

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**ПОПОВА МАРИНА БОРИСОВНА**

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ  $^{137}\text{Cs}$  В ПОЧВЕННО-  
РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ СЕВЕРО-ТАЁЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ  
(НА ПРИМЕРЕ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ КОЛЬСКОЙ АТОМНОЙ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ)**

Специальность: 1.5.15 Экология (биологические науки)

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

г. Москва, 2023

Работа выполнена на кафедре радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

**Научные руководители:** *Щеглов Алексей Иванович,*  
доктор биологических наук, доцент/с.н.с.  
*Новиков Александр Павлович,*  
доктор химических наук

**Официальные оппоненты:** *Переволоцкий Александр Николаевич,*  
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, ФГБНУ ВНИИРАЭ  
*Ладонин Дмитрий Вадимович,*  
доктор биологических наук, доцент/с.н.с., профессор кафедры химии почв факультета почвоведения, МГУ имени М.В.Ломоносова  
*Богатырев Лев Георгиевич,*  
кандидат биологических наук, доцент, доцент по кафедре общего почвоведения факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

Защита диссертации состоится 23 мая 2023 года в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.12, биологический факультет, аудитория М-2.

Тел: 8(495)–939-24-67, электронная почта: [paramonovata@ty.msu.ru](mailto:paramonovata@ty.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/015.3/2468>

Автореферат разослан «18» апреля 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук

Парамонова Т.А.

## **Актуальность проблемы**

В научной литературе опубликован ряд работ, посвященных содержанию радионуклидов в растениях и почвах в зоне размещения радиационно опасных объектов Кольского полуострова — различным предприятиям Военно-морского флота РФ, а также центров по хранению и переработке РАО. Однако данные о содержании и распределении наиболее долгоживущего радионуклида, присутствующего в составе глобальных выпадений и штатных выбросов КоАЭС —  $^{137}\text{Cs}$  — в последние годы не публиковались, хотя исследование ее радиационного воздействия на окружающие экосистемы и оценка этого влияния на фоне большого количества других радиационно опасных объектов представляется важными.

**Цель работы:** изучить особенности поведения  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове северотаежных экосистем на примере района расположения КоАЭС.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи:**

1) Определить уровни накопления  $^{137}\text{Cs}$  в почвах и доминантных видах растений, расположенных на разном удалении от АЭС (в санитарно-защитной зоне, в зоне наблюдения КоАЭС и на фоновой территории);

2) Рассчитать запасы  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемой 0–30 см толще иллювиально-железистых подзолов в северотаежных экосистемах на заложенных контрольных участках;

3) Изучить формы соединений  $^{137}\text{Cs}$  и ряда других техногенных радионуклидов в исследуемых подзолах путём проведения модельного эксперимента;

4) Установить закономерности влияния основных физико-химических свойств почв на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном профиле и в органах растений доминантных видов;

5) Оценить степень влияния КоАЭС на поступление  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительный покров прилегающих территорий.

**Объектом исследования** выступили хвойные биогеоценозы, расположенные в районе КоАЭС; а **предметом исследования** — поведение  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове северотаежных экосистем на примере этих хвойных биогеоценозов.

### **Научная новизна**

Впервые в хвойных биогеоценозах на иллювиально-железистых подзолах района расположения КоАЭС дана детальная характеристика распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном профиле и показано его содержание в различных органах растений доминантных видов. В модельных экспериментах с внесением техногенных радионуклидов (которые ранее не проводились) получены данные о распределении  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  по формам их соединений в иллювиально-железистых подзолах Кольского полуострова.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Полученные данные о закономерностях поведения  $^{137}\text{Cs}$  в северотаежных экосистемах на иллювиально-железистых подзолах позволят повысить точность прогностических моделей поведения этого радионуклида в бореальных лесах. Результаты исследования также могут быть использованы при разработке рекомендаций по улучшению системы экологического мониторинга радиационно опасных объектов, расположенных в северо-таежной зоне, в частности КоАЭС.

### **Методология и методы исследования**

Методология исследования базируется на принципах диалектики, системном и целостном подходе к познанию предмета; методы — общенаучные (анализ, абстрагирование, формализация, эксперимент,

индукция, дедукция). Измерение удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  во всех образцах осуществлялось методом гамма-спектрометрии, расчет влияния различных факторов на поведение  $^{137}\text{Cs}$  был выполнен с помощью статистических методов.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. В хвойных биогеоценозах на иллювиально-железистых подзолах  $^{137}\text{Cs}$  характеризуется значительно большей миграционной подвижностью в системе почва-растение, чем в хвойных биогеоценозах средней полосы России.
2. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове 30-км зоны вокруг КоАЭС определяется почвенными свойствами такими как содержание органического вещества, физической глины, подвижного  $\text{K}^+$ , обменных  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .
3. Штатные выбросы КоАЭС не приводят к значимому увеличению содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове относительно существующего уровня, обусловленного глобальным радиоактивным загрязнением.

### **Личный вклад автора**

Выбор направления исследования, изучение литературных источников, организация полевых выездов, отбор почвенных и растительных проб, проведение измерений и лабораторных анализов, участие в проведении модельного эксперимента по внесению изотопов техногенных радионуклидов в почву, статистическая обработка полученных результатов. В работе [1] вклад автора составил 0,7 печатных листа (п.л.) из 1,0 п.л., в работе [2] 0,7 п.л. из 1,1 п.л., в работе [3] 0,9 п.л. из 1,4 п.л.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 работы — в рецензируемых научных журналах, входящих в международные базы WoS и Scopus, а также РИНЦ.

