ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Орлов Александр Сергеевич

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ ИЛАССКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.4. – Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Яковлев Евгений Юрьевич**

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией экологической радиологии, ФИЦКИА УрО РАН

Официальные оппоненты: **Микляев Петр Сергеевич**

доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, заместитель директора по научной работе, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (г. Москва)

Страховенко Вера Дмитриевна

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск); профессор кафедры минералогии и геохимии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск)

Защита состоится 17 марта 2025 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.26 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, проспект Ленина, дом 2а, строение 5 (учебный корпус № 20, аудитория 504)

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.26
к.г.-м.н. Булат Ринчинович Соктоев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Болотные экосистемы занимают огромные площади (до 30 % от территории Российской Арктики) и являются основными биоценозами Европейского Севера России (Сирин, 2017). Верховые (омбротрофные) торфяники, в связи с преимущественным атмосферным питанием, с одной стороны, являются уникальными экологическими архивами, исследование которых дает ценную информацию для понимания прошлых экологических и климатических событий, а с другой стороны, содержат данные об антропогенных загрязняющих нагрузках, связанных с накоплением широкого спектра атмосферных загрязнителей (Межибор, 2009; Шевченко и др., 2015; Savichev et al., 2020). Торфяные залежи, как неотъемлемый компонент болотных экосистем, стали основными концентраторами техногенной радиоактивности, поступившей на поверхность Земли с начала атомной эры (Mroz et al., 2017; Roux, Marshall, 2011; Yakovlev et al., 2021). Особенно остро эта проблема стоит для Архангельской области, где в 60-е гг. XX в. на территории о. Новая Земля проводились масштабные ядерные испытания, в результате которых в окружающую среду поступило значительное количество радиоактивных материалов. Ряд выпавших на поверхность торфяников радионуклидов оказался зафиксирован органическими и минеральными компонентами торфа в толще залежей болотных массивов. Депонированные в северных торфяниках радионуклиды вызывают озабоченность как с точки зрения повышения дозовых нагрузок на биоту торфяно-болотных экосистем, так и требуют проявления осторожности при хозяйственном использовании торфа, например, в качестве удобрений или топлива (Helariutta et al., 2000). В связи с глобальным потеплением климата и возрастающей техногенной нагрузкой на болотные экосистемы, связанной с курсом государственной политики, направленным на активное освоение Арктических территорий, в том числе Архангельской области (Указ Президента…, 2020), значительно меняются гидрологические (Пономарева, 2022) и физико-химические характеристики торфяных отложений. Такое изменение физико-химических параметров и условий торфяных залежей может послужить причиной миграции зафиксированных ими радионуклидов, что создает дополнительные экологические риски. При этом структура связей между гидрологическим режимом, физико-химическими и радиационными параметрами является очень сложной и до конца не изучена, а представленные в литературе результаты весьма противоречивы. Они ограничиваются в основном изучением вертикального распределения радионуклидов в залежах болот Западной Европы в контексте исторических поступлений (Fialkiewicz-Koziel et al., 2020; Lokas et al., 2014; Mroz et al., 2017; Roux, Marshall, 2011), торфяников Западной Сибири (Межибор, 2009). Для Северо-Западной части РФ, а в частности для Архангельской области, исследования такого рода практически вовсе отсутствуют. Поэтому получение новых знаний о физико-химическом режиме торфяных залежей данных территорий и изучение его влияния на особенности иммобилизации и перераспределения радионуклидов в торфяных отложениях под действием ряда негативных факторов естественного и антропогенного генезиса является актуальной задачей, составляющей суть данного диссертационного исследования.

Цель исследования. Оценка влияния основных физико-химических параметров торфяных залежей на накопление и особенности распределения радионуклидов в торфяно-болотных экосистемах Архангельской области (на примере Иласского болотного массива).

Задачи исследования:

1. изучить особенности изменения основных физических, химических и физико-химических параметров по вертикальному профилю залежей естественного, осушенного и постмелиоративно заболоченного участков верхового болота;
2. оценить активности техногенных (^{241}Am, ^{137}Cs) и естественных (^{238}U, ^{234}U и ^{210}Pb) радионуклидов, и их распределение в профилях исследуемых залежей;
3. на основе полученных экспериментальных данных выявить связи между физико-химическими и радиационными параметрами исследуемых залежей с разной степенью осушения;
4. с помощью модельного эксперимента оценить подвижность ^{137}Cs в торфяной залежи и изучить особенности его связывания верховым торфом и его компонентами;
5. на основании полученных геохимических результатов дать оценку изменения радиоэкологической обстановки в пределах торфяно-болотных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов и дать рекомендации по природосберегающему освоению и использованию болотных экосистем Северо-Запада РФ.

Научная новизна работы. Научная новизна исследования состоит в получении новых данных о накоплении, распределении и миграции радионуклидов в верховых торфяниках южноприбеломорского типа с учетом влияния физико-химических условий залежи. Впервые построены и охарактеризованы профили вертикального распределения радионуклидов с учетом особенностей изменения основных физических, химических и физико-химических параметров для естественных и антропогенно нарушенных (осушенных) залежей верхового бореального болота на примере Иласского болотного массива Архангельской области. На основе экспериментальных данных, полученных в результате проведения комплекса натурных и модельных исследований, для исследуемых объектов выявлена структура связей между гидрологическим режимом, физико-химическими и радиационными параметрами.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая и практическая значимость исследования заключаются в том, что полученные в ходе выполнения работы экспериментальные результаты могут служить фундаментальной основой прогнозирования изменения радиоэкологической обстановки в пределах торфяно-болотных экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов. Оценка влияния физико-химических параметров на накопление, распределение и вертикальную миграцию природных и техногенных радионуклидов в торфяных отложениях является важной для моделирования процессов перераспределения радиоактивных веществ и их воздействия на биоту в природных ландшафтах материковой субарктики России. Исследования по теме диссертации направлены на решение фундаментальной проблемы геохимии радиоактивных элементов, связанной с изучением особенностей (процессов, механизмов и скоростей) накопления и миграции радионуклидов в бореальных верховых торфяниках южноприбеломорского типа. Полученные результаты могут служить научной основой для анализа источников загрязнения, разработки моделей миграции радиоизотопов в окружающую природную среду, оценки степени воздействия ионизирующего излучения на живые организмы, оценки особенностей диагенеза органического вещества и динамики торфонакопления. Результаты исследования физико-химических и радиационных параметров естественного и подверженных осушению участков позволили сформулировать ряд рекомендаций для природосберегающего освоения и использования болотных экосистем арктической зоны РФ.

Объект исследования – торфяные залежи Иласского болотного массива Архангельской области и их основные компоненты - торф и болотные воды.

Предмет исследования – физические, химические, физико-химические и радиационные параметры торфяных залежей, их связь с гидрологическим режимом; влияние физико-химических параметров на накопление и распределение радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных залежах Иласского болотного массива.

