

На правах рукописи

КАЛИНОВСКАЯ АЛЕКСАНДРА АНДРЕЕВНА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И РАДИОНУКЛИДОВ В
ПОЧВАХ ПРИРОДНЫХ И АГРОЭКОСИСТЕМ СЕВЕРО-ВОСТОКА
ЛУЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Специальность: 06.01.03 – агрофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена на кафедре почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Научный руководитель:

Ефремова Марина Анатольевна

кандидат биологических наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» заведующая радиобиологической лабораторией, доцент кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой

Официальные оппоненты:

Пузанов Александр Васильевич

доктор биологических наук, профессор, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук

Анисимов Вячеслав Сергеевич

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиохимии и аналитической химии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 006.001.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Агрофизический научно-исследовательский институт» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, д.14. Тел. +7 (812) 534-13-24, факс +7 (812) 534-19-00, e-mail: office@agrophys.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Агрофизического научно-исследовательского института и на сайте <http://www.agrophys.ru>, с авторефератом – на сайте <http://vak.ed.gov.ru> и <http://www.agrophys.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14, ФГБНУ АФИ.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 006.001.01

доктор биологических наук

_____ Е.В. Канаш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Хозяйственная деятельность человека изменяет биосферу и постепенно превращает её в новую земную оболочку – техносферу. Свойства техносферы могут значительно отличаться от фоновых показателей биосферы, характерных для нормальной жизнедеятельности организмов. Почва является ключевым компонентом биосферы, перекрестком биогеохимических потоков вещества. Загрязнение почв приводит к неблагоприятным изменениям качества природных вод, воздуха, пищевых ресурсов человечества. Свойства почв определяют поступление химических элементов, как эссенциальных, так и токсичных, в пищевые цепи (Водяницкий, и др., 2012; Гладкова и др., 1983; Панин, 2006). К токсичным химическим элементам относится ряд тяжелых металлов и металлоидов, а также радионуклидов, повышенное содержание которых в продуктах растительного и животного происхождения может иметь неблагоприятные последствия для здоровья людей. При этом некоторые из этих элементов, такие как медь и никель, находясь в объектах природной среды в фоновых концентрациях, играют важную биохимическую роль в функционировании организмов. Положительная роль других микроэлементов, таких как кадмий, а также ультрамикроэлементов, представленных в почве радионуклидами, в жизнедеятельности организмов не выявлена (Кабата-Пендиас и др., 1989).

При санитарно-гигиенической оценке почв сельскохозяйственного назначения, а также почв населенных пунктов важным критерием определения степени их загрязнения является показатель фонового содержания химического элемента (Черников и др., 2000; Левшаков, 2011). Значение этого показателя в почвах сильно варьирует в зависимости от минералогического состава почвообразующей породы и генезиса почвы в целом. Для определения фонового содержания химических элементов в почве требуется проведение экологического мониторинга почв природных и сопредельных агроэкосистем, позволяющего оценить степень влияния почвенных свойств на пространственную вариабельность этого показателя. В связи с этим, исследования по установлению содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и радионуклидов (^{232}Th , ^{226}Ra) в почвах природных и агроэкосистем северо-востока Лужской возвышенности являются актуальными.

Степень разработанности темы. В установление естественного содержания меди, никеля и кадмия в дерново-подзолистых и подзолистых почвах значительный вклад внесли исследования Н.Г. Зырина, Л.К. Садовниковой (1985), В.А. Алексеенко, В.В. Добровольского (1992), М.М. Овчаренко, М.А. Шильникова (1997), Ю.В. Алексеева (2008), Н.Г. Федорец, О.Н. Бахмет и др. (2015). Изучению естественной радиоактивности почв северо-запада и севера России большое внимание уделено в работах Д.М. Рубцова (1972), Т.В. Гиль (1983), В.Ф. Дричко, Э.П. Лисаченко (1984), Р.М. Алексахина, Н.П. Архипова и др. (1990), Н.Г. Рачковой и И.И. Шухтомовой (2010). По данным А.В. Литвиновича почвенный покров этого региона в связи со сложным генезисом обладает наиболее высокой пестротой агрохимических

свойств по сравнению с почвами более южных областей, что вызывает необходимость более детального изучения распределения тяжелых металлов и радионуклидов в почвах, сформированных на разных почвообразующих породах и разных элементах рельефа.

Объектом исследования явились почвы, находящиеся на территории северо-восточной части Лужской возвышенности и фитоценозы этой территории.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось определение содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs) в почвах естественных экосистем и агроэкосистем северо-востока Лужской возвышенности, установление факторов, влияющих на пространственное и внутритпочвенное распределение этих химических элементов.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить основные разновидности почв территории северо-востока Лужской возвышенности.

2. Оценить пространственную изменчивость агрохимических свойств почв Лужской возвышенности.

3. Определить влияние сельскохозяйственного использования почв на величину пространственной изменчивости агрохимических показателей почвы.

4. Определить валовое содержание тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и радионуклидов (^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs) в почвах.

5. Сравнить валовое содержание тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) в почвах, сформированных на разных почвообразующих породах, на территории естественных экосистем и агроэкосистем северо-востока Лужской возвышенности.

6. Сравнить валовое содержание естественных радионуклидов ^{232}Th и ^{226}Ra в почвах разных типов на территории естественных экосистем и агроэкосистем северо-востока Лужской возвышенности.

7. Изучить взаимосвязь агрохимических свойств почв северо-востока Лужской возвышенности с содержанием в них тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и радионуклидов (^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs).

8. Оценить степень загрязнения почв северо-востока Лужской возвышенности искусственным радионуклидом ^{137}Cs .

9. Исследовать накопление Ni, Cu, Cd в естественных фитоценозах северо-востока Лужской возвышенности.

Научная новизна исследования. Впервые проведен сравнительный анализ содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd), а также радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs), в подзолистых и дерново-подзолистых почвах естественных экосистем северо-востока Лужской возвышенности, сформированных на флювиогляциальных песках, двучленных породах, моренном суглинке, и в аналогичных почвах этой территории, находившихся ранее в сельскохозяйственном использовании, а также определено содержание радионуклидов и тяжелых металлов в аллювиальных почвах. Впервые оценена пространственная изменчивость агрохимических свойств почв северо-востока

Лужской возвышенности, и проведена комплексная оценка взаимосвязи этих свойств почв с содержанием в них тяжелых металлов и радионуклидов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в работе результаты отражают важные теоретические аспекты распределения тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs) в почвах южной части средней тайги, сформированных на флювиогляциальных песках, двучленных породах, моренном суглинке и аллювиальных отложениях. Проведен сравнительный анализ валового содержания Ni, Cu, Cd, ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах естественных экосистем исследуемой территории и в почвах агроэкосистем. Определена пространственная изменчивость агрохимических свойств почв на территории северо-востока Лужской возвышенности и влияние этих свойств на валовое содержание тяжелых металлов и радионуклидов в профиле почв исследуемой территории.