## **Объем и структура диссертации**

Диссертация включает введение, 6 глав, заключение, выводы, список литературы и приложения. Материалы диссертации изложены на 190 страницах, она содержит 31 таблицу и 18 рисунков. Список литературы включает 156 наименований, в том числе 66 на английском языке.

## **Благодарности**

Автор выражает признательность сотрудникам группы SoilText ФИЦ Почвенного института им. В.В. Докучаева Юдиной А.В. и Фомину Д.С. за помощь в определении гранулометрического состава почв, сотрудникам лаборатории радиохимии окружающей среды Горячевой Т.А., Казинской И.Е., Лавринович Е.А., Кузовкиной Е.В. и Мясникову И.Ю. - за помощь в организации модельного эксперимента по внесению изотопов в почву и ценные советы. Автор также выражает благодарность Кизееву А.Н., Ушамовой С.Ф., Прохорову В.А. и Мышонкову А.Ю. за помощь в полевых работах, составлении геоботанических описаний, отборе почвенных и растительных образцов и их транспортировке. Глубокую благодарность автор выражает научным руководителям Щеглову А.И. и Новикову А.П., а также старшему преподавателю кафедры радиоэкологии и экотоксикологии и соавтору всех опубликованных автором статей Манахову Д.В. за неоценимую помощь и поддержку на всех этапах работы.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 20–34–90103 «Аспиранты».

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Полученные в диссертации результаты являются оригинальными, их достоверность определяется большим объемом полученных данных, использованием традиционных и современных методов и подходов, корректным использованием статистических методов. Основные положения данной диссертации были доложены и обсуждены на заседаниях кафедры

радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ, а также представлены на конференциях: на Третьей молодежной конференции Почвенного института им. В.В. Докучаева «Почвоведение: Горизонты будущего 2019» (Москва, 2019), международной конференции ENVIRA-2019 (Прага, 2019), XII Международной биогеохимической школе-конференции «Фундаментальные основы биогеохимических технологий и перспективы их применения в охране природы, сельском хозяйстве и медицине» (Тула, 2021) и Пятой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева с международным участием «Почвоведение: Горизонты будущего. 2021» (Москва, 2021).

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **ГЛАВА 1. Обзор литературы**

Первая глава состоит из 6 разделов и обобщает имеющиеся литературные данные о поведении  $^{137}\text{Cs}$  в почве, его биогеохимических свойствах и накоплении в растениях основных ярусов северной тайги. Также рассмотрено радиационное воздействие КоАЭС на окружающую среду, дан обзор радиоэкологических исследований, проводившихся в районе ее расположения.

Обзор литературы подтвердил, что поведение  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва-растение в экосистемах северной тайги остается крайне мало изученным. Информация о накоплении этого радионуклида в доминантных видах растений и почвах немногочисленна (Горячкин и др., 1995; Семенихина, 2006; Евсеев, 2020; Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году, 2021; Отчет об экологической безопасности за 2021 год. Кольская АЭС, 2022). Информация о формах соединений  $^{137}\text{Cs}$  в иллювиально-железистых подзолах в литературе отсутствует.

## ГЛАВА 2. Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили хвойные биогеоценозы района расположения КоАЭС. Их изучение проводилось в 2014 году на сети мониторинговых площадок в виде радиально-концентрической системы, состоящей из 12 пробных площадок в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции; в зоне наблюдения (ЗН), на расстоянии 10 км от станции; на границе ЗН на расстоянии 15 км; одна фоновая площадка — на расстоянии 30 км от станции – Ф-30. Для детального изучения накопления  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове по направлению господствующих ветров в 2019 году был произведен дополнительный отбор проб на пяти пробных площадках, заложенных по северо-восточному румбу — и на новой фоновой площадке (Ф-60), которая располагалась в 60 километрах от КоАЭС (рис 1).

В период с 2014 по 2019 годы на каждой площадке было заложено по одному полнопрофильному почвенному разрезу и несколько прикопок. Почвенные свойства определялись по стандартным методикам.



Рис. 1. Схема расположения пробных площадок

Для изучения форм соединений  $^{137}\text{Cs}$  и некоторых других техногенных радионуклидов ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{237}\text{Np}$ ) в исследуемых почвах был проведен модельный эксперимент. Радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239}\text{Pu}$  вносили в одну воздушно-сухую навеску почв,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{237}\text{Np}$  — в отдельные навески. Масса каждой навески составляла 20 г. Азотнокислые растворы, содержащие радионуклиды, внесены в минимальных объемах в следующих концентрациях (в скобках указаны активности внесенных меток):  $^{137}\text{Cs}$  — 0,1 мл (6000 Бк),  $^{90}\text{Sr}$  — 0,5 мл (2000 Бк),  $^{239}\text{Pu}$  — 0,03 мл (1500 Бк),  $^{237}\text{Np}$  — 0,3 мл ( $3,3 \times 10^{-5}$  г/мл). В почвы с внесенными радионуклидами регулярно добавляли дистиллированную воду в количестве около 4 мл, добиваясь влажной консистенции, и тщательно перемешивали. По мере высыхания воду добавляли снова. Перемешивание длилось 4 месяца. Последовательная экстракция форм соединений проводилась по методу Павлоцкой однократно из навески 2 г, соотношение твердой и жидкой фаз 1:10, время контакта — 1 час при комнатной температуре.