Материалы исследования. В основу диссертационной работы положены результаты экспедиционных и экспериментальных работ лаборатории болотных экосистем Института экологических проблем севера и лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии им. Ф.Н. Юдахина Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лавёрова Уральского отделения Российской академии наук. Работы выполнялись в рамках следующих научных направлений, проектов и грантов:

1. Тема ФНИР «Особенности функционирования болотных экосистем Арктической зоны РФ», рег. № АААА-А18-118012390224-1;
2. Тема ФНИР «Особенности образования и диагенеза органического вещества в условиях водно-болотных экосистем Арктической зоны РФ» рег. № 122011400386-6;
3. Грант РНФ 22-27-20085 «Исследование роли физико-химических условий в процессах накопления и миграции радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных залежах Европейского Севера России (на примере Архангельской области);
4. Грант Президента МК-4298.2022.1.5 «Совершенствование методики датирования торфяных отложений по неравновесному свинцу ^{210}Pb».

Методология и методы исследования. В данной работе были использованы традиционные и современные методы (гравиметрический метод, прямая потенциометрия и кондуктометрия, микроскопия в проходящем свете, атомно-абсорбционная спектроскопия, термическое разложение с детектированием продуктов и др.), широко применяемые в области химии и физики торфа, так и современные методы радиоэкологии (гамма-спектрометрия, альфа-спектрометрия с радиохимической подготовкой). Использование этих методов, наряду со статистической обработкой и анализом полученных экспериментальных данных обеспечивают достоверность представленных в работе результатов.

Для выявления связей между физико-химическими параметрами и распределением активностей выбранного ряда радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных разрезах исследуемых участков в данной работе использовали парный корреляционный анализ. Для оценки значимых отличий между участками с разным гидрологическим режимом по анализируемым показателям применяли тест Манна-Уитни. Также выполнен факторный анализ, который позволил выявить структуру связей между изученными в диссертационной работе физическими, химическими, физико-химическими и радиационными параметрами торфяных залежей.

Статистическая обработка данных и построение графиков проводились с использованием программного пакета Microsoft Excel и Origin Pro 9.9.0.225, Version 2022 (OriginLab Corporation, USA).

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Диссертационная работа является результатом проведения ряда натурных исследований, выполненных на реальном объекте – верховых торфяниках европейского Севера РФ, и модельных исследований, с участием их отдельных элементов – торфа и болотной воды, с использованием классических и современных методов физико-

химического и радиоэкологического анализа по аккредитованным методикам. Достоверность полученных результатов обусловлена также использованием математической и статистической обработки экспериментальных данных.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 9 научных конференциях международного и всероссийского уровня: Международная конференция «X Галкинские чтения» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики» (г. Архангельск, 2020 г.); VI Международный полевой симпозиум «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее» (г. Ханты-Мансийск, 2021 г.); General Assembly of the European Geosciences Union» (г. Вена, 2021 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология и управление природопользованием» (г. Томск, 2021 г.); Пятый Международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» (г. Сургут, 2022 г.); Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность» (г. Гомель, 2022 г.); XI Российская молодёжная научно-практическая школа «Новое в познании процессов рудообразования» (г. Москва, 2022 г.; Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность» (г. Гомель, 2023 г.).

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе в журналах из списка ВАК – 5 публикаций; в изданиях, рецензируемых в базах данных Web of Science и Scopus – 6 публикации; в других изданиях – 10 публикаций.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в организации и проведении 20 полевых выездов в район проведения исследований, выполнении комплексного описания тестовых площадок, отборе натурного материала – 140 образцов торфа и 95 проб болотной поровой воды, измерении физико-химических параметров (pH, Eh и минерализация) торфяных залежей в полевых условиях. В рамках экспериментальной работы выполнена пробоподготовка торфа для оценки физических, химических, физико-химических и радиационных параметров. Осуществлено моделирование связывания радионуклидов торфом в лабораторных и натурных условиях. Проведена оценка влажности, насыпной и истинной плотности, кислотно-основных условий, зольности, потерь прокаливания и группового химического состава органического вещества торфа. Автором выполнен поиск и обобщение литературных источников по тематике исследования, проведена статистическая обработка экспериментальных данных и анализ связей между физико-химическими и радиационными параметрами торфяных залежей, сформулированы выводы и практические рекомендации.

Соответствие диссертации паспорту специальности. В работе изучаются основные физические, химические и физико-химические параметры и особенности их изменения по вертикальному профилю торфяных залежей бореального верхового болота в естественном и антропогенно нарушенном состоянии. Выполнена оценка активности ряда радионуклидов атмосферных выпадений (^{241}Am, ^{137}Cs, ^{238}U, ^{234}U и ^{210}Pb) и их распределение в профилях исследуемых залежей. С привлечением статистических методов анализа выявлены связи между физико-химическими и радиационными параметрами участков омбротрофного торфяника с естественным и трансформированным в результате осушения гидрологическим режимом. На примере ^{137}Cs выполнено моделирование миграции техногенных радионуклидов по профилю залежи и оценка особенностей его связывания торфом. Таким образом, работа соответствует паспорту специальности 1.6.4. – «Минералогия, кристаллография.

Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых» по направлениям исследований: п. 13, п. 15, п. 16 и п. 22 по геолого-минералогическим наукам.

Структура, объем и содержание работы.

Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (209 наименований); содержит 27 таблиц, 45 рисунков и 6 приложений.

В **первой главе** работы выполнен обзор и анализ литературных источников по тематике диссертационного исследования. Обоснован выбор объектов исследования, выявлены основные физико-химические параметры, потенциально значимые в процессах миграции радионуклидов атмосферных выпадений в торфяных залежах верховых болот Европейского Севера России.

Вторая глава раскрывает методологические особенности выполнения исследования. Проведено обоснование и характеристика тестовых площадок исследования. Представлены методы и подходы в определении физико-химических и радиационных параметров торфяных залежей, а также методы статистической обработки экспериментальных данных.

Третья глава посвящена изучению особенностей изменения основных физических, химических и физико-химических параметров по вертикальному профилю залежей естественного, осушенного и постмелиоративно заболоченного участков верхового болота на примере Иласского болотного массива, Архангельской области. Приведены результаты оценки активности техногенных (^{241}Am, ^{137}Cs) и естественных (^{238}U, ^{234}U и ^{210}Pb) радионуклидов и их распределение в профилях исследуемых залежей. С применением статистических методов анализа показана структура связей между гидрологическим режимом, физико-химическими и радиационными параметрами исследуемых залежей. Приводятся результаты модельных экспериментов по изучению особенности миграции техногенных радионуклидов (на примере ^{137}Cs) по профилю залежи и особенности их связывания торфом и его компонентами.

В **четвертой главе** на основе анализа и обобщения полученных в ходе выполнения исследования экспериментальных, а также литературных данных дана оценка возможных изменений радиоэкологической обстановки в пределах торфяно-болотных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов и даны рекомендации по природосберегающему освоению и использованию болотных экосистем Европейского Севера РФ.