Практическая значимость работы заключается в определении фонового содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) и естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th) в подзолистых и дерново-подзолистых почвах, сформированных на флювиогляциальных отложениях, двучленных породах и моренном суглинке, а также в аллювиальных почвах северо-востока Лужской возвышенности, что имеет большую значимость при проведении мониторинга почв природных и антропогенных экосистем Ленинградской области с целью установления степени их загрязнения тяжелыми металлами и радионуклидами. Установлены уровни загрязнения почв северо-востока Лужской возвышенности искусственным радионуклидом ^{137}Cs .

Методология и методы исследований. Данные, представленные в диссертации, получены в результате проведения экологического мониторинга почв северо-востока Лужской возвышенности в соответствии с общепринятой методикой почвенных исследований. Химические исследования почв и растений и радиоспектрометрический анализ почв были проведены на кафедре почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО СПбГАУ и в аккредитованной аналитической лаборатории университета по стандартным, аттестованным или общепринятым в почвоведении, агрохимии и радиометрии методикам. Для обработки полученных результатов почвенного мониторинга были применены методы математической статистики.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается строгим соблюдением методических принципов проведения экологического мониторинга почв, а также выполнением химических исследований почв и растений, радиоспектрометрического анализа почв в аккредитованной аналитической лаборатории университета по стандартным, аттестованным или общепринятым в почвоведении, агрохимии и радиометрии методикам. Проведена статистическая обработка полученных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сельскохозяйственное использование дерново-подзолистых почв северо-востока Лужской возвышенности, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, способствовало

увеличению пространственной изменчивости содержания углерода органических соединений, подвижных форм фосфора и калия, валового содержания железа в гумусовом горизонте, и сужению диапазона изменчивости кислотности почв по сравнению с аналогичными почвами естественных экосистем.

2. Средние значения валового содержания Ni, Cu, Cd и ^{232}Th в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв, сформированных на моренном суглинке, и аллювиальных почв значительно выше, чем в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках. Удельная активность ^{226}Ra существенно не различается в гумусовом горизонте почв подзолистого типа почвообразования, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, и в аллювиальных почвах.

3. В естественных экосистемах северо-востока Лужской возвышенности валовое содержание Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, составляет соответственно: $1,23 \pm 0,69$ мг/кг, $2,53 \pm 0,74$ мг/кг и $0,12 \pm 0,06$ мг/кг почвы. В гумусовом горизонте постагрогенных почв валовое содержание никеля и кадмия не имеет существенных различий с почвами естественных экосистем, валовое содержание меди превышает в 3 раза содержание элемента в почвах естественных экосистем.

4. Валовое содержание Ni, Cu, Cd в почвах северо-востока Лужской возвышенности достоверно зависит от гидролитической кислотности почвы, суммы поглощенных оснований, содержания углерода органических соединений, подвижного калия, валового содержания железа в почве. Удельная активность ^{232}Th тесно связана с суммой поглощенных оснований и содержанием подвижного калия в почве, удельная активность ^{226}Ra в почве достоверно зависит от гидролитической кислотности почвы.

5. Почвы северо-востока Лужской возвышенности загрязнены искусственным радионуклидом – цезием-137. Доля почв, загрязненных ^{137}Cs с удельной активностью 7,8-952 Бк/кг, составляет 48% обследуемой территории. Удельная активность ^{137}Cs в почвах связана тесной прямой корреляционной зависимостью с обменной кислотностью почвы ($\text{pH}_{\text{КСИ}}$).

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК» (г. Санкт-Петербург, 27-28 февраля 2017 г.), на всероссийском конкурсе на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России в номинации «Биологические науки» (2 и 3 этап, март 2017 г.), на международной научно-практической конференции «Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий» (г. Санкт-Петербург, 24-26 января 2019 г.), на международной молодежной конференции «Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии» (г. Обнинск, 3-4 октября 2019 г.).

Организация исследования и личный вклад соискателя. Научные исследования выполнялись в ФГБОУ ВО СПбГАУ на кафедре почвоведения и агрохимии имени Л.Н. Александровой согласно плану научно-исследовательских работ, утвержденных на 2017-2021 гг. (раздел 1.1.1 «Трансформация почвенного покрова России и воспроизводство плодородия почв», подраздел 1.1.1.3 «Радиоэкологическая оценка состояния природных и сельскохозяйственных ландшафтов Северо-Запада РФ»). Соискателем проведен экологический мониторинг почв под руководством доцентов кафедры почвоведения и агрохимии ФГБОУ ВО СПбГАУ Т.В. Родичевой и М.А. Ефремовой. Химико-аналитические и радиометрические исследования проведены лично автором работы. Планирование исследований и обсуждение их результатов происходило совместно с руководителем диссертационной работы.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 4 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 159 страницах печатного текста. Состоит из введения, 3 глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 230 источников, среди которых 188 отечественных и 42 зарубежных. Текстовая часть работы содержит 2 рисунка, 30 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе «Тяжелые металлы (Ni, Cu, Cd) и естественные радионуклиды (^{226}Ra и ^{232}Th) в почвах» представлен литературный обзор, посвященный современным научным представлениям о свойствах и поведении Cd, Cu, Ni, ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{137}Cs в почве. Проанализированы данные, характеризующие источники загрязнения агроэкосистем тяжелыми металлами и радионуклидами, дан теоретический анализ результатов научных исследований по выявлению факторов, воздействующих на поведение тяжелых металлов в почве, рассмотрены вопросы нормирования содержания загрязняющих веществ в почве.

Во второй главе «Объекты и методы исследований» описаны объекты исследования: почвы, находящиеся на территории северо-восточной части Лужской возвышенности и факторы их образования. В ходе почвенно-экологического мониторинга было заложено 23 почвенных разреза в пойме реки Оредеж и на холмисто-грядовой надпойменной части рельефа, занимающей 83% рассматриваемой территории. Всего обследовано 115 га территории. При закладке почвенных разрезов учитывалась принадлежность территории к сельскохозяйственным угодьям или естественным экосистемам. Сельскохозяйственные угодья представлены многолетними залежами и занимают 34% обследованной территории.