Растительные сообщества площадок были представлены преимущественно сосняками лишайниково-черничными. С каждой площадки были отобраны образцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), черники миртолистной (*Vaccinium myrtillus* L.) и лишайников рода *Cladonia* (рис. 2). Отбирались образцы и других растительных видов, если они произрастали на площадке в количестве, достаточном для отбора проб — березы повислой (*Betula pendula* Roth), ели обыкновенной (*Picea abies* L.), голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum* L.) и плевроциума Шребера (*Pleurozium schreberi*). Ветви деревьев с листьями или хвоей 2–4-летнего возраста срезались секатором на высоте человеческого роста. У кустарничков срезалась полностью надземная часть растения. Лишайники отбирались целиком. В дальнейшем образцы растений (кроме мха) были разделены на ветви и хвою, либо на ветви и листья, а образцы лишайников - на нижнюю, среднюю и верхнюю части подеция.

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в образцах были измерены на спектрометрическом комплексе “Мультирад” с гамма-детектором NaI(Tl), 63×63 с программным обеспечением “Прогресс”(ООО “НТЦ Амплитуда”, Россия) в пятикратной повторности с экспозицией 10800 с. Энергетическое разрешение по линии 662 кэВ составляет 9%. Минимальная детектируемая активность при экспозиции 3600 с составляет 3 Бк. Неопределенность измерения рассчитывалась как среднеквадратическое отклонение скорости счета; неопределенность косвенных измерений – как комбинированная стандартная неопределенность от всей индивидуальной неопределенности составных частей (JCGM 100:2008).

Для оценки аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями были рассчитаны коэффициенты накопления и коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$ . Коэффициент накопления (КН)  $^{137}\text{Cs}$  представляет собой отношение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в растении или его части к средневзвешенной удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемой толще, которой на изученной территории являлся слой почвы 0-30 см. Коэффициент перехода (КП) — это отношение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в растении или его части к плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  слоя 0-30 см, имеющий размерность  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

Средние уровни изучаемых показателей на различных площадках сравнивали с помощью одновыборочного t-критерия. Зона наблюдения в данном случае рассматривалась как единая выборка, средние величины в которой сравнивались со значениями в СЗЗ АЭС и на фоновой площадке как с постоянными величинами.

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах одного растения сравнивались по t-критерию как зависимые переменные, в компонентах растений разных видов — по t-критерию как независимые переменные. В случае, когда распределение выборок было отличным от нормального, применялся Н-критерий. Для поиска взаимосвязей между показателями аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в почве и растительных компонентах и факторами,

которые могут оказывать на них влияние, были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмана  $r_s$ . С целью изучения закономерностей вертикального распределения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в подстичках лишайников и в сопряженных с ними почвенных профилях проводился кластерный анализ данных с итеративной процедурой разбиения на три кластера.

### **ГЛАВА 3. Характеристика свойств почв и почвенного покрова в районе расположения КоАЭС**

Все исследованные почвы относятся к иллювиально-железистым подзолам. Ниже приведен пример формулы и названия по основным почвенным классификациям для наиболее часто встречающихся подзолов иллювиально-железистых мелкоподзолистых песчаных на морене:

- 1) Классификация и диагностика почв СССР, 1977: O(4)-AO(5)-E(9/10)-B1f(20)-B2f(42)-BC(76/80)-C(107) - Подзол иллювиально-железистый мелкоподзолистый песчаный на морене.
- 2) Классификация и диагностика почв России, 2004: Oh(5)-E(9/10)-BF1(20)-BF2(42)-BC(76/80)-C(107) - Подзол перегнойный иллювиально-железистый неглубокоосветленный песчаный на морене.
- 3) WRB: Albic Podzol (Arenic)

Исследованные иллювиально-железистые подзолы — сильно кислые, супесчаные или песчаные почвы с высоким содержанием органического вещества в подстилке и низким содержанием гумуса в минеральной толще. Почти во всех почвенных разрезах наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация органического вещества, ила, калия и обменных катионов (рис. 3).

