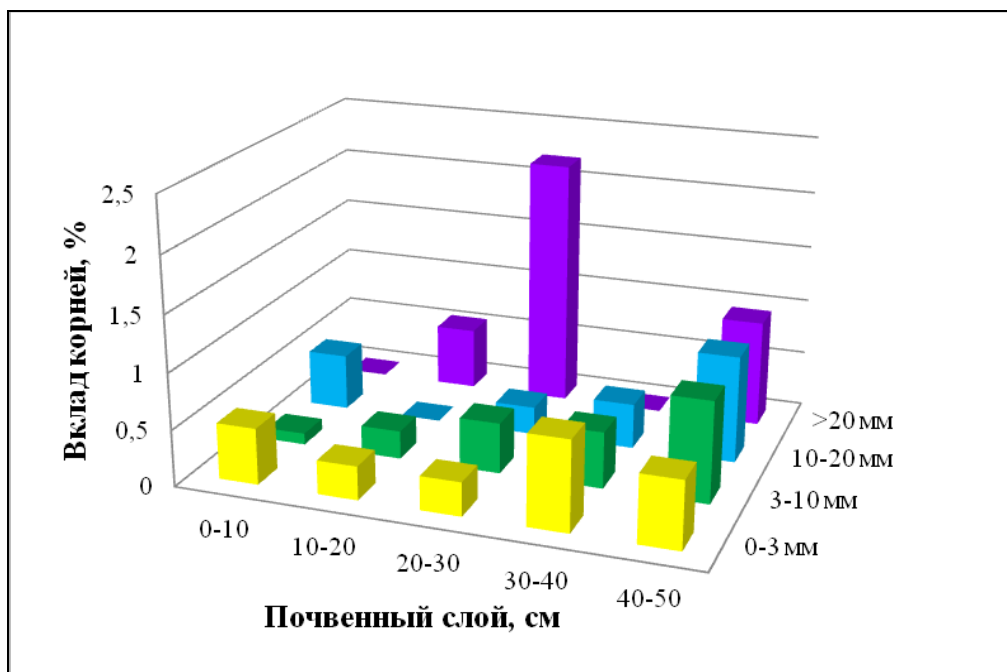


Рис. 6. Вклад запаса ^{137}Cs в различных фракциях корней березы повислой в суммарный запас радионуклида в слоях корнеобитаемой толщи березняка

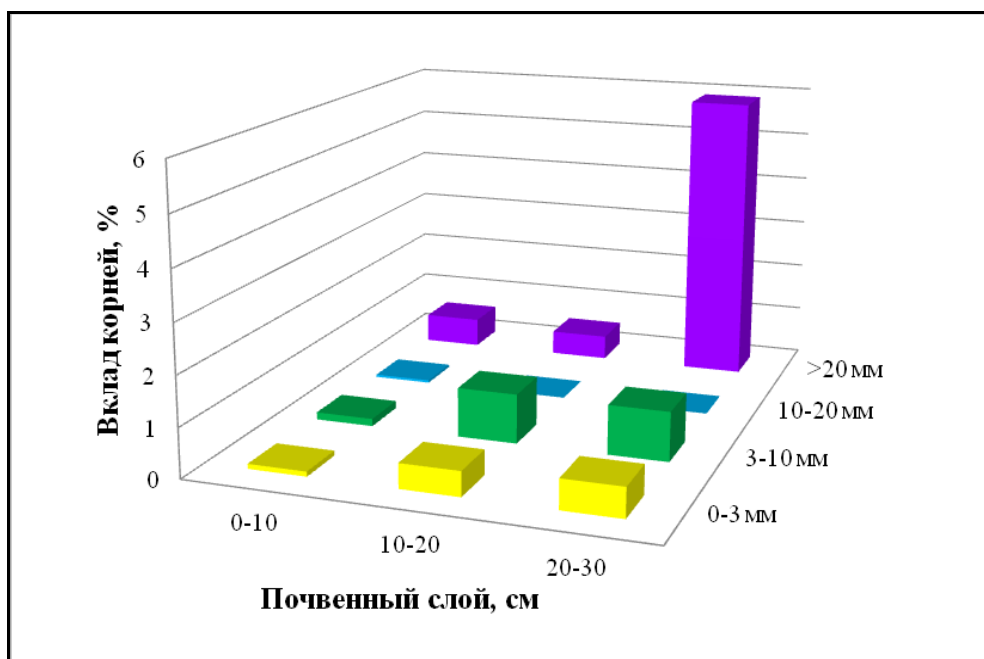


Рис. 7. Вклад запаса ^{137}Cs в различных фракциях корней сосны обыкновенной в суммарный запас радионуклида в слоях корнеобитаемой толщи сосняка