Образцы почв были отобраны из каждого почвенного горизонта и проанализированы в лаборатории в соответствии с общепринятыми и аттестованными методами, а также методами ГОСТ с целью определения

показателей агрохимической характеристики почв: содержания углерода органических соединений, обменной и гидролитической кислотности, суммы поглощенных оснований, содержания подвижного фосфора и калия в почве. Валовое содержание Ni, Cu, Cd, Fe в почве и содержание Ni, Cu, Cd в растительных пробах было определено атомно-абсорбционным методом, а содержание ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{137}Cs оценивалось по удельной активности гамма-спектрометрическим методом. С пяти почвенных разрезов были отобраны растительные пробы. Растения были разобраны по ботаническому составу для определения содержания тяжелых металлов.

В главе изложена методология почвенно-экологических исследований, химического и радиометрического анализа почв и растений. Математическая обработка результатов исследования была проведена методами вариационного, корреляционного анализов с использованием компьютерной программы Microsoft Excel.

В третьей главе «Результаты исследований» описаны результаты проделанной диссертационной работы. Выводы, сделанные на основании полученных данных, приведены в заключении диссертационной работы.

Почвы обследуемой территории. Для систематизации результатов исследования все почвы были разделены на 4 категории (выборки):

- 1) *почвы естественных экосистем, сформированные на флювиогляциальных песках и двучленных породах:* дерново-среднеподзолистая песчаная контактно-глеевая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (I разрез); дерново-слабоподзолистая песчаная контактно-глеевая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (II и V разрез); дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (III, VIII, IX разрезы); неглубокоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (IV и X разрезы); дерново-сильноподзолистая песчаная контактно-глеевая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (VI разрез); дерново-среднеподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (VII разрез);
- 2) *постагрогенные почвы, сформированные на флювиогляциальных песках и двучленных породах:* дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (XI, XII, XVI разрезы); дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (XIII разрез); дерново-слабоподзолистая супесчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (XIV разрез); дерново-среднеподзолистая супесчаная контактно-глеевая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (XV разрез);

- 3) *посттагrogenные почвы, сформированные на красно-буром моренном суглинке*: дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая глееватая обычная на моренном суглинке (XVII разрез); дерново-слабоподзолистая среднесуглинистая глееватая обычная на моренном суглинке (XVIII разрез); дерново-среднеподзолистая среднесуглинистая обычная на моренном суглинке (XIX разрез);
- 4) *аллювиальные почвы*: аллювиальная дерновая песчаная на аллювии (XX разрез); аллювиальная лугово-болотная среднесуглинистая на аллювии (XXI разрез); аллювиально-луговая среднесуглинистая на аллювии (XXII разрез); аллювиально-болотная иловато-перегнойная на аллювии (XXIII разрез).

Почвенно-экологический мониторинг показал, что на территории северо-востока Лужской возвышенности преобладают дерново-подзолистые и подзолистые почвы легкого гранулометрического состава, сформированные на флювиогляциальных песках, а также на флювиогляциальных песках, подстилаемых красно-бурым моренным суглинком (рисунок 1).



Рисунок 1 – Состав почв обследуемой территории (%)

Агрохимические свойства почв Лужской возвышенности. Почвы естественных экосистем, характеризуются типичными для территории Северо-Запада РФ агрохимическими показателями (повышенная кислотность, низкое содержание углерода органических соединений и поглощенных оснований), что обусловлено промывным водным режимом и деятельностью подзолистого процесса (таблица 1).

Таблица 1 – Агрохимические показатели почв естественных экосистем, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах

Горизонт		A ₁	A ₂	B	BC	C	D
Агрохимические показатели*	C _{орг} , %	0,88±0,26	0,45±0,27	0,83±0,74	0,25±0,18	0,47±0,23	0,57±0,11
	pH _{KCl}	4,03±0,59	3,65±0,50	4,61±0,86	4,90±0,64	4,61±0,60	4,01±0,44
	Hг, ммоль/100г	3,15±1,37	1,08±0,34	1,37±0,99	1,16±0,67	0,80±0,22	1,55±0,73
	S, ммоль/100г	0,96±0,45	0,67±0,35	1,28±1,09	1,42±0,94	1,73±1,22	1,63±1,13
	V, %	25,3±13,0	42,6±11,5	43,1±21,4	52,0±23,8	57,40±27,9	49,5±23,8
	Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг	10,20±5,58	4,56± 2,31	38,80±22,4	36,90±17,30	44,85±29,40	38,96±50,91
	Подвижный K ₂ O, мг/кг	16,90±9,4	8,52±5,81	14,90±7,90	13,41±14,20	19,10±18,03	54,72±3,30
	Fe, мг/кг	699±360	3594±3396	6416±6159	1613±345	4260±5242	14509±4534

* данные получены по результатам статистической обработки десяти почвенных разрезов

В гумусовом горизонте естественных экосистем коэффициенты вариации содержания углерода органических соединений и обменной кислотности существенно ниже коэффициентов вариации остальных агрохимических показателей, которые приближаются к 50% (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты вариации агрохимических показателей почв естественных экосистем, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, %

Горизонт	Агрохимические показатели							
	C _{орг}	pH _{KCl}	Hг	S	V	Подвижные формы		Fe
						P ₂ O ₅	K ₂ O	
A ₁	29,3	14,7	43,5	46,8	51,5	54,9	55,5	51,6
A ₂	59,6	13,8	31,3	53,0	27,1	50,7	67,7	94,5
B	88,7	18,6	72,1	85,6	49,6	57,9	52,8	96,0
BC	74,3	13,1	58,0	66,2	45,9	46,9	105	21,4
C	48,6	13,1	27,9	70,4	48,7	65,6	94,4	123
D	19,8	10,8	47,1	69,6	48,1	130	6,0	31,2

В постагрогенных почвах слабее выражены кислотные свойства по сравнению с почвами естественных экосистем (отсутствует ярко выраженный подзолистый горизонт, степень насыщенности основаниями выше в 2,4 раза) (таблица 3). Содержание подвижных форм фосфора и калия в этих почвах выше в 13,3 и 1,6 раза соответственно, чем в почвах естественных экосистем.