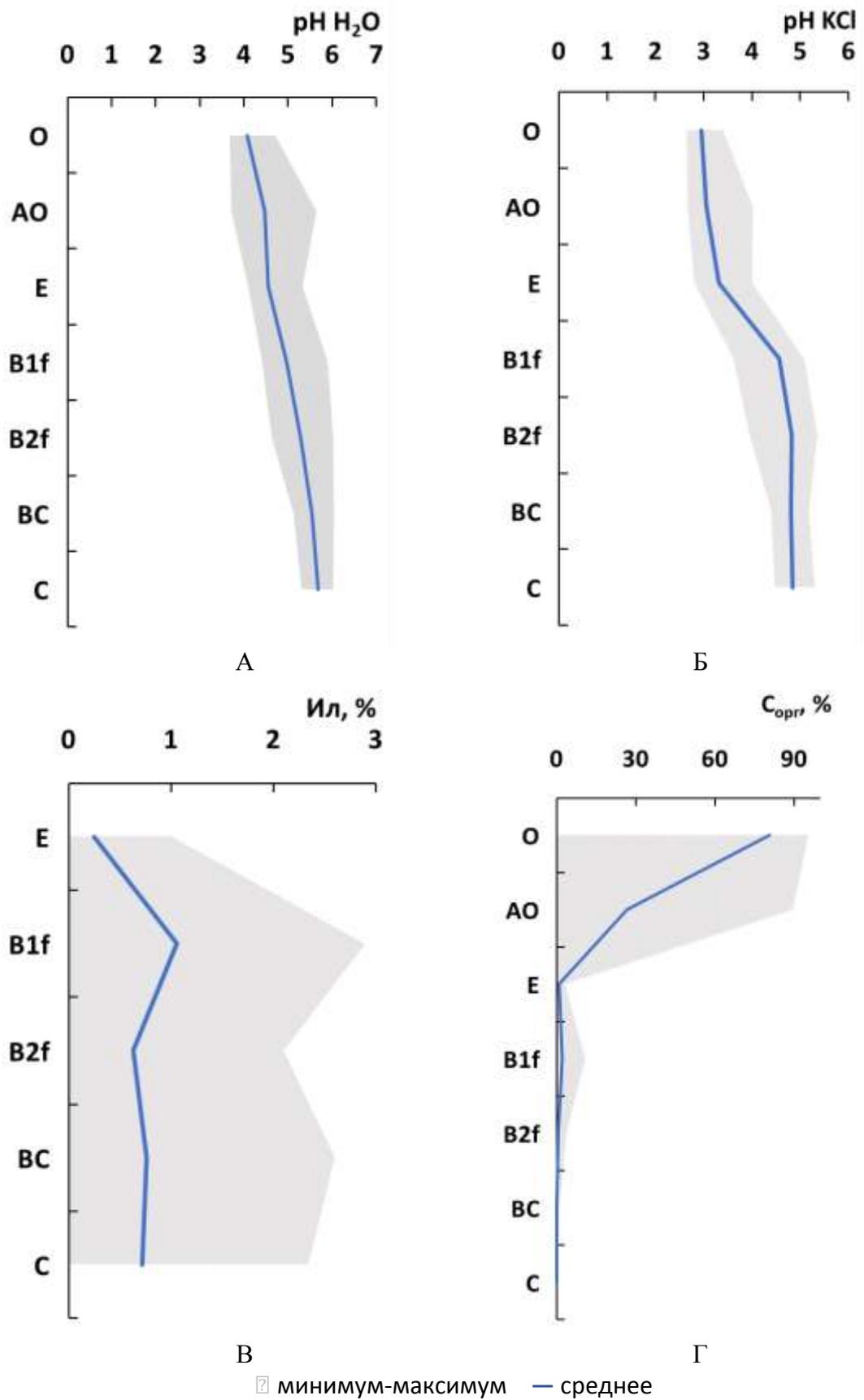


Рис. 3. Области изменения почвенных свойств в почвенном профиле для выборки из 37 почвенных разрезов и прикопок.

## ГЛАВА 4. Содержание и распределение $^{137}\text{Cs}$ в почвах в районе расположения КоАЭС

Закономерности вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  сходны для всех исследованных почв. Они характеризуются аккумулятивным типом с четко выраженным регрессивно-аккумулятивным подтипом распределения  $^{137}\text{Cs}$  в профиле (Рис. 4). Максимальные значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются в подстилке и составляют 30,1–103,5 Бк/кг. Разброс этих значений среди почв различных площадок, вероятно, связан с количеством органического вещества: чем больше его в подстилке, тем выше в ней удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  ( $r_s=0,67$ ;  $p=0,05$ ).

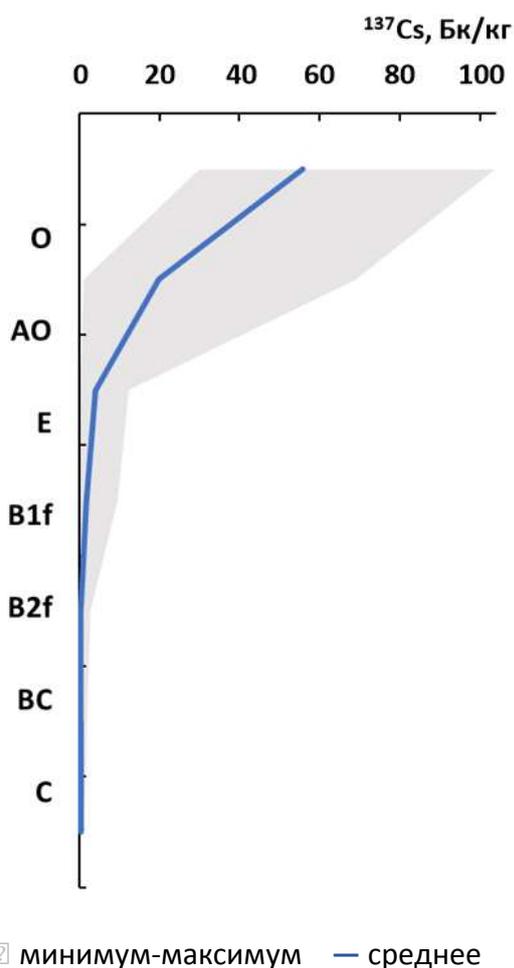


Рис. 4. Область изменения профильного распределения  $^{137}\text{Cs}$  для выборки из 37 почвенных разрезов и прикопок.

В нижележащих горизонтах удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  многократно снижается (Глава 4, текст диссертации). Вместе с тем вертикальное

распределение запасов  $^{137}\text{Cs}$  по генетическим почвенным горизонтам имеет несколько иной характер. Наибольшие запасы  $^{137}\text{Cs}$  отмечены в горизонтах E, а также B1f. Следовательно, плотность загрязнения (запас)  $^{137}\text{Cs}$  в органогенных горизонтах оказалась существенно меньше, чем в минеральных. В горизонтах O и AO исследованных подзолов сосредоточено лишь 10–40% от запаса  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0–30 см, тогда как, к примеру, в северо-таежной зоне Западной Сибири запас  $^{137}\text{Cs}$  в подстилке составляет 40% и более его запасов в ландшафте (Усачева и др., 2016).

Плотность загрязнения (запас)  $^{137}\text{Cs}$  в корнеобитаемой толще (0–30 см) исследованных почв составляет 0,53–2,46 кБк/м<sup>2</sup>, что и не превышает типичный для европейской части РФ уровень глобальных радиоактивных выпадений. Эти значения существенно ниже установленного допустимого уровня удовлетворительной экологической обстановки в 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>) и позволяет отнести исследованные участки к незагрязненным территориям.