Расчет вклада запасов ^{137}Cs в корнях различных фракций в суммарный запас радионуклида в исследуемых слоях корнеобитаемой толщи показал, что в березняке вклад корней березы в зависимости от слоя изменяется от 1,1% до 3,4 %, при этом наибольший вклад вносит крупная фракция более 20

мм (рис. 6). В сосняке вклад корней сосны в общий запас ^{137}Cs в 0-30 см корнеобитаемой толщи в зависимости от слоя колеблется от 0,9 % до 7,5 % и нарастает с глубиной (рис. 7).

В целом, полученные данные свидетельствуют о том, что удельная активность ^{137}Cs в биомассе корней выше, чем во вмещающей почвенной массе, при этом с глубиной данные различия возрастают. Это и определяет увеличение вклада корней в суммарный запас радионуклида в более глубоких слоях. Вместе с тем полевые исследования не позволяют в полной мере оценить вклад подземных органов растений в запас и поступление радиоцезия в различные почвенные слои, поскольку при существующих методах пробоотбора неизбежна потеря самых тонких и активных фракций корней. Кроме того, применяемые методы не обеспечивают учет поступления в почву химических элементов в составе экссудатов, количество которых по массе может превышать массу всей корневой системы растения (Головко, 1989; Хомяков, 2009).

Результаты модельного эксперимента с внесением ^{137}Cs в крону саженцев сосны обыкновенной. Проведенные исследования показали, что до начала постановки эксперимента удельная активность ^{137}Cs в почве и почвенном растворе находилась на нижнем пределе обнаружения (4 Бк/кг), удельная активность хвои, мелких ветвей, ствола и корней сосны составляла 5-8 Бк/кг. Таким образом, все исследуемые показатели до начала эксперимента соответствовали «фоновым» значениям.

После завершения эксперимента, длившегося 45 дней, было установлено, что удельная активность ^{137}Cs во всех компонентах модельных систем значительно возросла: в опыте с почвенной культурой в среднем на 5-6 порядков для структур надземной части и более чем в 10 раз для корней. При этом также возросла удельная активность радионуклида в почвенной массе, в среднем в 24 раза (табл. 2).

Очевидно, что отмеченные изменения обусловлены внешним загрязнением и перераспределением ^{137}Cs в системе «вмещающая среда – растение».

Таблица 2. Удельная активность и общие запасы ^{137}Cs в компонентах исследуемых систем

Компонент экосистемы	Масса вещества, г	Удельная активность, Бк/г	Запас, Бк/система
Почвенная культура*			
Хвоя	31,1	$7,1 \times 10^3$	$2,2 \times 10^5$
Ветви	16,3	$6,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^5$
Ствол	14,3	$7,9 \times 10^2$	$1,1 \times 10^4$
Надземная часть	61,7	$5,4 \times 10^3$	$3,3 \times 10^5$
Корни	10,9	$0,4 \times 10^2$	$4,4 \times 10^2$
Почва	10680	0,98	$1,1 \times 10^3$
Система в целом	10725,2	-	$3,3 \times 10^5$
Водная культура			
Хвоя	41,3	$11,9 \times 10^3$	$5,0 \times 10^5$
Ветви	20,6	$4,5 \times 10^3$	$0,9 \times 10^5$
Ствол	18,7	$1,6 \times 10^3$	$0,3 \times 10^5$
Надземная часть	80,6	$7,8 \times 10^3$	$6,2 \times 10^5$
Корни	8,0	$0,5 \times 10^2$	$4,0 \times 10^2$
Почвенный раствор	3350,3	0,11	$0,4 \times 10^3$
Система в целом	3438,9	-	$6,2 \times 10^5$

* средние значения при n=4

Для оценки количества ^{137}Cs , накопленного вследствие внутреннего перераспределения, были сделаны следующие допущения:

1) Средневзвешенную удельную активность надземной части древостоя сосны, обусловленную перераспределением радионуклида внутри растения, рассчитали исходя из отношения: удельная активность ^{137}Cs в корнях / средневзвешенная удельная активность надземной части древостоя = 1,3 (Щеглов, 2000; Shcheglov et al., 2001).