Благодарности

Аспирант выражает глубокую благодарность научному руководителю, к.г.-м.н. Евгению Юрьевичу Яковлеву за консультации по теме исследования и общее руководство диссертационной работой; заведующей лабораторией болотных экосистем ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, к.т.н. Светлане Борисовне Селяниной за всестороннюю поддержку и помощь в период выполнения исследований; сотрудникам лаборатории экологической радиологии: н.с. С.Б. Зыкову – за помощь и консультации по вопросам оценки исследования активности изотопов урана в пробах торфяных отложений, м.н.с. А.А. Кудрявцевой – за помощь и консультации по вопросам оценки возраста торфяных кернов и скорости торфонакопления по изотопу ^{210}Pb, м.н.с. А.В. Пучкову – за помощь в отборе натурного материала; сотрудникам лаборатории болотных экосистем: к.х.н. И.Н. Зубову, к.с.-х.н. Т.И. Пономаревой и м.н.с. О.Н. Ярыгиной за помощь в сборе и обработке материалов по теме исследования.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. Преобразование торфяной залежи верхового болота южноприбеломорского типа в ходе осушения сопровождается значимыми изменениями физических и физико-химических параметров торфяных отложений, что способствует перераспределению золообразующих элементов в приповерхностном слое мощностью 25-30 см.

В рамках выполнения настоящего диссертационного исследования дана характеристика и выявлены отличительные черты физико-химических параметров профилей торфяной залежи верхового бореального болота, расположенных в пределах участка с естественным водным режимом (ИСНО-1), площадки с постмелиоративным заболачиванием (ИСНДО-1) и участка с действующим осушением (ИСО-1).

Согласно полученным экспериментальным данным, исследуемые профили залежей практически однородны по ботаническому составу и сложены преимущественно сфагновым видом торфа. В тоже время для торфа повторно заболоченного и осушенного участков было характерно наличие примеси пушицы в нижней части торфяного разреза. Тенденции изменения степени разложения (R) – основного структурно чувствительного параметра торфа, выражаются в ее постепенном увеличении с глубиной залегания. Установлено, что R торфа находится в интервалах 0-7 %, 5-10 % и 7-15 % для естественного, повторно заболоченного и осушенного участков, соответственно (рис. 1).

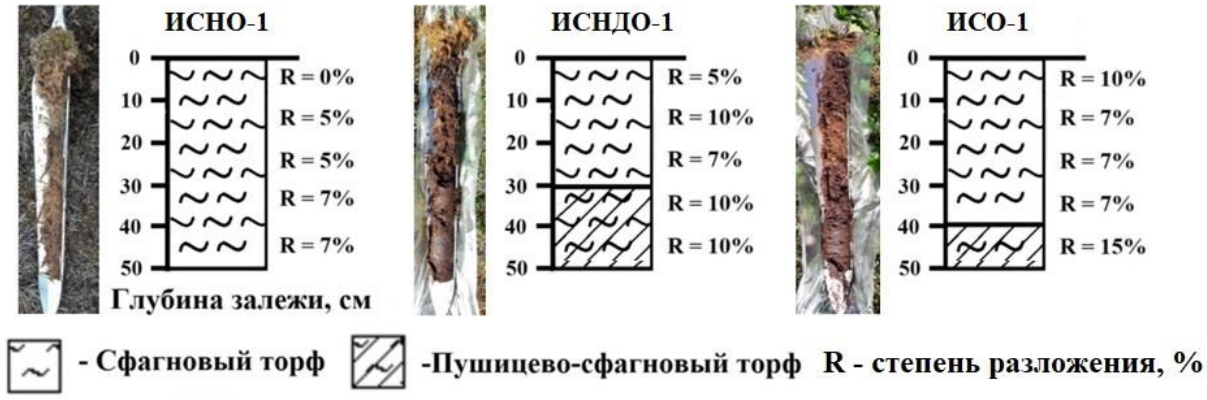


Рисунок 1 – Степень разложения, тип торфа и структура исследуемых залежей

Необходимо отметить, что изменение параметра R по глубине слоя 0-50 см, включающего в себя акротелм и верхнюю часть катотелма, для повторно заболоченного и осушенного участков, происходит не монотонно. Данная часть залежи наиболее подвержена влиянию колебаний уровня болотных вод и чувствительна к природным климатическим воздействиям и осушению. Наиболее значимое увеличение степени разложения отмечается в слое 10-20 см залежи ИСНДО-1 и 0-10 см залежи ИСО-1 (слой залежи, сформировавшийся с начала осушительных работ 1971-1975 г.) и обусловлено, по-видимому, активизацией микробиологического разложения органического вещества торфа в зоне усиленной аэрации. Снижение степени разложения в слое 0-10 см залежи ИСНДО-1 связано с процессом повторного заболачивания данного участка в связи с частичным зарастанием системы осушительных каналов.

В целом антропогенное изменение гидрологического режима исследуемых участков верхового болота в значительной мере сопровождается вертикальной усадкой

большей части торфяной залежи, что уже отмечалось ранее другими исследователями (Ponomareva, 2021). Это происходит, в том числе и за счет существенного снижения доли влаги в торфе, что приводит к уплотнению его структуры (рис. 2, а-б; 3, а-б; 4, а-б). Поэтому для участка с повторным заболачиванием и осушенного участка отмечаются значения насыпной плотности 0,19-0,39 г/см^3 и 0,19-0,41 г/см^3, соответственно. Полученные результаты существенно превышают значения данного параметра, зафиксированные для естественного участка этого болота (0,08-0,11 г/см^3) и других верховых торфяников прибеломорского типа в ненарушенном состоянии (Zubov, 2022; Ponomareva, 2021). Те же закономерности отмечаются и для естественной плотности сложения залежи – одного из показателей, используемых для оценки динамики накопления торфяных отложений.

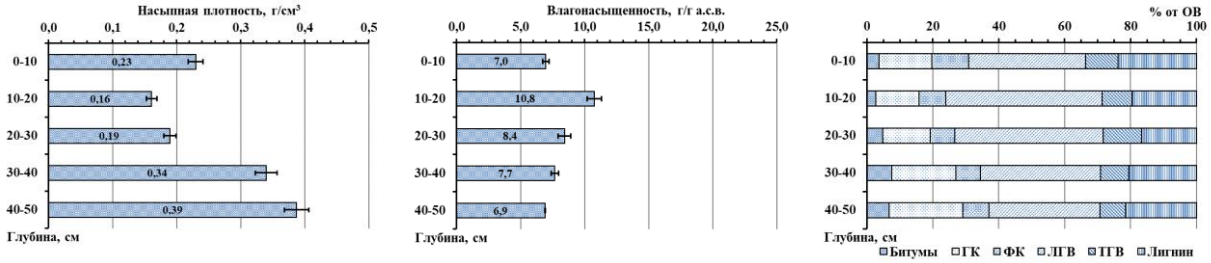
Темп торфонакопления, рассчитанный по неравновесному ^{210}Pb, для естественного участка ИСНО-1 находится в интервале от 0,09±0,02 до 1,30±0,05 см/год при средней скорости накопления 0,48±0,08 см/год. На площадке повторно заболоченного участка величина данного параметра изменяется от 0,08±0,02 до 2,1±0,05 см/год при среднем значении 0,57±0,06 см/год. Для осушенного участка ИСО-1 линейная скорость накопления торфа варьирует в пределах от 0,05±0,03 до 0,24±0,02 см/год, а среднее значение составляет 0,15±0,02 см/год. Это более чем в 3 раза меньше, чем для естественного и связано с изменением гидрологического режима на участке отбора профиля ИСО-1 обусловленного осушением, при котором наблюдается существенно меньшее накопление биомассы торфа и происходит уплотнение залежи. Данные по линейной скорости накопления торфа соответствуют полученным ранее данным для Европейской Субарктики России (Yakovlev et al., 2021).