Средняя плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в слое 0–30 см почв ЗН КоАЭС не имеет статистически значимых отличий ( $p < 0,05$ ) от уровня 1,03 кБк/м<sup>2</sup>, зафиксированного на фоновой площадке. Значения плотностей загрязнения слоя 0–30 см и органогенных горизонтов для СЗЗ КоАЭС, наиболее близко расположенной к атомной станции площадки, статистически значимо ( $p < 0,05$ ) меньше, чем средняя плотность загрязнения в ЗН КоАЭС. Для наиболее удаленной от АЭС фоновой площадки плотность загрязнения подстилки значимо ( $p < 0,05$ ) меньше, чем среднее по ЗН КоАЭС. Однако полученный результат, по-видимому, обусловлен локальным уменьшением запаса подстилки на фоновой площадке ( $r_s = 0,67$ ). При этом между величинами мощности органогенной толщи в СЗЗ КоАЭС, на фоновой площадке и в ЗН статистически достоверных ( $p < 0,05$ ) различий не обнаружено. Такие особенности варьирования мощности и запасов подстилки в различных биогеоценологических условиях необходимо учитывать при сравнении значений плотности загрязнения этого горизонта на

различных площадках. Таким образом, при анализе всей верхней почвенной толщи 0–30 см не выявлено статистически значимого ( $p < 0,05$ ) увеличения средней плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в ЗН КоАЭС по сравнению с фоновым уровнем. Следовательно, плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в ЗН обусловлена преимущественно глобальными выпадениями, а дополнительное поступление этого радионуклида вследствие штатных выбросов КоАЭС не значимо.

Для оценки возможного влияния атомной станции на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в почве проведен анализ корреляционных связей между радиоэкологическими показателями и географическими, метеорологическими и почвенными характеристиками. Статистически достоверных ( $p < 0,05$ ) связей между содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в почвах площадок и расстоянием от объекта воздействия, скоростью и повторяемостью ветров в этом районе, высотой над уровнем моря не обнаружено. По-видимому, зафиксированные значения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах на различных площадках вокруг КоАЭС связаны с неравномерностью глобальных радиоактивных выпадений  $^{137}\text{Cs}$ , а также с физическими и химическими свойствами почвенных горизонтов. Дополнительное исследование почв на пяти площадках северо-западного румба также не выявило значимого влияния атомной станции на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в почвах прилегающих территорий.

## ГЛАВА 5. Формы соединений $^{137}\text{Cs}$ и других техногенных радионуклидов в иллювиально-железистом подзоле зоны влияния КоАЭС

На рис. 5 представлены усредненные значения концентраций радионуклидов в формах соединений, доступных для поглощения растениям. В составе малоподвижных и неподвижных (кислоторастворимая и остаток) форм доля радионуклидов в подзолах изменяется в следующем порядке:  $^{137}\text{Cs}$  (45–77%) >  $^{239}\text{Pu}$  (37–51%) >  $^{237}\text{Np}$  (25–29%) >  $^{90}\text{Sr}$  (10–13%), что ниже, чем в других типах почв.

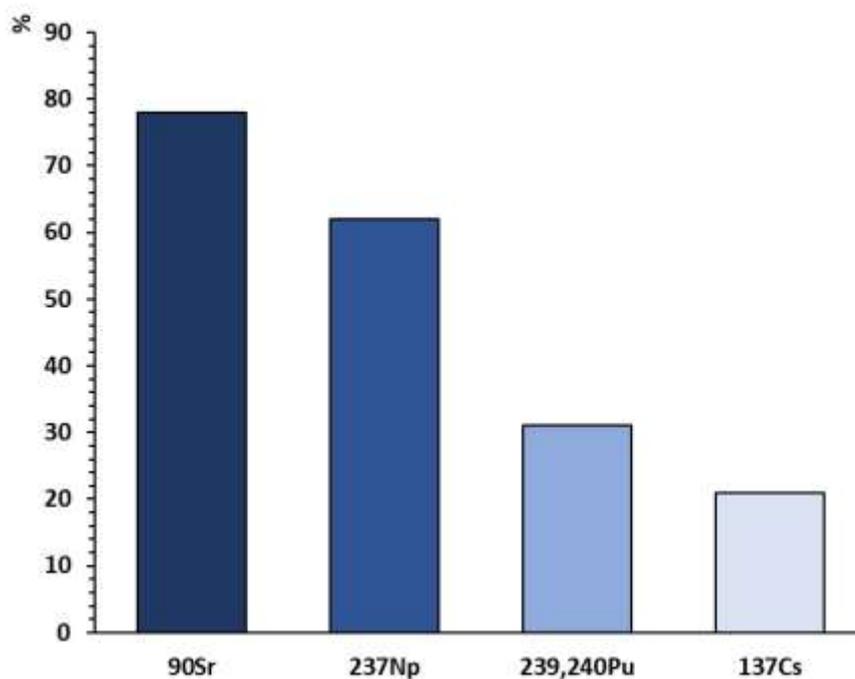


Рис. 5. Суммарные доли доступных форм нахождения радионуклидов (водорастворимая и обменная).

Поведение радионуклидов в иллювиально-железистых подзолах определяется физико-химическими особенностями этих почв - кислой реакцией среды, повышающей подвижность радионуклидов, а также низким содержанием органического вещества и илистых частиц, в составе которых в основном сосредоточены глинистые минералы с высокой поглощательной способностью. Наиболее прочно сорбируются иллювиально-железистыми

подзолами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Напротив,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , характеризуются большой подвижностью.