Таблица 3 – Агрохимические показатели постагрогенных почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах

Горизонт		A ₁	A ₂	B	BC	C	D
Агрохимические показатели*	C _{орг} , %	1,35 ±0,85	1,56	0,64±0,30	0,50±0,36	0,93±1,15	0,24±0,17
	pH _{KCl}	4,51±0,52	4,70	4,82±0,49	5,11 ±0,51	4,89±0,14	4,46±0,82
	Hг, ммоль/100г	2,20±0,48	1,37	1,21±0,41	0,74±0,30	1,03±0 21	1,92±1,81
	S, ммоль/100г	3,64±1,17	1,40	2,84±1,68	2,61 ±2,28	2,36±0,51	5,66±5,18
	V, %	61,7±7,3	50,5	65,3±19,2	71,0±14,4	69,2±9,0	75,1 ±0,9
	Подвижный P ₂ O ₅ , мг/кг	136±115	62,50	53,70±40,20	43,20±33,90	35,70±4,50	26,10±33,80
	Подвижный K ₂ O, мг/кг	27,45±28,00	23,00	13,64±12,14	12,20±7,30	67,10 ±58,20	42,90±0,30
	Fe, мг/кг	4785±3873	2910	8388±8121	6636±4564	9012±2547	9206±9088

* данные получены по результатам статистической обработки шести почвенных разрезов

Сельскохозяйственное использование почв в прошлом способствовало увеличению пространственной изменчивости содержания углерода органических соединений, подвижных форм фосфора и калия, валового содержания железа и, наоборот, стабилизировало кислотно-основные свойства почв в гумусовом горизонте (таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты вариации агрохимических показателей постагрогенных почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, %

Горизонт	Агрохимические показатели							
	C _{орг}	pH _{KCl}	Hг	S	V	Подвижные формы		Fe
						P ₂ O ₅	K ₂ O	
A ₁	63,1	11,5	21,6	32,0	11,8	84,6	102	81,0
A ₂	–	–	–	–	–	–	–	–
B	46,3	10,2	34,2	58,9	29,4	74,8	89,0	96,8
BC	71,9	10,0	40,3	87,4	20,3	78,5	59,9	68,8
C	123	2,8	20,6	21,6	12,9	12,6	86,9	28,2
D	70,7	18,4	94,3	91,4	1,2	129	0,7	98,7

Распределение тяжелых металлов в почвах Лужской возвышенности.

Фоновое валовое содержание тяжелых металлов в гумусовом горизонте почв естественных экосистем (рисунок 2) составило: $1,23 \pm 0,69$ мг/кг (Ni), $2,53 \pm 0,74$ мг/кг (Cu), $0,12 \pm 0,06$ мг/кг (Cd).

Сельскохозяйственное использование дерново-подзолистых почв на флювиогляциальных песках и двучленных породах не привело к существенному изменению в содержании никеля и кадмия в гумусовом горизонте. Валовое содержание меди было в 3 раза выше в постагрогенных почвах, по сравнению с почвами естественных экосистем (рисунок 3).

Коэффициенты концентрации изучаемых химических элементов в гумусовом горизонте почв естественных экосистем составили: 0,11 (Ni); 0,17 (Cu); 0,22 (Cd); в постагрогенных почвах легкого гранулометрического состава: 0,20 (Ni); 0,51 (Cu); 0,16 (Cd). Таким образом, валовое содержание тяжелых металлов не превышает фоновые уровни, характерные для почв Северо-Запада РФ.

Коэффициенты вариации валового содержания Ni, Cu и Cd, в гумусовом горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв естественных экосистем составили 57, 29 и 47% соответственно. В постагрогенных почвах коэффициенты вариации содержания меди и кадмия были выше в 2,2 и 1,6 раза.

В большинстве обследованных почв легкого гранулометрического состава среднее содержание Ni и Cu возрастало вниз по профилю, распределение Cd по почвенному профилю было более равномерным.

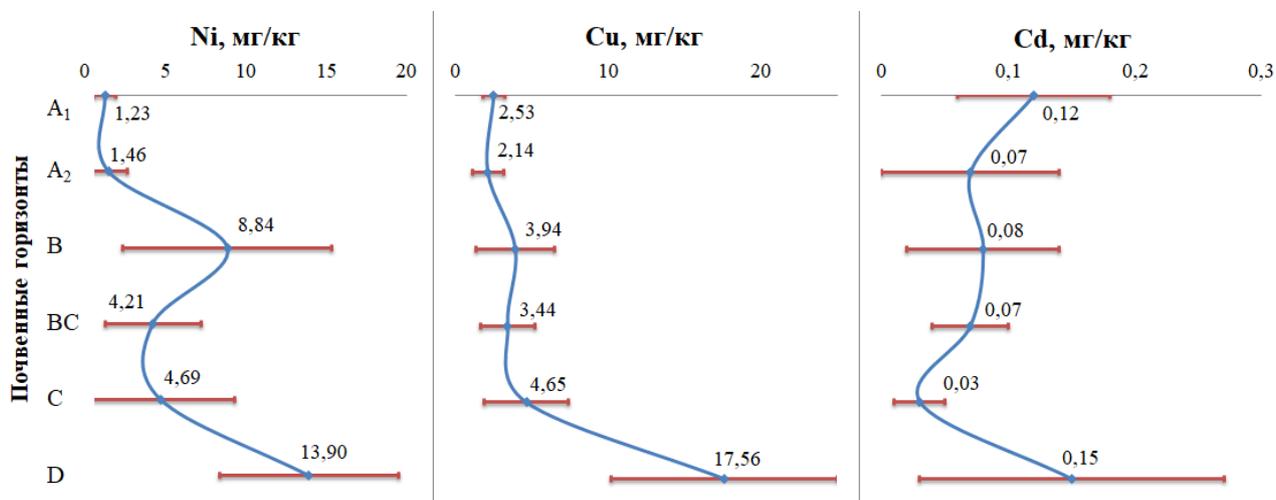


Рисунок 2 – Содержание тяжелых металлов в почвах естественных экосистем, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах

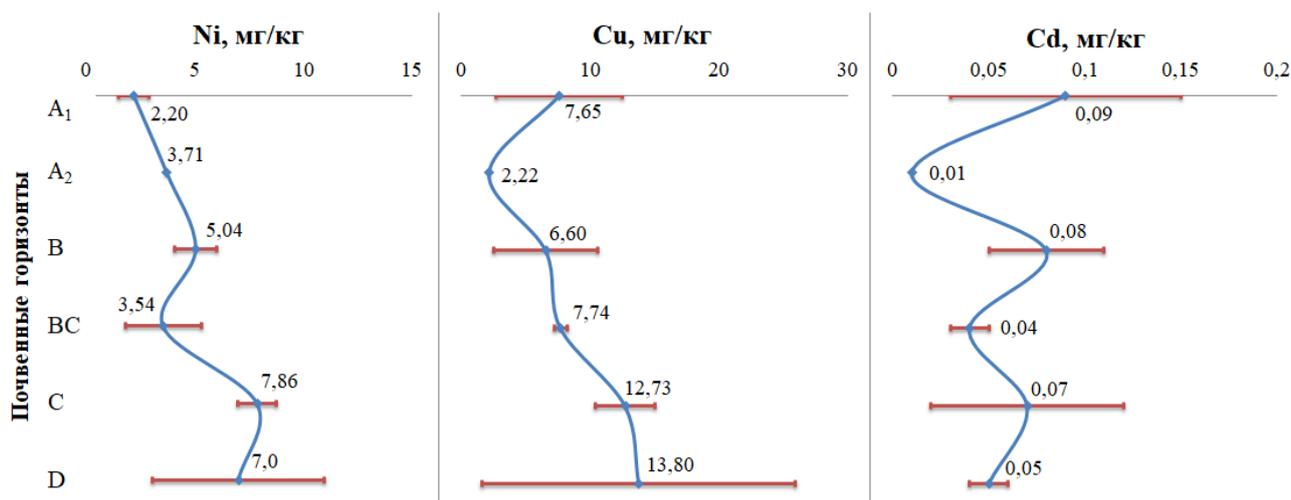


Рисунок 3 – Содержание тяжелых металлов в постагrogenных почвах, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах

Средние показатели содержания тяжелых металлов в гумусовом горизонте дерново-подзолистых почв, сформированных на красно-буром моренном суглинке выше, чем в почвах легкого гранулометрического состава естественных экосистем и агроэкосистем, соответственно: Ni в 15 и 8 раз, Cu – в 3,7 и 1,2 раза, Cd – в 2 и 3 раза (рисунок 4).

Содержание тяжелых металлов в гумусовом горизонте аллювиальных почв выше, чем в почвах автоморфных ландшафтов: Ni – в 2–28 раз, Cu – в 2–8 раз, Cd – в 10–14 раз (рисунок 5). На обследуемой территории Лужской возвышенности встречаются аллювиальные почвы трех групп: дерновые, луговые и болотные, различающиеся местоположением в рельефе местности. Между собой эти почвы значительно отличаются по содержанию тяжелых металлов. При усреднении валового содержания тяжелых металлов по типу почвы проявляется высокая вариабельность содержания никеля (41%), меди (65%) и кадмия (92%).

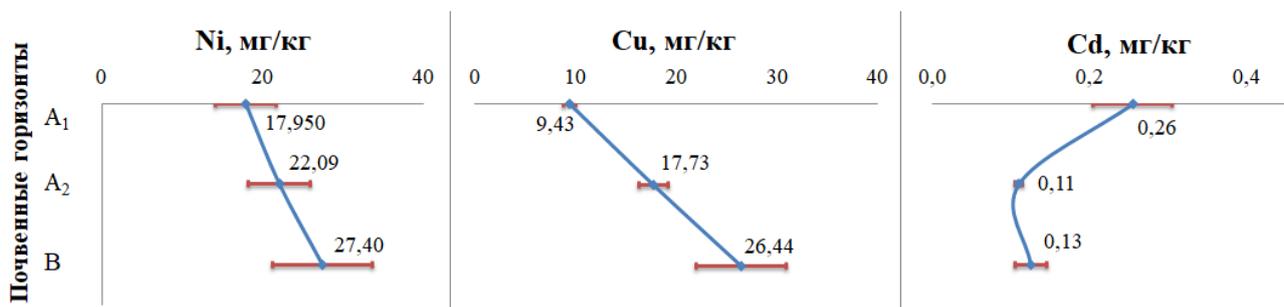


Рисунок 4 – Содержание тяжелых металлов в постагrogenных почвах, сформированных на моренном суглинке

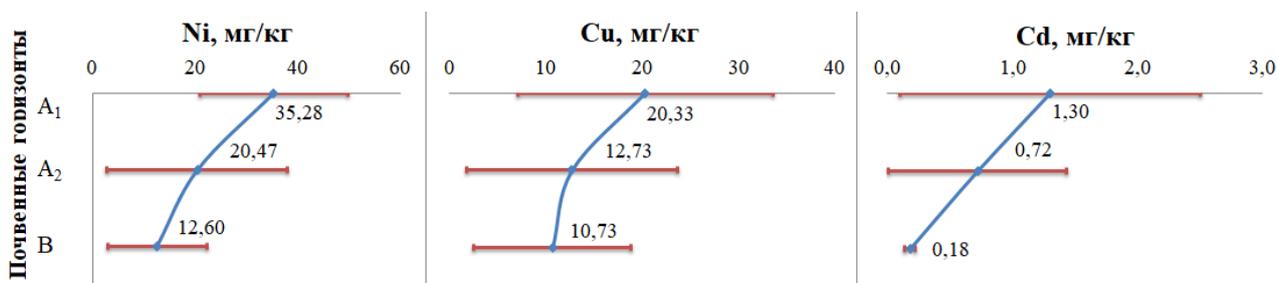


Рисунок 5 – Содержание тяжелых металлов в аллювиальных почвах

Корреляционный анализ показал, что валовое содержание Ni, Cu, Cd в почвах северо-востока Лужской возвышенности имеет достоверную положительную связь с суммой поглощенных оснований, гидролитической кислотностью, содержанием углерода органических соединений, подвижным калием, валовым содержанием железа в почве, и не зависит от обменной кислотности почвы и содержания в ней подвижного фосфора (таблица 5).

Таблица 5 – Корреляционная зависимость валового содержания Ni, Cu, Cd от агрохимических показателей почвы¹

Агрохимический показатель	Ni			Cu			Cd		
	n	r	$\frac{t_{факт.}}{t_{теор.}}$	n	r	$\frac{t_{факт.}}{t_{теор.}}$	n	r	$\frac{t_{факт.}}{t_{теор.}}$
C _{орг}	59	0,46	1,8	59	0,36	1,5	61	0,73	4,1
pH _{KCl}	61	-0,28	0,6	60	-0,19	-0,8	63	-0,20	0,8
H _г	57	0,68	4,7	57	0,48	2,0	59	0,78	4,7
S	61	0,84	10,0	60	0,74	4,2	63	0,54	2,5
V, %	56	0,32	0,8	56	0,42	1,7	58	0,06	0,3
Подвижный P ₂ O ₅	58	-0,12	0,1	56	0,07	0,3	59	-0,01	0,1
Подвижный K ₂ O	59	0,66	4,4	59	0,71	3,8	61	0,59	2,8
Fe	63	0,56	3,0	61	0,53	2,4	63	0,40	1,7