2) Загрязнение почвы и почвенного раствора ^{137}Cs в модельном эксперименте обусловлено только корневыми выделениями и корневым опадом.

3) Корневой опад принят равным 30% от суммарной массы прироста подземных органов (Базилевич, 1978), которая с учетом возраста саженцев может ежегодно удваиваться; а его удельная активность соответствует средневзвешенной удельной активности ^{137}Cs в вегетирующих корнях (Щеглов, 2000; Shcheglov et al., 2001).

Расчеты показали, что запасы ^{137}Cs , накопленные в компонентах наземной части растений почвенной и водной систем, в конце эксперимента составляли около 2 и 3 кБк/сосуд соответственно, в то время как запасы радионуклида в почвенном растворе и почве колебались от 0,4 до 1,1 кБк/сосуд (табл. 3).

Можно предположить, что активность ^{137}Cs , депонированная в почве/почвенном растворе, является следствием динамического накопления радионуклида за счет корневых выделений и корневого опада в течение эксперимента, в то время как активность наземной части сосны, обусловленная внутренним перераспределением, есть результат статической фиксации элемента в компонентах растений на момент отбора проб. Это утверждение вытекает из того, что по данным ряда авторов, в частности В.В. Снакина (1976), за период вегетации растения поглощают и выделяют такое количество химических элементов, которое по массе во много раз превышает их содержание в растениях (Снакин, 1976, Снакин, Тюрканов, 1976; Снакин, 1977). То есть однократный отбор проб растений не отражает фактической картины круговорота элемента, а лишь фиксирует их одномоментное статическое содержание, а то время как их количество в почве есть результат кумулятивного эффекта.

Полученные данные и сделанные допущения позволили также рассчитать долевым вклад корневых выделений и корневого опада в суммарное загрязнение ^{137}Cs питательного субстрата (почва/почвенный раствор) в модельном эксперименте (табл. 4). В расчетах учтен тот факт, что длительность модельного эксперимента составляла около трети

вегетационного периода в случае эксперимента с почвенной системой и девятой его части в случае эксперимента с водной системой.

Таблица 3. Запас ^{137}Cs , накопленный в компонентах почвенной и водной систем вследствие внутреннего перераспределения.

Компонент экосистемы	Масса, г	Удельная активность, Бк/г	Запас, Бк/система
Почвенная культура			
Надземная часть	61,7	32,5	2005
Корни	10,9	42,3	460
Надземная + подземная части	72,6	34,0	2465
Почва	10680,0	0,098	1042
Система в целом	10752,6	-	3507
Водная культура			
Надземная часть	80,6	37,0	2982
Корни	8,0	48,1	384
Надземная + подземная части	488,6	37,9	3366
Почвенный раствор	3350,3	0,11	386
Система в целом	3438,9	-	3752

Результаты расчета свидетельствуют, что загрязнение почв и почвенного раствора более чем на 95% определяется корневыми выделениями, что подтверждает сделанные ранее выводы о значимой роли корневых выделений в перераспределении ^{137}Cs в почвенном профиле.

Таблица 4. Вклад корневых выделений и корневого опада в загрязнение почв /почвенного раствора ^{137}Cs в модельном эксперименте

Показатель	Масса, г	Активность ^{137}Cs , Бк/г	Запас, Бк/систему	%
Почвенная культура				
Почва в целом	10680,0	$97,6 \times 10^{-3}$	1042,4	100
Корневой опад	1,1	42,3	46,5	4,5
Корневые выделения	-	-	995,9	95,5
Водная культура				
Почвенный раствор	3350,3	$115,1 \times 10^{-3}$	385,6	100
Корневой опад	0,27	48,1	13,0	3,4
Корневые выделения	-	-	372,6	96,6

Важно также отметить, что запас ^{137}Cs поступившего в почву в 2,5 раза превысил запас его в корнях. Следовательно, через растения в течение 45 дней (период проведения эксперимента) прошло значительно большее количество элемента, чем было зафиксировано в их биомассе. Очевидно, что определяемые запасы ^{137}Cs есть результат статической фиксации элемента в структурах растений на момент отбора проб, что, вероятно, в полной мере не отражает скорость биологического круговорота элемента.