Как уже отмечалось выше, осушение ожидаемо сопровождается снижением естественного влагосодержания в торфе. Для участка этого болота с естественным гидрологическим режимом (ИСНО-1) влагосодержание находится в интервале 15-24 г/г и снижается с глубиной залегания. Содержание влаги в торфе повторно-заболоченного (ИСНДО-1) и осушенного (ИСО-1) участков не имеет явно выраженной динамики по глубине залегания и находится в интервалах 6,9-10,8 г/г и 6,3-9,4 г/г, соответственно, что существенно ниже значений, зафиксированных для естественного участка. Полученные величины сопоставимы с литературными данными, например, для верховых болот Белоруссии (Лиштван, 1989). Такое изменение данного параметра в совокупности с сезонными колебанием уровня болотных вод (УБВ) может приводить к существенным вариациям аэрации и окислительно-восстановительного режима залежи. С одной стороны, снижение уровня болотных вод способствует протеканию окислительных процессов, однако длительное осушение может способствовать уплотнению структуры торфа, что, по-видимому, может служить причиной снижения диффузии атмосферного кислорода в более глубокие слои залежи.

Продолжительное изменение гидрологического режима в ходе глобальных климатических флуктуаций или осушения оказывает влияние на состояние органической части торфа, доля которой достигает 99 % от сухого вещества торфа (Бамбалов, 1984; ФНИР, 2021; Lishtvan et al., 1989) и предположительно оказывает определенную роль в связывании и миграции радионуклидов. В процессе торфонакопления происходит биогеотрансформация растительных остатков – разрушение структуры, распад синтезированных растениями органических веществ и образование новых соединений. Это закономерно проявляется в изменении соотношения основных компонентов органического вещества торфа (рис. 2в, 3в, 4в).

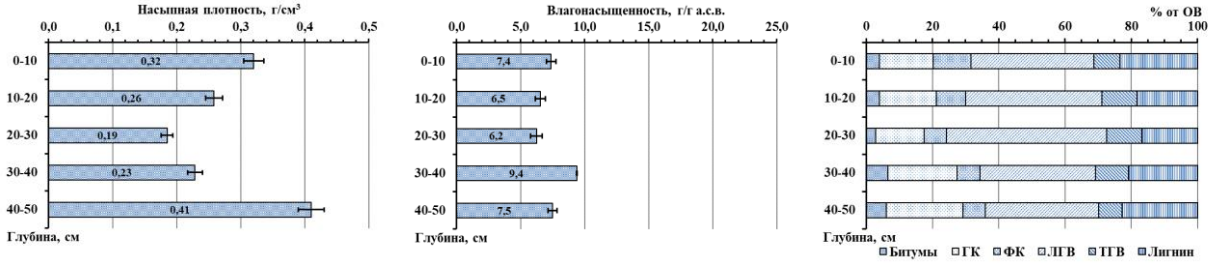
а) б) в)

Рисунок 2 – Насыпная плотность (а), естественное влагосодержание (б) и групповой компонентный состав органического вещества (в) торфа залежи ИСНО-1



а) б) в)

Рисунок 3 – Насыпная плотность (а), естественное влагосодержание (б) и групповой компонентный состав органического вещества (в) торфа залежи ИСНДО-1



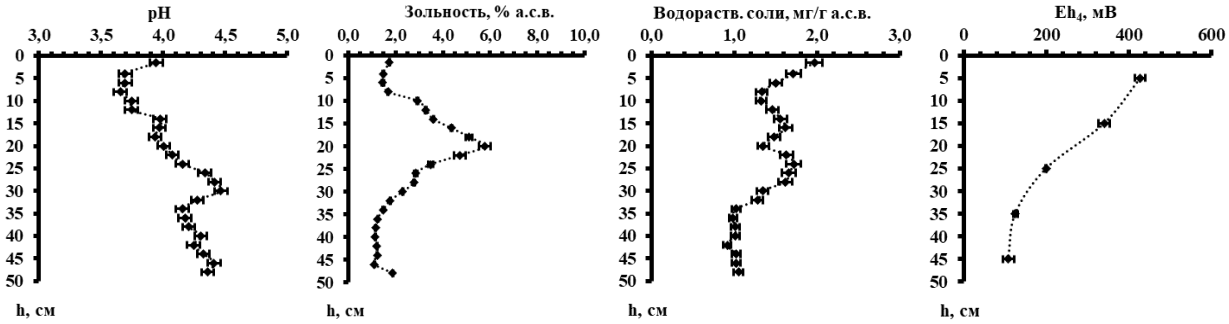
а) б) в)

Рисунок 4 – Насыпная плотность (а), естественное влагосодержание (б) и групповой компонентный состав органического вещества (в) торфа залежи ИСО-1

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для залежи с естественным гидрологическим режимом с глубиной залегания монотонно увеличивается доля термодинамически устойчивой составляющей – битумной части и ГК преимущественно за счет трансформации углеводной составляющей. При этом фульватный (ГК/ФК=0,45) тип гумусообразования сменяется на фульватно-гуматный (ГК/ФК=0,56-1,00) и гуматный (ГК/ФК=1,81-2,89). Для участка с постмелиоративным заболачиванием и осушенного участка характерно не монотонное изменение содержания компонентов ОВ по глубине, в частности верхний слой (0-20 см), подверженный аэрации, характеризуется повышенным содержанием биополимеров гумусовой природы и битумов, для залежи характерен гуматно-фульватный (ГК/ФК=1,41-1,45) и гуматный (ГК/ФК=1,60-3,40) типы гумусообразования. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по элементному составу, степени разложения, Eh_4 и другим физико-химическим показателям. Кроме того, цикличные сезонные колебания УБВ способствуют вертикальному переносу лабильных органических и минеральных компонентов, которые могут находиться в растворенном,