## ГЛАВА 6. Накопление $^{137}\text{Cs}$ в растительном покрове в районе расположения КоАЭС

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в ветвях сосны обыкновенной составляли 9,0–26,2, а в хвое - 7,2–34,5 Бк/кг, в хвое они были значимо выше. КН в ветвях сосны составил 1,72-17,08, а в хвое 1,31-22,48. КП в ветвях сосны находился в пределах  $(5-49)\times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг, в хвое варьировал от  $4\times 10^{-3}$  до  $65\times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг.

Сравнение с литературными данными показало, что КП  $^{137}\text{Cs}$  в ветвях и хвое сосны на изученной территории могут превосходить аналогичные показатели, полученные при изучении сосняков Брянской и Гомельской области, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение КП  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах сосны с литературными данными.

Ветви сосны обыкновенной	
Объект	КП, $\times 10^{-3}$ м <sup>2</sup> /кг
Район КоАЭС	5-49
автоморфные ландшафты на подзолистых почвах, Брянская область (Щеглов, 2000)	6,1
Сосняки, Гомельская область (Thiry et al., 2002)	3,5-4,7
гидроморфные позиции на торфяно-глеевых почвах, Брянская область (Щеглов, 2000)	17,5
Хвоя сосны обыкновенной	
Район КоАЭС	4-65
Бруснично-черничные сосняки, Брянская область (Бордзыко, Маркелова, 2009)	2,31
Гидроморфные ландшафты, Брянская область (Щеглов, 2000)	14,5

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в ветвях черники миртолистной составили 25,9–90,3; в листьях — 13,0–164,8 Бк/кг. В листьях черники накапливается значимо большее количество этого радионуклида, чем в ее ветвях. КН в ветвях черники составил 4,72-52,22, а в листьях 5,14-75,16. КП в ветвях черники находился в пределах  $(16-87)\times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг, в листьях варьировал от  $17\times 10^{-3}$  до  $218\times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг.

Сравнение с литературными данными показало, что интенсивность накопления  $^{137}\text{Cs}$  черникой миртолистной в северотаежных экосистемах Кольского полуострова на 1–2 порядка превосходит интенсивность его накопления этим растением в лесах Средней полосы (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение КП  $^{137}\text{Cs}$  в чернике с литературными данными\*.

Объект	КП, $\times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$
Район КоАЭС	16–87 в ветвях, 17–218 в листьях
Белорусское полесье (Переволоцкий, Переволоцкая, 2010)	1,25–13,4
Леса, Брянская область (Fesenko et al., 2001)	4,1–24,1
Леса, Гомельская область (Vulko et al., 2014)	3,2–5,98
Леса, Германия (Zibold et al., 2009)	50

\* в литературе как правило указываются КП для побегов черники без разделения на ветви и листья

Показатели аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в других растениях приведены в Главе 6 диссертационной работы.

При проведении корреляционного анализа с расчетом коэффициентов ранговой корреляции Спирмана наибольшее количество значимых взаимосвязей было обнаружено между показателями биоаккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  — удельными активностями, КН и КП  $^{137}\text{Cs}$  в хвое и ветвях - и такими почвенными свойствами как содержание в почве калия, биофильных элементов (кальция и магния) и ее богатство органическим веществом (запасы гумуса и подстилки). Все эти взаимосвязи имели отрицательный характер, т.е. чем выше были содержание органического вещества и элементов питания, тем ниже были удельные активности, КН и КП  $^{137}\text{Cs}$  в хвое и ветвях (табл. 3).

Значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в различных частях подцетив лишайников рода *Cladonia* варьировали на исследованных площадках от 14,8 до 139,4 Бк/кг. Они сопоставимы с диапазоном 5–90 Бк/кг, который зафиксирован для ягеля на фоновых территориях Скандинавии и Кольского полуострова в ряде лихенологических исследований (Семенихина, 2006; Кузьменкова, 2010; Кизеев, 2016; Воробьева и др., 2017; Koivurova et al.,

2015). Средняя удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в верхней части подстилки оказалось значимо больше, чем его удельная активность в средней ( $t=3,48$ ,  $p<0,05$ ) и нижней ( $t=3,84$ ,  $p<0,05$ ) частях. При этом уровни накопления  $^{137}\text{Cs}$ , зафиксированные в средней и нижней частях, между собой значимо не различались.

Таблица 3. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмана между коэффициентами аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в растительных компонентах и некоторыми почвенными свойствами.

Показатель	$\text{K}_2\text{O}$ (мг/100 г)	$\text{Ca}^{2+}$ (ммоль+/100г)	$\text{Mg}^{2+}$ (ммоль+/100г)	Запас гумуса (кг/м <sup>2</sup> )
КН в ветвях сосны обыкновенной	<b>-0,76</b>	<b>-0,87</b>	<b>-0,64</b>	-0,55
КН в хвое сосны обыкновенной	<b>-0,67</b>	<b>-0,80</b>	<b>-0,75</b>	<b>-0,58</b>
КП в ветвях ели обыкновенной	<b>-0,71</b>	<b>-0,61</b>	-0,29	<b>-0,68</b>
КН в хвое ели обыкновенной	-0,57	<b>-0,79</b>	<b>-0,93</b>	<b>-0,89</b>
КН в ветвях березы повислой	-0,43	<b>-0,61</b>	<b>-0,67</b>	-0,50
КН в листьях березы повислой	<b>-0,60</b>	<b>-0,63</b>	-0,47	<b>-0,65</b>
КН в ветвях черники миртолистной	<b>-0,58</b>	<b>-0,74</b>	-0,44	-0,42
КН в листьях черники миртолистной	-0,57	<b>-0,64</b>	-0,50	-0,26
КН в ветвях голубики обыкновенной	<b>-0,70</b>	<b>-0,79</b>	-0,56	<b>-0,85</b>
КН в листьях голубики обыкновенной	<b>-0,62</b>	<b>-0,66</b>	-0,56	<b>-0,73</b>
КН в слоевище плевроциума Шребера	<b>-0,69</b>	<b>-0,78</b>	-0,50	-0,47

\* Примечание: полужирным выделены значения  $r_s$ , свидетельствующие о значимых взаимосвязях. Для  $n=12$  и  $p=0,05$  значимым является значение  $|r_s|>0,58$ .