Результаты модельного эксперимента с изолированным питанием ели обыкновенной в растворах. Измерение удельной активности ^{137}Cs в структурных компонентах ели обыкновенной по окончании модельного эксперимента показало, что наибольшая удельная активность ^{137}Cs отмечается в корнях, находящихся в почвенном растворе с ^{137}Cs . В них удельная активность радионуклида оказалась на 2-3 порядка выше, чем в структурах надземной части и превысила удельную активность раствора. (табл. 5).

Таблица 5. Удельная активность ^{137}Cs в структурных компонентах ели обыкновенной и их долевой вклад в общий запас ^{137}Cs в растении

Структурный компонент	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг	Долевой вклад в общий запас ^{137}Cs в растении, %
Хвоя	$205 \pm 30,5$	$1,30 \pm 0,38$
Ствол +ветви	$210 \pm 74,6$	$1,07 \pm 0,42$
Корни (в растворе с ^{137}Cs)	$114114 \pm 15581,7$	$97,58 \pm 0,76$
Корни (в чистом растворе)	$47 \pm 15,7$	$0,05 \pm 0,03$

M - среднее значение, $\pm m$ – ошибка среднего

Полученные данные указывают на наличие в растении определенных механизмов, ограничивающих перераспределение исследуемого радионуклида между его структурными компонентами. В этом случае можно предположить, что ^{137}Cs , накапливаясь в ризодерме и первичной коре корня, в растении далее перераспределяться не будет вследствие отсутствия доступа к проводящим тканям. Наличие аккумуляции ^{137}Cs в поверхностных

структурах корня подтверждается двумя положениями. Первое - образцы корней для удаления внешнего загрязнения тщательно дезактивировали этиловым спиртом; второе - мертвый корень, помещенный в активный раствор радиоцезия для контроля, имел несравнимо меньшую удельную активность ^{137}Cs по сравнению с живым корнем (на 2 порядка).

На надземную часть приходится в среднем менее 2,5 % суммарного запаса в растениях, а минимальной активностью обладают корневые системы, помещенные в чистый раствор. Запас радионуклида в первоначально чистом растворе значительно превысил таковой в корнях, размещенных в этом растворе (6 - 70 раз), что, очевидно, обусловлено различиями в их массах и возможном частичном выщелачивании радионуклида из корневой системы. Среднее значение активности радиоцезия (^{137}Cs) для исходно чистого питательного раствора по окончании эксперимента составляло $1,88 \pm 0,47$ Бк/кг. При этом для контрольного образца и эксперимента с мертвыми корнями удельная активность ^{137}Cs в исходно чистом растворе достигала $0,12 \pm 7,6$ Бк/кг и $0,17 \pm 0,75$ Бк/кг соответственно, а пик ^{137}Cs на спектре отсутствовал. Таким образом, утверждать о наличии процесса перемещения ^{137}Cs по водной пленке на поверхности корневых систем в данном эксперименте не представляется возможным.

В качестве одного из возможных количественных показателей корневых выделений нами был использован процент ^{137}Cs , накопленного в первоначально чистых растворах от его запаса в хвое как индикаторного органа загрязнения растения (Щеглов, 1999) и относительно запаса ^{137}Cs в целом (таблица 6).

Таким образом, доля ^{137}Cs , поступающего в исходно чистый питательный раствор за время проведения эксперимента (семь дней), составляет 37,4–53,8% от его запасов в ассимилирующих органах, что можно считать значимым или в среднем около 43 % за неделю или 6,5 % в сутки.

Таблица 6. Относительное количество ^{137}Cs , поступившего в чистый раствор с корневыми выделениями

Повторность	Относительное количество ^{137}Cs , поступившего в чистый раствор с корневыми выделениями, %	
	относительно запаса в хвое	относительно запаса в растении
1	40,0	13,0
2	53,8	35,0
3	40,3	19,5
4	37,4	24,5
$M \pm m$	$42,9 \pm 3,7$	$23,0 \pm 4,6$

M - среднее значение, $\pm m$ – ошибка среднего

По другой оценке, количество исследуемого радионуклида, поступившего за тот же период в чистый раствор, составляет 13 - 35 % от запаса в целом растении за счет выделений ^{137}Cs частью. корневой системы, находившейся в чистом растворе. При пересчете на массу всей корневой системы, за неделю количество поступающего в раствор ^{137}Cs может варьировать от 25,8 % до 99,9% от его запаса в целом растении.