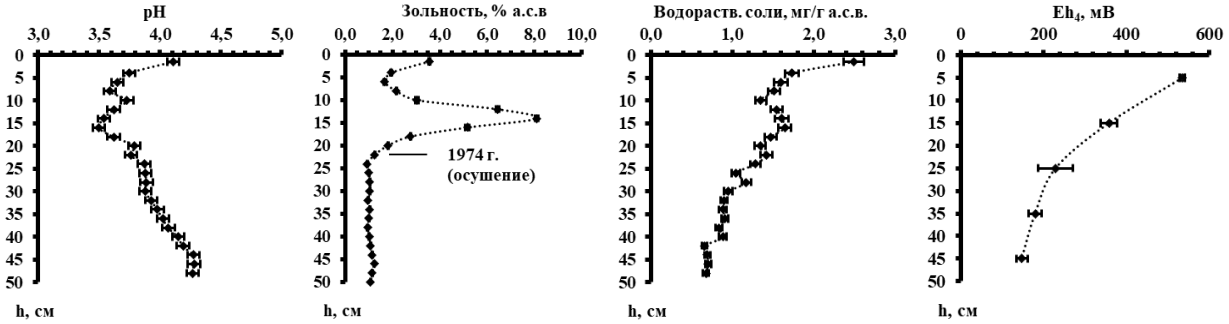
коллоидном и тонкодисперсном взвешенном состоянии. Это приводит, в том числе к вертикальной и литеральной дифференциации таких показателей как pH, содержание зольных компонентов и водорастворимых солей. Такие показатели принято относить к общетехническим параметрам торфа (Косов и др., 2007; Лиштван, 1989).

Величина pH в изученных торфяных профилях варьирует в пределах: 3,7-4,5 pH (ИСНО-1), 3,5-4,3 pH (ИСНДО-1) и 3,5-4,4 pH (ИСО-1). По полученным данным исследуемый торф можно отнести к сильнокислой группе, поскольку значения pH ниже 4,5 единиц (рис. 5а, 6а, 7а).



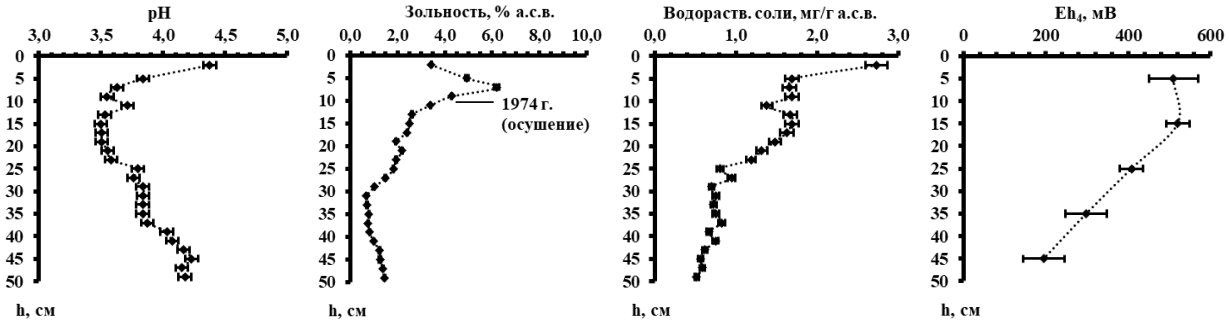
а) б) в) г)

Рисунок 5 – Физико-химические параметры залежи участка ИСНО-1:
а) pH водной вытяжки; б) зольность; в) водорастворимые соли (сухой остаток); г) Eh_4



а) б) в) г)

Рисунок 6 – Физико-химические параметры залежи участка ИСНДО-1:
а) pH водной вытяжки; б) зольность; в) водорастворимые соли (сухой остаток); г) Eh_4



а) б) в) г)

Рисунок 7 – Физико-химические параметры залежи участка ИСО-1:
а) pH водной вытяжки; б) зольность; в) водорастворимые соли (сухой остаток); г) Eh_4

Кислотность торфа обусловлена наличием свободных кислот, в частности уксусной, муравьиной, щавелевой, молочной и другими кислотами (Lishtvan et al.,

1989). В вертикальном распределении кислотно-основных условий наблюдается их незначительное снижение с глубиной. При этом отмечаются повышенные значения pH в приповерхностном слое торфа 0-6 см, характерные и для естественного, и для нарушенных участков, что связано с вымыванием низкомолекулярных органических кислот, которые могут влиять на подвижность радионуклидов. С другой стороны, вымывание низкомолекулярных кислот вглубь залежи, где превалируют восстановительные условия, могут способствовать протеканию процессов ацетокластического и автотрофного метаногенеза, при которых активно расходуются H^+, ацетат и формиат ионы (Garsia et al., 2000; Horn et al., 2003).

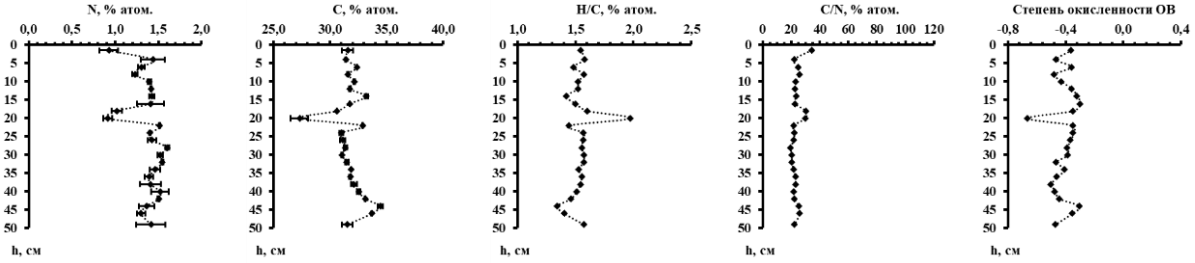
Величина зольности для естественного участка (ИСНО-1) изменяется в интервале 1,1-5,8 %, а максимум зольности зафиксирован на глубине 19-21 см. Он обусловлен, вероятно, вымыванием зольных компонентов с поверхностных слоев торфа и их концентрированием в данном слое. Антропогенное воздействие, проявляемое в прошлом, также может являться причиной скачка показателя зольности (Vaasma et al., 2017). Ниже глубины 19-21 см наблюдается тенденция немонотонного снижения зольности при переходе к более глубоким слоям профилей, связанная с атмосферным типом питания болота. Для участков ИСНДО-1 и ИСО-1 величина данного параметра составляет 0,9-8,1 % и 0,7-6,2 %. В вертикальном распределении отмечается максимум содержания зольных компонентов в горизонте 13-15 см и 6-8 см для профиля ИСНДО-1 и ИСО-1, соответственно. Таким образом, для этих участков происходит некоторое смещение обогащенного зольными компонентами горизонта вверх по разрезу по сравнению с естественным участком, что связано, вероятно, с уплотнением структуры торфа и с разложением его органической части вследствие осушения. Зафиксированные значения позволяют отнести торф данных залежей к малозольному типу с низкой степенью разложения (Parfenova et al., 2016).