Результаты кластерного анализа позволили выделить три типа вертикального распределения  $^{137}\text{Cs}$  в подстилке лишайников и верхних почвенных горизонтах на исследованной территории. Для большинства площадок (8), объединенных в первый кластер, характерно накопление  $^{137}\text{Cs}$  в верхней части подстилки лишайников, выступающих главным биологическим геохимическим барьером. В ельнике на площадке П-4 и в одном из сосняков на площадке К-III, включенных во второй кластер,

значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  в подстицах лишайников и подстилке снижены, указывая на их слабую аккумуляционную способность по сравнению с остальными исследованными биогеоценозами. Вместе с тем, в отдельных сосняках на площадках П-3 и К-1, включенных в третий кластер, наибольшие уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  приурочены к подстилочным горизонтам почвы, тогда как в подстицах лишайников накопление радионуклида не выражено (рис. 6). Аккумуляционная способность ягеля может объясняться тем, что на пути аэральных выпадений  $^{137}\text{Cs}$  плотный лишайниковый ковер становится эффективным механическим и геохимическим барьером, препятствующим вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в нижележащие слои (Бязров, Пельгунова, 2016). Кроме того, верхняя часть подстиц является наиболее молодой и активно растущей, что способствует более интенсивному поглощению биофильного элемента калия и одновременно  $^{137}\text{Cs}$ , схожего с ним по химическим свойствам.

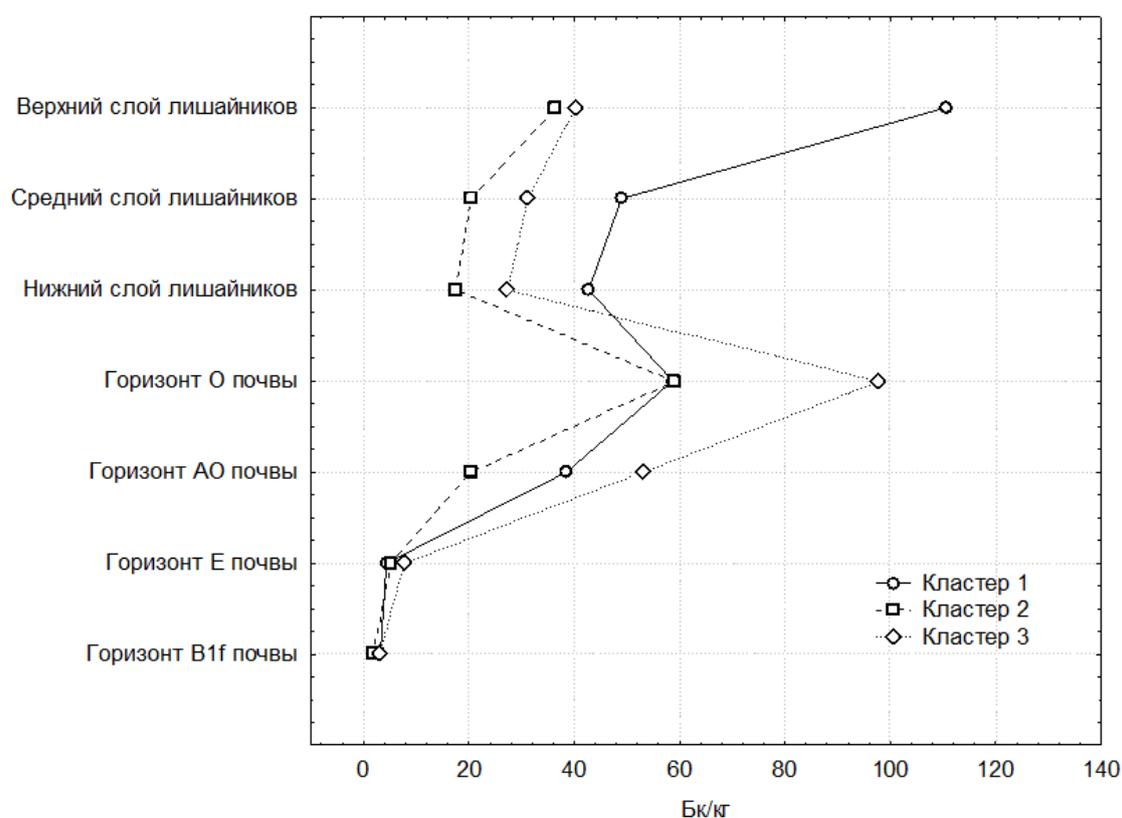


Рис. 6. Вертикальное распределение средних значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в слоях подстиц лишайников и горизонтах почвы для выделенных кластеров 1, 2, 3

Влияние КоАЭС на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в растительном покрове выявлено не было. Удельные активности этого радионуклида в растительных компонентах в СЗЗ не имели значимо более высокие значения, чем в зоне наблюдения и на фоновой площадке. Также не были обнаружены значимые взаимосвязи между ними и факторами, которые позволяют учесть влияние АЭС: расстоянием от нее, частотой и повторяемостью ветров, идущих в направлении от нее к площадкам.