Содержание тяжелых металлов в фитоценозах Лужской возвышенности. Содержание тяжелых металлов было определено в растениях 29 видов. Различия по содержанию никеля, меди, кадмия в растениях составили 115, 19, 192 раза, соответственно, и зависели от генетических особенностей растений. Максимальное накопление никеля отмечено в кладонии бесформенной (*Cladonia deformis* L.), произрастающей на дерново-слабоподзолистой песчаной иллювиально-железистой почве на флювиогляциальных песках, его содержание составило 52,98±5,75 мг/кг. Наибольшее содержание меди (46,35±13,80 мг/кг) и кадмия (1,92±0,53 мг/кг) зафиксировано в иве белой (*Salix alba* L.) на аллювиальной лугово-болотной среднесуглинистой почве. Минимальное содержание тяжелых металлов

¹ Расчеты выполнены на 5%-м уровне значимости. Если отношение $t_{факт.}/t_{теор.} > 1$, то корреляционная связь существенна

отмечено в бруснике обыкновенной (*Vaccinium vitis-idaea, L.*) – $0,46 \pm 0,14$ мг/кг (Ni); овсянице луговой (*Festuca pratensis, L.*) – $2,42 \pm 0,60$ мг/кг (Cu); вереске обыкновенном (*Calluna vulgaris L.*) – менее 0,01 мг/кг (Cd).

Распределение радионуклидов в почвах Лужской возвышенности.

Содержание ^{232}Th в гумусовом горизонте почв зависит от условий почвообразования, в частности от почвообразующей породы и режима увлажнения почв. Так, удельная активность ^{232}Th в гумусовом горизонте аллювиальных почв (4-я категория) в среднем $53,6 \pm 13,8$ Бк/кг, что в 1,4 раза больше, чем в дерново-подзолистых почвах, сформированных на красно-буром моренном суглинке (3-я категория), и в 3 раза больше, чем в дерново-подзолистых и подзолистых почвах, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах (рисунок 6). Показатели средней удельной активности ^{232}Th в гумусовом горизонте почв 1 и 2 категории существенно не различаются, при одинаковой вариабельности – 32%.

В гумусовом горизонте исследованных почв удельная активность ^{226}Ra в среднем составляла 41,6 Бк/кг. В профиле дерново-подзолистых и подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, содержание радионуклида возрастало вниз по профилю (рисунок 7).

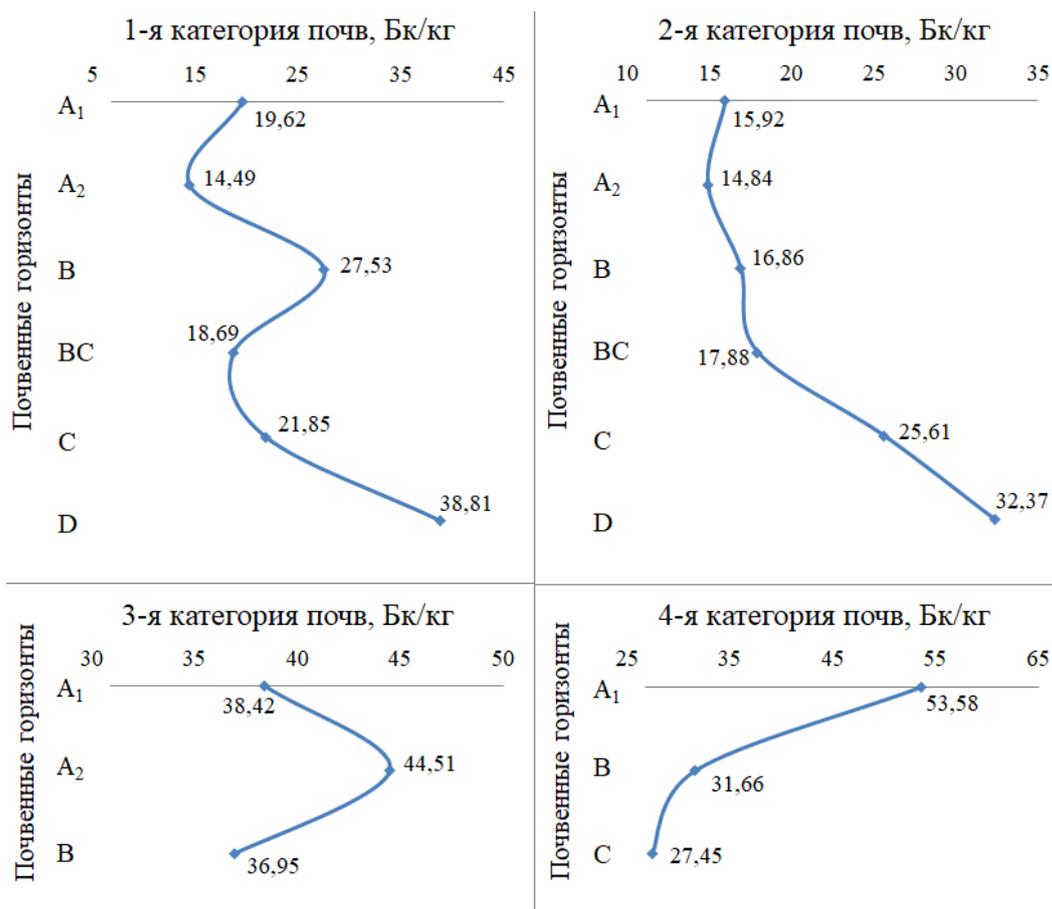


Рисунок 6 – Содержание ^{232}Th в почвах, сформированных на разных почвообразующих породах

Среднее значение удельной активности радия-226 в гумусовом горизонте почв естественных экосистем на флювиогляциальных песках и двучленной породе (1 категория) в 1,6 раза больше, чем в постагрогенных почвах, сформированных на тех же породах (2 категория). Однако в связи с высокой вариабельностью этого показателя в почвах 1-й категории (38%) и недостаточным количеством представленных данных для почв 2-й категории, достоверность этого явления не подтверждена.

В аллювиальных почвах содержание Ra-226 снижалось вниз по профилю. Высокая удельная активность радия и тория в верхнем горизонте этих почв, по-видимому, связана с привнесом обогащенных радионуклидами илистых частиц водами реки Оредеж в период половодья.