В случае, если аналогичные закономерности характерны и для естественных лесных экосистем, то корневые экссудаты можно считать одним из ведущих факторов, обуславливающих перераспределение ^{137}Cs в почвенном профиле.

Результаты модельного эксперимента с саженцами ели обыкновенной в почвогрунте. Полученные данные показали, что увеличение времени эксперимента не приводит к увеличению удельной активности ^{137}Cs в структурных компонентах саженцев (рис. 8). Напротив, наблюдается некоторое снижение данного показателя, что может быть вызвано как индивидуальными особенностями растений, в том числе состоянием корневой системы, так и потерей ^{137}Cs за счет корневых выделений.

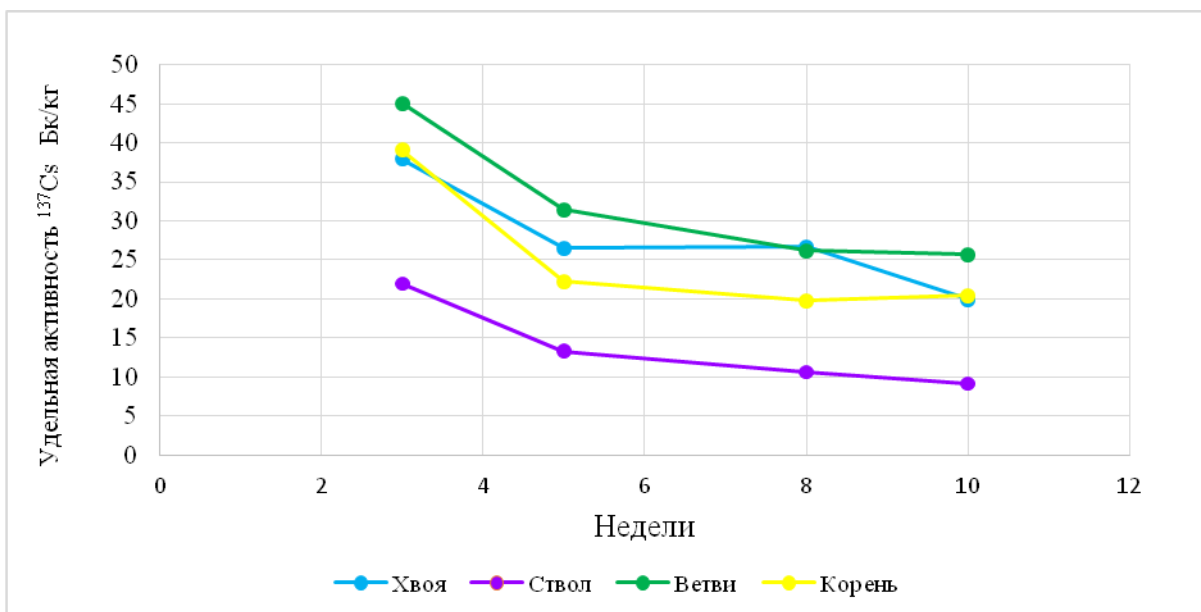


Рис. 8. Изменение удельной активности ^{137}Cs в структурных компонентах ели обыкновенной в зависимости от длительности эксперимента

Несмотря на достаточно равномерное распределение удельной активности радиоцезия между выделенными структурными компонентами, удельная активность радиоцезия (^{137}Cs) коры была более, чем на порядок выше, чем аналогичное значение для древесины, и составила 57,1 и 4,6 Бк/кг соответственно, что подтверждает общеизвестный факт аккумуляции ^{137}Cs в коре (Щеглов, 2000; Касацкий, 2015). При этом аналогичные структуры можно выделить и для корневых систем древесных растений, что может объяснить накопление радионуклида в корнях с незначительным его поступлением в проводящие ткани в модельном эксперименте с елью в растворе, поскольку основным аккумулятором ^{137}Cs являются именно поверхностные структуры. Данный факт способен объяснить и более высокую удельную активность ^{137}Cs в корнях с большим массовым вкладом коры.