В то же время практически для всех изученных растений удалось обнаружить значимые отрицательные взаимосвязи между показателями аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в них и содержанием в почве органического вещества, подвижного калия и обменных кальция и магния. Из этого следует вывод, что в условиях бедности иллювиально-железистых подзолов органическим веществом, элементами питания и биофильными элементами, а также глинистыми минералами  $^{137}\text{Cs}$  проявляет значительную подвижность в почвах и активно накапливается в растительном покрове. Значения показателей биоаккумуляции (КН и КП) этого радионуклида в компонентах растительного покрова северотаежных экосистем превосходили значения этих показателей, характерные для фоновых и загрязненных ландшафтов средней полосы России, в том числе гидроморфных, и оказались сопоставимыми с такими показателями для северотаежных экосистем скандинавских стран.

## Выводы

1. На всей исследуемой территории Кольского полуострова, включая зону влияния КоАЭС, плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  0–30 см слоя почв существенно ниже установленного контрольного уровня в  $37000 \text{ Бк/м}^2$  ( $1 \text{ Ки/км}^2$ ). Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в почвенных профилях в основном имеет регрессивно-аккумулятивный характер, и лишь в редких случаях для него наблюдается элювиально-иллювиальная дифференциация. Здесь большая часть его запаса сосредоточена в минеральной толще почв, а не в лесной подстилке

2. В экосистемах северной тайги на иллювиально-железистых подзолах  $^{137}\text{Cs}$  характеризуется значительно большей миграционной подвижностью в системе почва-растение, чем в других почвах России. По присутствию суммарно в водорастворимой и обменной формах соединений, доступных для поглощения растениями, техногенные радионуклиды располагаются в следующий убывающий ряд  $^{137}\text{Cs} > ^{239}\text{Pu} > ^{237}\text{Np} > ^{90}\text{Sr}$ .

3. Коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  в растения хвойных биогеоценозов Кольского полуострова достигают 75. Коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  в эти растения достигают  $218 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ . Полученные значения превосходят значения этих показателей, установленные для аналогичных растительных видов в хвойных и смешанных лесах средней полосы, в несколько раз, в отдельных случаях — на 2 порядка. Это может свидетельствовать о высоком риске миграции  $^{137}\text{Cs}$  по звеньям пищевой цепи в таежных экосистемах Заполярья.

4. В растительном покрове интенсивность накопления  $^{137}\text{Cs}$  в древесном ярусе нарастает в ряду береза < сосна < ель, а среди их компонентов ветви < листья < хвоя; в травяно-кустарничковом ярусе - черника < голубика, а среди их компонентов ветви < листья; в мохово-

лишайниковом покрове - плевроциум <ягель (нижняя ≤ средняя < верхняя части ягеля). Биоиндикаторами загрязнения почвенно-растительного покрова  $^{137}\text{Cs}$  являются представители семейства Вересковые (*Ericaceae*) и лишайники рода *Cladonia*.

5. В экосистемах северной тайги влияние запаса подстилки, содержания в почвах органического вещества, физической глины, подвижного калия, кальция и магния на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в почвенно-растительном покрове проявляется в большей степени, чем в чем лесах средней полосы России: значения коэффициента Спирмана между почвенными свойствами и запасами  $^{137}\text{Cs}$  в почве здесь достигают 0,84; значения коэффициента Спирмана между почвенными свойствами и коэффициентами аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  в растительных компонентах достигают 0,93.

6. Технологические выбросы  $^{137}\text{Cs}$  КоАЭС не оказывают значимого влияния на его запасы в почвенно-растительном покрове зоны возможного загрязнения. Запасы  $^{137}\text{Cs}$  в 0–30 см слое почв независимо от расположения от АЭС меньше установленного контрольного уровня в 1 Ки/км<sup>2</sup> и (37000 Бк/м<sup>2</sup>) и позволяют отнести исследуемую местность к относительно незагрязненным территориям.

*Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI.*

1. **Попова М.Б.**, Липатов Д.Н., Манахов Д.В., Кизеев А.Н., Ушамова С.Ф. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  лишайниками рода *Cladonia* в зоне влияния Кольской атомной электростанции // *Радиационная биология. Радиоэкология.* – 2022. – т. 62. – № 5. – с. 543–554. – DOI: 10.31857/S0869803122050125. ИФ по РИНЦ (2022) – 0,685. 1,4 п.л., 0,9 п.л.
2. **Ророва М.В.**, Goryachenkova T.A., Borisov A.P., Kazinskaya E.I., Lavrinovich E.A., Manakhov D.V. Modes of Occurrence of Artificial Radionuclides in Soils in the Area of the Kola Nuclear Power Plant // *Geochemistry International.* – 2021. – V. 59. – № 10. – P. 983–990. – DOI: [10.1134/S0016702921100062](https://doi.org/10.1134/S0016702921100062). IF Scopus - 0,881, 1,0 п.л., личный вклад – 0,7 п.л.
3. **Ророва М.В.**, Manakhov D.V., Kizeev A.N., Ushamova S.F., Lipatov D.N., Chirkov A.Yu., Orlov P.S., Mamikhin S.V. Contents and Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in Podzols in the Area of the Kola Nuclear Power Plant // *Eurasian Soil Science.* – 2020. – V. 53. – № 7. – P. 986–994. – DOI: [10.1134/S106422932007011X](https://doi.org/10.1134/S106422932007011X). IF Scopus - 1,575. 1,1 п.л.; 0,7 п.л.

Полный список опубликованных работ имеется на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/tarantinka/>