Содержание водорастворимых солей для апробированных в настоящем исследовании торфяных разрезов находится в интервалах 0,8-1,8 мг/г (ИСНО-1), 0,7-2,5 мг/г (ИСНДО-1) и 0,5-2,7 мг/г (ИСО-1). В целом для них были зафиксированы единые тенденции изменения данного параметра по глубине (рис. 5в, 6в, 7в). Максимальная концентрация солей наблюдается в самом верхнем слое торфа. Ниже по разрезу отмечается практически монотонное снижение данного показателя, что, по-видимому, обусловлено атмосферным механизмом питания залежи, а также деятельностью ризосферы растений-торфообразователей. Полученные значения физико-химических параметров позволяют отнести исследуемый торф к кислой фации олиготрофных торфяных почв (Шишов и др., 2004).

Динамика изменения показателя Eh_4 по глубине исследуемой части торфяных профилей свидетельствует о наличии контрастного окислительно-восстановительного режима, при котором умеренно-окислительные условия при движении от поверхности в глубь залежи постепенно сменяются восстановительными. Явно выраженное снижение Eh_4 характерно для слоя 0-50 см для всех рассматриваемых в настоящей работе торфяных разрезов (рис. 5г, 6г, 7г). Средние значения (за весенне-осенний период 2021-2022 гг.) окислительно-восстановительного потенциала, зафиксированные для слоя 0-50 см, в пределах естественного участка составляет 109-428 мВ. Для повторно заболоченного участка и площадки с устойчивым осушением величина Eh_4 находятся в пределах 147-535 мВ и 195-521 мВ, соответственно, что несколько выше, чем для площадки с естественным гидрологическим режимом. Также необходимо отметить большую сезонную вариативность параметра Eh_4 для профилей ИСНДО-1 и ИСО-1 по сравнению с ИСНО-1, что связано с большей временной нестабильностью и более широким интервалом колебания уровня болотных вод. Параметры pH и

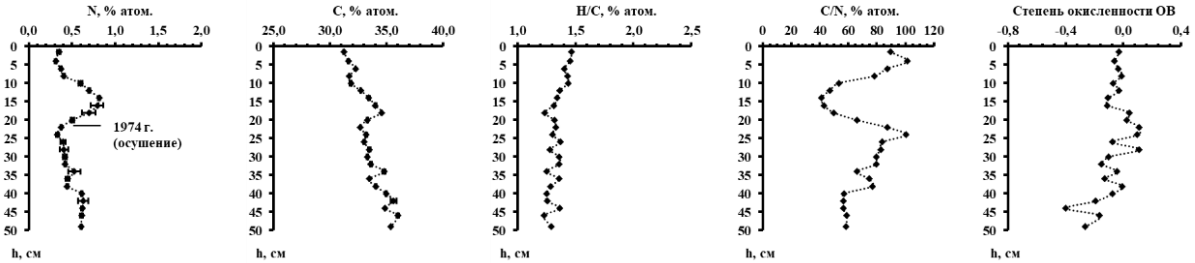
минерализация болотных вод не монотонно изменяются по глубине и находятся в интервалах 3,1-4,3 pH, 18-52 мг/л; 3,7-4,7 pH, 30-80 мг/л и 3,5-3,9 pH, 30-75 мг/л для ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1, соответственно, что в целом характерно для верховых болот таежных ландшафтов.

Относительное содержание основных элементов в органической части торфа составило: 0,9-1,6 (N); 27,3-34,4 (C); 46,3-53,9 (H); 16,8-19,3 (O) атомных % для разреза ИСНО-1; 0,9-1,6 (N); 27,3-34,4 (C); 46,3-53,9 (H); 16,8-19,3 (O) атомных % для разреза ИСНДО-1 и 0,3-1,0 (N); 31,0-35,0 (C); 43,4-47,3 (H); 16,6-23,6 (O) атомных % в профиле ИСО-1. Полученные значения в целом являются характерными для биомассы болотной растительности и торфов низкой степени разложения. Для изученных участков их изменение немонотонно по глубине разреза (рис. 8-10), что обусловлено протеканием множества химических и биохимических процессов в залежи.



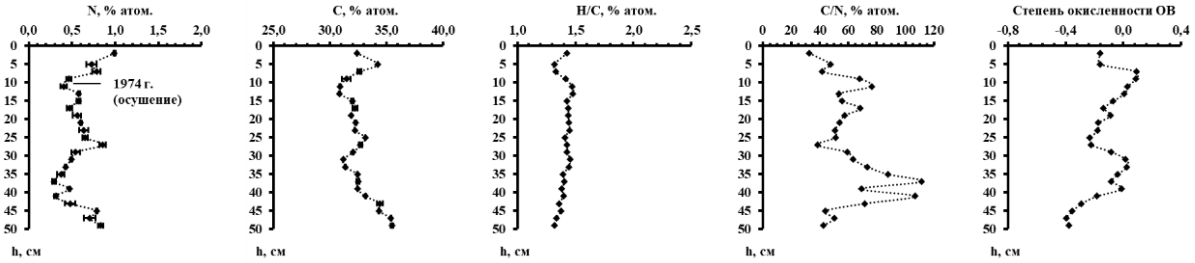
а) б) в) г) д)

Рисунок 8 – Элементный состав торфа залежи участка ИСНО-1:
а) азот (N); б) углерод (C); в) H/C; г) C/N; д) степень окисленности ОВ



а) б) в) г) д)

Рисунок 9 – Элементный состав торфа залежи участка ИСНДО-1:
а) азот (N); б) углерод (C); в) H/C; г) C/N; д) степень окисленности ОВ



а) б) в) г) д)

Рисунок 10 – Элементный состав торфа залежи участка ИСО-1:
а) азот (N); б) углерод (C); в) H/C; г) C/N; д) степень окисленности ОВ

Необходимо отметить некоторое науглероживание ОВ торфа при движении от поверхности вглубь залежи, а содержание кислорода, напротив снижается с глубиной залегания. Кроме того, отчетливо наблюдается снижение содержания N в торфе

профилей ИСНДО-1 и ИСО-1 по сравнению с профилем естественного участка ИСНО-1, что вероятно связано с интенсификацией микробных процессов деструкции ОВ, при которых часть запасенного в торфе азота расходуется почвенной биотой.

Величина H/C находится в интервалах 1,3-2,0 для ИСНО-1, 1,2-1,4 для ИСНДО-1 и 1,3-1,5 для ИСО-1, что указывает на явное преобладание алифатических структур в органической части торфа (H/C>1) (Orlov, 1992). Динамика данного параметра (рис. 8в, 9в, 10в) свидетельствует о некотором увеличении доли ароматических фрагментов в ОВ торфа с ростом глубины залегания и в результате осушения. Средняя степень окисленности органического вещества торфа для исследуемых участков составляет от -0,66 до -0,08 и увеличивается в ряду ИСНО-1, ИСНДО-1, ИСО-1. Отношение C/N составляет для естественного участка составляет 20-34, что является типичным для торфа мохового типа. Для повторно заболоченного и осушенного участка данный параметр варьирует в интервалах 41-102 и 33-114, соответственно, что свидетельствует о их сильной обедненности азотом в ходе осушительных процессов (Schulz, 2019).