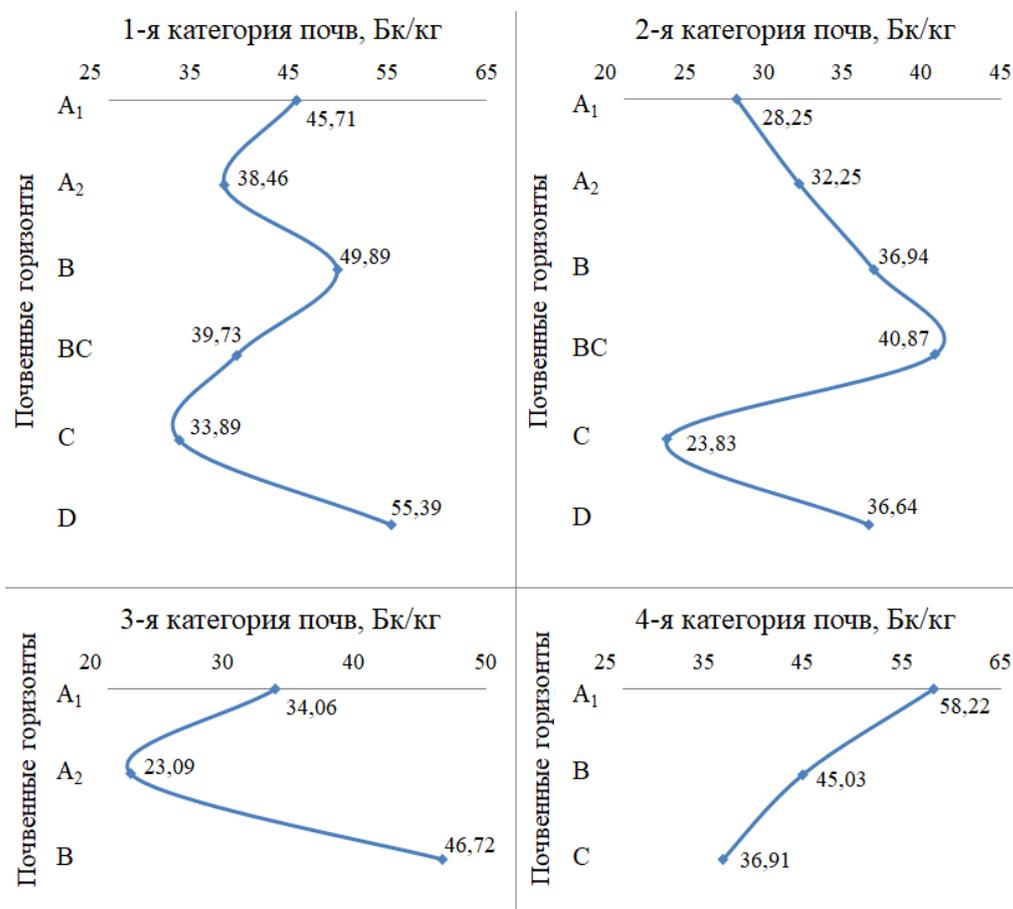


Рисунок 7 – Содержание ²²⁶Ra в почвах, сформированных на разных почвообразующих породах

В результате аварии на Чернобыльской АЭС ¹³⁷Cs, в составе атмосферных аэрозольных выпадений, попал на территорию Ленинградской области, в результате чего почвенный покров оказался загрязнен крайне неравномерно. Цезий-137 зафиксирован в 11 почвенных разрезах (из 23), что соответствует 47,8% обследуемой территории.

В минеральных почвах ¹³⁷Cs идентифицирован только в верхних горизонтах, до глубины 54 см, с активностью в диапазоне от 7,81 до 63,93 Бк/кг. В аллювиально-болотной иловато-перегнойной почве его удельная активность в верхнем гумусовом горизонте составила – 952±92 Бк/кг. В этом

объекте исследования Cs-137 обнаружен и в последующем глеевом горизонте. Здесь его удельная активность в 16 раз меньше.

Корреляционный анализ, в процессе которого все почвы были объединены в общую выборку, показал, что удельная активность ^{226}Ra в почвах достоверно зависит от гидролитической кислотности почвы (таблица 6). При этом связь между показателями прямо пропорциональная слабая.

Таблица 6 – Корреляционная зависимость содержания ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{137}Cs в почве от её агрохимических показателей²

Агрохимический показатель	^{226}Ra			^{232}Th			^{137}Cs		
	n	r	$\frac{t_{\text{факт.}}}{t_{\text{теор.}}}$	n	r	$\frac{t_{\text{факт.}}}{t_{\text{теор.}}}$	N	r	$\frac{t_{\text{факт.}}}{t_{\text{теор.}}}$
$C_{\text{орг}}$	42	0,22	0,7	52	0,40	1,5	8	0,24	0,3
pH_{KCl}	42	-0,25	0,8	53	-0,27	1,0	9	0,74	1,2
H_{Γ}	38	0,41	1,3	49	0,63	2,7	8	0,07	0,1
S	42	0,29	0,9	53	0,69	3,4	9	-0,22	-0,2
V	37	-0,24	-0,7	48	0,29	1,0	8	-0,24	-0,2
Подвижный P_2O_5	40	-0,16	-0,5	49	-0,19	0,6	8	0,16	0,2
Подвижный K_2O	40	0,25	0,8	51	0,61	2,6	8	-0,04	0,0
Fe	39	0,16	0,5	48	0,42	1,5	8	-0,59	-0,7

Удельная активность тория-232 в почвах достоверно зависела от содержания органического вещества, кислотности почвы, суммы поглощенных оснований, содержания подвижного калия и валового содержания железа. Наиболее сильная корреляционная зависимость выявлена между содержанием ^{232}Th с одной стороны и суммой поглощенных оснований и содержанием подвижного калия с другой стороны.

Распределение искусственного радионуклида ^{137}Cs в почвах достоверно зависело от обменной кислотности почвы (pH_{KCl}). Между показателями обнаружена тесная прямая положительная корреляционная связь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На северо-востоке Лужской возвышенности преобладают дерново-подзолистые и подзолистые почвы легкого гранулометрического состава, сформированные на флювиогляциальных песках, а также на флювиогляциальных песках, подстилаемых красно-бурым моренным суглинком.

2. На территории естественных экосистем в гумусовом горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, наибольшая пространственная изменчивость с коэффициентами вариации около 50% характерна для показателей

² Расчеты выполнены на 5%-м уровне значимости. Если отношение $t_{\text{факт.}}/t_{\text{теор.}} > 1$, то корреляционная связь существенна

гидролитической кислотности, суммы поглощенных оснований, степени насыщенности почвы основаниями, содержания подвижных соединений фосфора и калия, валового содержания железа. Коэффициенты вариации содержания углерода органических соединений и обменной кислотности существенно ниже. Сельскохозяйственное использование почв способствовало увеличению пространственной изменчивости содержания углерода органических соединений, подвижных форм фосфора и калия, валового содержания железа и понизило изменчивость кислотно-основных свойств почв.