Оценка поступления ^{137}Cs в корнеобитаемую толщу почв исследуемых фитоценозов за счет деятельности корневых систем древесных растений-эдификаторов. Итоговая оценка вклада корней сосны и березы в поступление радиоцезия (^{137}Cs) в различные слои почвенного профиля для исследуемых фитоценозов осуществлялась на основании результатов

натурных исследований и модельных экспериментов с использованием литературных данных по биомассе корней, годичного прироста и опада в сосняках и березняках исследуемого региона (Базилевич, 1993). Вклад корней сосны принимался равным сумме количества радионуклида, поступающего в составе опада (табл. 7), и в составе корневых выделений. Количество ^{137}Cs , ежегодно поступающего с корневыми выделениями (N (табл. 8), определялось по формуле (1):

$$N = B \times n \times T, \quad (1)$$

где B – запас ^{137}Cs в ассимилирующих органах;

n – процент ^{137}Cs , поступающего с корневыми экссудатами в сутки от его запаса в ассимилирующих органах (в нашем случае $n=3,1\%$);

T – длительность периода благоприятного для экссудации (Агроклиматический справочник, 1961; Жолкевич, 1989).

Таблица 7. Ежегодное поступление радиоцезия (^{137}Cs) с опадом корней сосны обыкновенной в различные слои почвенного профиля исследуемого сосняка

Глубина слоя, см	Запасы ^{137}Cs в слое, кБк/м ²	Запас биомассы корней, г/м ²	Корневой опад, г/м ²	Удельная активность ^{137}Cs в корнях кБк/кг	Запас ^{137}Cs в опаде корней кБк/м ²	Вклад радиоцезия, поступающего в почвенный слой за счет опада корней, % *
0-10	3663,9	2413	39,79	45,37	1,81	0,05
10-20	710,6	535	8,82	46,84	0,41	0,06
20-30	76,1	327	5,39	46,45	0,25	0,36

*Процент от суммарного запаса радионуклида в слое

На основании проведенных расчетов, можно констатировать, что количество ^{137}Cs , ежегодно поступающего с корневыми выделениями в почву, составляет около 42,4 кБк/м² (табл. 9). Следует подчеркнуть, что в данном расчете не учтены особенности распределения различных фракций корней в почвенном профиле. Вместе с тем очевидно, что при оценке влияния корневых выделений на миграцию ^{137}Cs этот фактор следует

учитывать, поскольку количество экссудатов в первую очередь зависит от биомассы мелких фракций.

Таблица 8. Расчетное количество радиоцезия (^{137}Cs), ежегодно поступающего в почвенный профиль с корневыми выделениями сосны обыкновенной в исследуемом сосняке

Биомасса хвой, г/м ²	Удельная активность ^{137}Cs в хвое, кБк/кг	Запас ^{137}Cs в хвое (В), кБк/м ²	Благоприятный период для экссудации (Т), дней	Количество радиоцезия, ежегодно поступающего с корневыми выделениями (N), кБк/м ²
650	30,0	19,5	70	42,4

Таким образом, поступление ^{137}Cs в корнеобитаемую толщу почв в составе ежегодных корневых выделений сосны, даже по самым скромным оценкам, составляет 0,86% в верхнем 0-10 см слое и 5,52% - в нижнем 20-30 см слое, что в несколько раз превышает поступление его за счет годового отпада корней.

Таблица 9. Оценка вклада корневых выделений сосны обыкновенной в накопление радиоцезия (^{137}Cs) в почвенном слое в исследуемом фитоценозе

Глубина, см	Запасы ^{137}Cs в слое, кБк/м ²	Запас биомассы корней, г/м ²	Поступление ^{137}Cs с корневыми экссудатами, кБк/м ²	Вклад корневых выделений в накопление радиоцезия в слое, %*
0-10	3663,9	2413	31,2	0,86
10-20	710,6	535	7,0	0,98
20-30	76,1	327	4,2	5,52

*Процент от запаса радионуклида в слое

ВЫВОДЫ

1. Интенсивность миграции ^{137}Cs в слабоподзолистых иллювиально-железистых песчаных почвах с сосняков и березняков Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС и расположенных в непосредственной близости друг от друга, неодинакова. Запасы ^{137}Cs в 0-50 см толще почв березняков примерно в 1,5 раз ниже, чем таковые в почвах сосняков, а интенсивность миграции этого радионуклида, напротив, выше в березняках. Здесь ^{137}Cs в настоящее время на детектируемом уровне фиксируется в 1,5 - 2 раза больших глубинах, чем в сосняках.