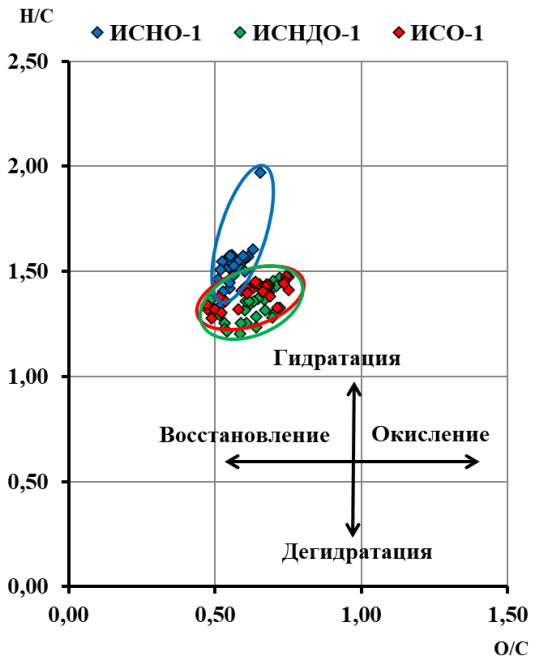


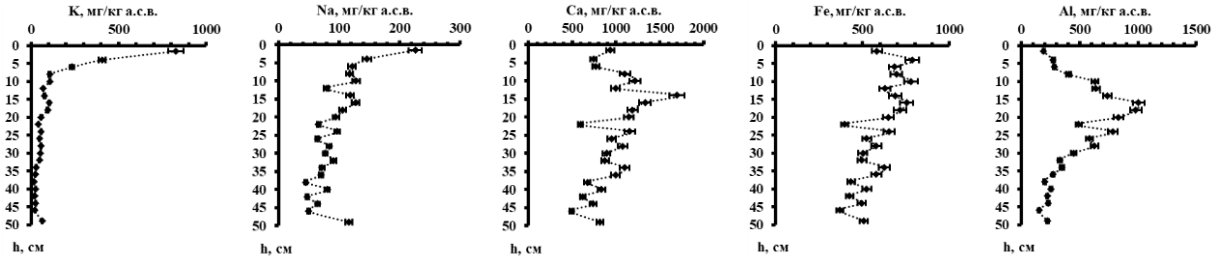
Рисунок 11 – Диаграмма отношений H/C – O/C торфа профилей исследуемых залежей (по Ван-Кревелину)

Графостатический анализ данных (по Ван-Кревелину) по элементному составу колонок торфа с ненарушенного, осушенного и участка со вторичным заболачиванием (рис. 11) показал, что осушение в значительной степени усиливает процессы окислительной трансформации органического вещества торфа в основном в приповерхностном слое залежи, при этом значительной интенсификации этих процессов в нижележащих слоях может и не наблюдаться. По-видимому, это связано с тем, что доступ кислорода вглубь залежи может ограничиваться (что отчасти подтверждается изменением показателей Eh_4) в первую очередь за счет уплотнения залежи.

Результаты по содержанию и вертикальному распределению основных золообразующих элементов в залежах исследуемых участков (рис. 12-14) свидетельствуют о том, что в целом для определяемого в исследовании спектра металлов, кроме Fe и Al, характерны тенденции снижения их содержания с глубиной залегания торфа. Это указывает на атмосферный источник их поступления и согласуется с представлением о функционировании верховых торфяниках (Межибор, 2009).

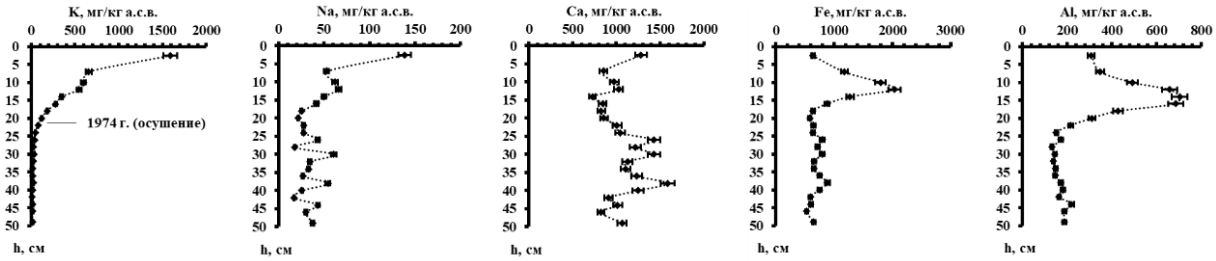
Концентрации элементов в торфе керна ИСНО-1 составили: K 16-826 мг/кг, Na 45-226 мг/кг, Mg 227-602 мг/кг, Ca 496-1697 мг/кг, Fe 370-788 мг/кг, Mn 5,8-74,9 мг/кг и Al 152-1004 мг/кг. Для торфа разреза ИСНДО-1 находятся в интервале: K 13-1589 мг/кг, Na 17-139 мг/кг, Mg 242-488 мг/кг, Ca 727-1583 мг/кг, Fe 526-2037 мг/кг, Mn 4,1-49,9 мг/кг и Al 132-704 мг/кг. В торфе профиля ИСО-1 содержание металлов составило:

K 22-1903 мг/кг, Na 6-138 мг/кг, Mg 156-857 мг/кг, Ca 483-3431 мг/кг, Fe 144-2957 мг/кг, Mn 3,5-342,3 мг/кг и Al 110-1142 мг/кг.



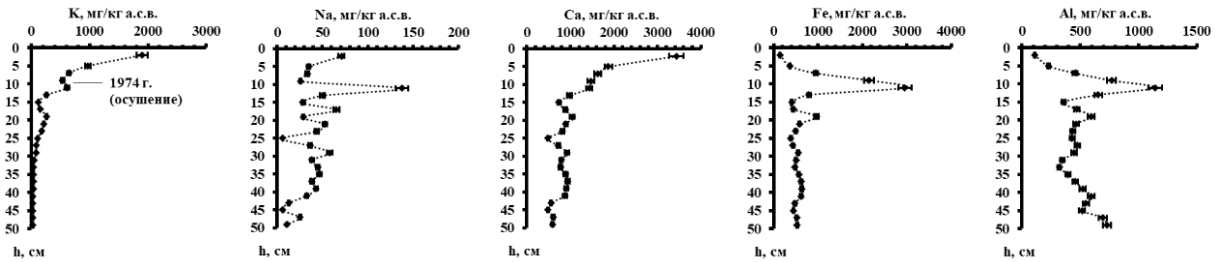
а) б) в) г) д)

Рисунок 12 – Распределение (валовое) некоторых макроэлементов в торфе залежи участка ИСНО-1:
а) калий (K); б) натрий (Na); в) кальций (Ca); г) железо (Fe); д) алюминий (Al)



а) б) в) г) д)