3. На территории естественных экосистем северо-востока Лужской возвышенности валовое содержание Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте почв подзолистого типа почвообразования, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, составило соответственно: $1,23 \pm 0,69$ мг/кг, $2,53 \pm 0,74$ мг/кг и $0,12 \pm 0,06$ мг/кг почвы. В гумусовом горизонте постагрогенных почв валовое содержание тяжелых металлов не имело существенных различий с почвами естественных экосистем. Однако под влиянием сельскохозяйственной деятельности в постагрогенных почвах отмечено 3-х кратное превышение валового содержания меди, а также коэффициента концентрации этого элемента, по сравнению с почвами естественных экосистем.

4. На территории агроэкосистем валовое содержание тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах на моренном суглинке и в аллювиальных почвах было значительно выше, чем в почвах, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах. Так, содержание Ni в почвах на моренном суглинке в среднем было выше в 12 раз, Cu – в 2 раза, Cd – в 3 раза; в аллювиальных почвах содержание Ni было выше в 22 раза, Cu – в 2 раза, Cd – в 10 раз. По-видимому, эти различия, объясняются особенностями генезиса почв.

5. Выявлена достоверная прямая корреляционная связь между валовым содержанием Ni, Cu, Cd в почвах Лужской возвышенности, с одной стороны, и показателями гидролитической кислотности, суммы поглощенных оснований, содержания углерода органических соединений, подвижного калия, валового содержания железа в почве, с другой стороны.

6. Содержание естественного радионуклида ^{232}Th в почвах Лужской возвышенности зависело от типа почвы и типа почвообразующей породы. В гумусовом горизонте почв удельная активность радионуклида возрастала в ряду: дерново-подзолистые и подзолистые почвы, сформированные на флювиогляциальных песках и двучленных породах (17,8 Бк/кг), дерново-подзолистые почвы на моренном суглинке (38,4 Бк/кг), аллювиальные почвы (53,6 Бк/кг). Выявлена достоверная прямая корреляционная связь удельной активности ^{232}Th с содержанием углерода органических соединений, суммой поглощенных оснований, гидролитической кислотностью, содержанием подвижного калия и валовым содержанием железа в почве.

7. В гумусовом горизонте почв подзолистого типа почвообразования, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, а

также в аллювиальных почвах, удельная активность ^{226}Ra существенно не различалась и в среднем составила 41,6 Бк/кг. Тип распределения ^{226}Ra в профиле аллювиальных почв гумусово-аккумулятивный, в почвах подзолистого типа почвообразования содержание радионуклида постепенно увеличивалось вниз по профилю. Содержание ^{226}Ra в почвах достоверно зависело от величины гидролитической кислотности почвы.

8. Доля почв, загрязненных искусственным радионуклидом ^{137}Cs с удельной активностью 7,8–952 Бк/кг почвы, составила 48% обследуемой территории. Максимальное содержание радиоцезия определено в профиле аллювиальных почв. Удельная активность ^{137}Cs в почвах достоверно связана тесной прямой зависимостью с обменной кислотностью почвы (pH_{KCl}).

9. Содержание тяжелых металлов в естественных фитоценозах Лужской возвышенности зависело от физиологических особенностей растений и изменялось в широком диапазоне. Наибольшие различия по содержанию Ni, Cu, Cd в растениях составили 115, 19, 192 раза соответственно. Максимальное накопление Ni отмечено в кладонии бесформенной (*Cladonia deformis*, L.), произрастающей на дерново-слабоподзолистой песчаной иллювиально-железистой почве на флювиогляциальных песках, а наибольшее содержание Cu и Cd – в иве белой (*Salix alba*, L.) на аллювиальной лугово-болотной среднесуглинистой почве. Минимальное содержание Ni отмечено в бруснике обыкновенной (*Vaccinium vitis-idaea*, L.); Cu – в овсянице луговой (*Festuca pratensis*, L.); Cd – в вереске обыкновенном (*Calluna vulgaris* L.).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, согласно перечню ВАК:

1. Ефремова М.А., Родичева Т.В., Акатова А.А. (Калиновская А.А.) Сравнительный анализ содержания радионуклидов в почвах Лужского района Ленинградской области // Известия СПбГАУ. – 2017. – № 4 (49). – С. 63-70.
2. Акатова А.А. (Калиновская А.А.), Ефремова М.А. Содержание радионуклидов в почвах автоморфных и гидроморфных ландшафтов Лужского района Ленинградской области // Известия СПбГАУ. – 2018. – № 4 (53). – С. 87-93.
3. Ефремова М.А., Митрофанов В.В., Лохматова А.А., Акатова А.А. (Калиновская А.А.) Накопление кадмия и ртути в пшенице при известковании дерново-подзолистой почвы // Агрофизика. – 2020. – № 1. – С. 8-16.
4. Акатова А.А. (Калиновская А.А.), Ефремова М.А., Родичева Т.В., Распределение никеля, меди и кадмия в дерново-подзолистых и подзолистых почвах северо-востока Лужской возвышенности // Агрофизика. – 2021. – № 2. – С. 1-9.

Другие статьи и материалы конференций:

5. Акатова А.А. (Калиновская А.А.), Ефремова М.А., Родичева Т.В. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в дерново-подзолистой почве коллекционного сада СПбГАУ // Роль молодых ученых в решении актуальных задач АПК: сборник научных трудов международной научно-практической конференции молодых учёных. – 2017. – С. 3-5.

6. Ефремова М.А., **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)**, Цивка К.И. Влияние калия на распределение Cs-137 в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве // Гумус и почвообразование. – 2017. – № 21. – С. 124-128.

7. **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)**, Цивка К.И., Новохацкая Д.М. Влияние калия на накопление Cs-137 растениями льна из дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы // Роль молодых учёных в решении актуальных задач АПК: сборник по материалам международной научно-практической конференции молодых учёных. – 2018. – С. 5-7.

8. Ефремова М.А., **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)** Содержание Th-232, Ra-226 в дерново-подзолистой почве на флювиогляциальных песках // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов. – 2018. – С. 20-24.

9. **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)**, Нарольская А.С. Содержание радионуклидов в дерново-подзолистых почвах на флювиогляциальных песках // Вестник Студенческого научного общества. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 3-5.

10. **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)**, Ефремова М.А. Распределение тяжелых металлов в профиле дерново-подзолистых почв на флювиогляциальных песках // Почвы в биосфере: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. – 2018. – С. 162-164.

11. **Акатова А.А. (Калиновская А.А.)**, Ефремова М.А., Родичева Т.В. Влияние физико-химических свойств песчаных почв Лужской возвышенности на распределение Cs-137 в почвенном профиле // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии: сборник докладов международной молодежной конференции. – 2019. – С. 117-120.