2. Удельная активность ^{137}Cs в корнях древесных растений меняется в зависимости от их диаметра. Как у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), так и у березы повислой (*Bétula péndula* Roth) исследуемых фитоценозов, наименьшая удельная активность ^{137}Cs отмечается в крупных, а наибольшая - в мелких фракциях корней. При этом удельная активность ^{137}Cs соответствующих фракций корней мало меняется с глубиной.
3. Вклад корней древесных растений эдификаторов в общие запасы ^{137}Cs в 0-50 см толщу почв исследуемых биогеоценозов Брянской области для березняков составляет 1,66% с изменением данного показателя по отдельным слоям почвенной толщи от 1,12 до 3,53%, для сосняков 0,97% с варьированием - от 0,82 до 7,5 %. При этом из исследуемых фракций корней наибольший вклад в запасы ^{137}Cs вносит самая крупная, и с глубиной в профиле вклад корней в общее загрязнение почв исследуемых растительных сообществ нарастает.
4. Результаты модельных экспериментов продемонстрировали существенную роль корневых выделений в миграции ^{137}Cs , так в эксперименте с внесением хлористого радиоцезия на поверхность хвои саженцев сосны обыкновенной, в поступлении радиоцезия в почву и почвенный раствор, корневые выделения обеспечили 95,5% и 96,6% соответственно, от общего количества радионуклида поступившего в среду произрастания, в свою очередь корневой опад способствовал поступлению только единиц процентов. Корневые выделения ели обыкновенной (*Picea ábies* L.) в питательную среду в условиях модельного эксперимента с водной культурой составляют в среднем около 43 % за неделю или 6,5 % в сутки от накопленного его запаса в хвое.
5. В эксперименте с мертвыми корнями ели обыкновенной (*Picea ábies* L.) установлено, что перемещение радиоцезия (^{137}Cs) по водной пленке на их поверхности не наблюдается и не имеет фиксируемого значения в процессах миграции радиоцезия.
6. В целом, корневыми системами древесных растений эдификаторов ежегодно может высвобождаться количество радиоцезия (^{137}Cs) до 2,7% от его запаса в корнеобитаемом слое в березняках и до 5,9% - сосняках, при этом данная оценка не включает в себя корневые системы травянистых растений, кустарничков и подлеска, что свидетельствует об определяющей роли корней растений в перераспределении радиоцезия в почвенном профиле.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- Shcheglov A.I., Tsvetnova O. B., Popova E.P., The effect of tree roots on the redistribution of ^{137}Cs in the soils of pine and birch forests of the radioactive contamination zone // Moscow University Soil Science Bulletin, 2016, Vol. 71, No. 2, pp. 83–87. IF: 0.415
- Щеглов А. И., Цветнова О. Б., Попова Е.П. Показатели поступления ^{137}Cs в почву с опадом корней и корневыми выделениями сосны обыкновенной // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 6. С. 651–657. IF: 0.538
- Popova E.P., Shcheglov A.I., Komarov L.A. Some indicators of the ^{137}Cs intake in nutrient solution with root exudates of Norway spruce (*Picea Abies*) in a model experiment // Moscow University Soil Science Bulletin, 2018, Vol. 73, No. 5, pp. 43–46. IF: 0.415

Прочие публикации

- Попова Е.П. Влияние корней древесных растений-эдификаторов на миграцию Cs-137 в почвенном профиле на примере березняка и сосняка в Красногорском районе Брянской области// Ломоносов-2013: материалы 19-ой междунар. конф. – М., 2013 г.
- Попова Е.П. Количественная оценка поступления Cs-137 с выделениями и опадом корней сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на основании данных модельного эксперимента // Ломоносов-2015: материалы 21-ой междунар. конф. – М., 2015 г.
- Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., Klyashtorin A.L., Popova E.P. Specific features of the recent accumulation of Cs-137 in tree roots of forest ecosystems within the zone of radioactive contamination// EGU General Assembly. Wien, 2015, Vol.17.
- Попова Е.П. Оценка влияния поступления коревых выделений и корневого опада сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris*) на миграцию Cs-137 в почвенном профиле // East European Scientific Journal 2019, Т. 48, №8. С. 28–34.