Рисунок 13 – Распределение (валовое) некоторых макроэлементов в торфе залежи участка ИСНДО-1:
а) калий (K); б) натрий (Na); в) кальций (Ca); г) железо (Fe); д) алюминий (Al)



а) б) в) г) д)

Рисунок 14 – Распределение (валовое) некоторых макроэлементов в торфе залежи участка ИСО-1:
а) калий (K); б) натрий (Na); в) кальций (Ca); г) железо (Fe); д) алюминий (Al)

Необходимо отметить, что осушение залежи способствует концентрированию в приповерхностном слое залежи таких биогенных элементов как K, Ca, Mg и Mn. Для железа и алюминия отмечаются пики концентрирования на глубине 21 см в керне участка ИСНО-1, 14 см в керне участка ИСНДО-1 и 11 см в профиле участка ИСО-1, которые практически совпадают с пиками зольности на этих площадках и приходятся на 1971-1975 гг., то есть период проведения осушительных работ. Концентрации элементов Fe, Mn, Al, Na, K, Mg и Ca зафиксированные в торфе исследуемых участков сопоставимы с данными, полученными ранее для другой части Иласского болотного массива и других болот Архангельской области (Parfenova et al., 2016). Они находятся

гораздо ниже, чем содержание данных металлов в земной коре, что указывает на отсутствие техногенного загрязнения данного болотного массива (Lide, 2004).

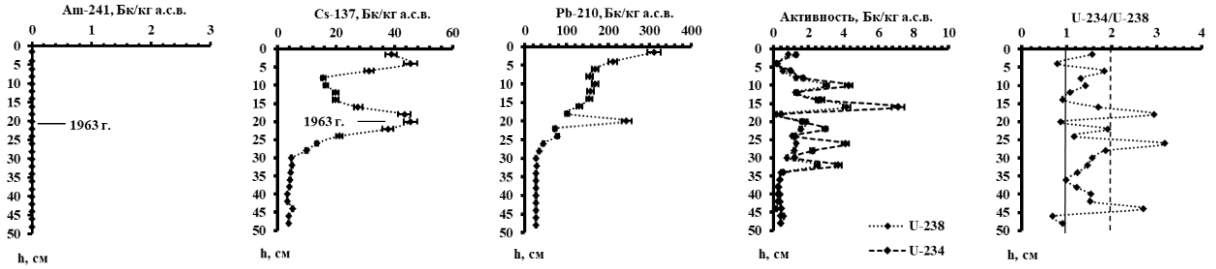
Резюмируя представленные выше результаты, необходимо отметить, что наиболее значимые отличия по ряду физико-химических показателей характерны для площадок ИСНО-1 и ИСНДО-1, а также для ИСНО-1 и ИСО-1. К таким параметрам можно отнести Eh_4, pH, водорастворимые соли, N, C, H, O, H/C, C/N, O/C, степень окисленности ОВ, влагосодержание, насыпная плотность, содержание битумов и гуминовых кислот, а также некоторых макроэлементов. При этом отличия нарушенных участков ИСНДО-1 и ИСО-1 между собой по большинству исследуемых в работе параметров менее существенны, что также подтверждается статистически (U-тест Манна-Уитни). Таким образом, полученные данные в значительной мере согласуются с результатами исследований других авторов (Пономарева, 2022; Ponomareva et al., 2023) и отчасти подтверждают их выводы о необратимости изменения физико-химических и структурных особенностей торфяных залежей верховых бореальных торфяников в ходе длительного осушения.

2. Трансформация гидрологического режима торфяных залежей ведет к изменению активностей, вертикального распределения техногенных ^{241}Am, ^{137}Cs и естественных ^{238}U, ^{234}U, ^{210}Pb радионуклидов, что выражается в смещении и локализации зоны их концентрирования к поверхности торфяника. Изменение физико-химических условий, как результат трансформации гидрологического режима в ходе осушения залежей, усиливают связывание радионуклидов торфом.

Показано, что активность ^{241}Am в профиле ненарушенного участка находится ниже предела обнаружения метода исследования. На осушенном участке основная активность ^{241}Am сосредоточена в слое 8-20 см и варьирует от 1,0 до 2,1 Бк/кг, а на повторно заболоченном в 7-19 см и составляет от 0,6 до 2,1 Бк/кг.

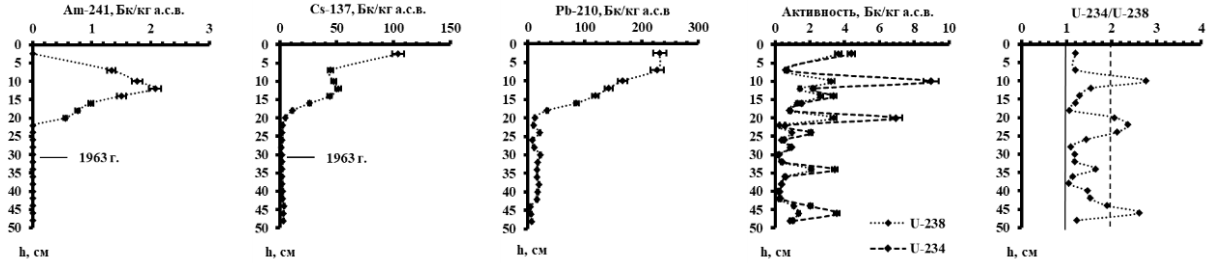
Накопление ^{137}Cs происходит в верхней части торфяного профиля 0-27 см естественного участка ИСНО-1, активность варьирует в пределах от 3,2 до 45,6 Бк/кг с максимумами на 4 и 20 см (45,6 Бк/кг и 45,5 Бк/кг). Для осушенного участка и площадки со вторичным заболачиванием основная иммобилизация ^{137}Cs характерна для 0-25 см, где активность находится в интервале от 2,6 до 142,6 Бк/кг с максимумом на 2 см (142,6 Бк/кг) и 0-27 см с активностью от 1,6 до 103,8 Бк/кг с максимумами на 2,5 и 12 см (103,8 и 51,4 Бк/кг), соответственно (рис. 15-17).

Распределение ^{137}Cs в профилях ИСНДО-1 и ИСО-1 практически отвечает типичной модели его распределения в верховых торфяниках, которая объясняется высокой подвижностью радиоцезия в торфяных водах и его поглощением как не требовательными к минеральному питанию сфагновыми мхами, так и более требовательными сосудистыми растениями (Łokas et al., 2013; Mihalík et al., 2014; Mroz et al., 2017). Максимум активности ^{137}Cs на 20 см в профиле ИСНО-1 соответствует пику зольности в данном керне и объясняется, по-видимому, его прочной избирательной сорбцией минеральной составляющей торфа. При близких суммарных запасах ^{137}Cs в исследуемых торфяных залежах изменения гидрологического режима приводят к существенным различиям в вертикальном распределении ^{137}Cs. Из этого можно сделать вывод, что осушение болотного массива в условиях Архангельской области приводит к усилению биогенной миграции ^{137}Cs и ускоряет его миграцию вверх по разрезу в зоне досягаемости ризосферы.



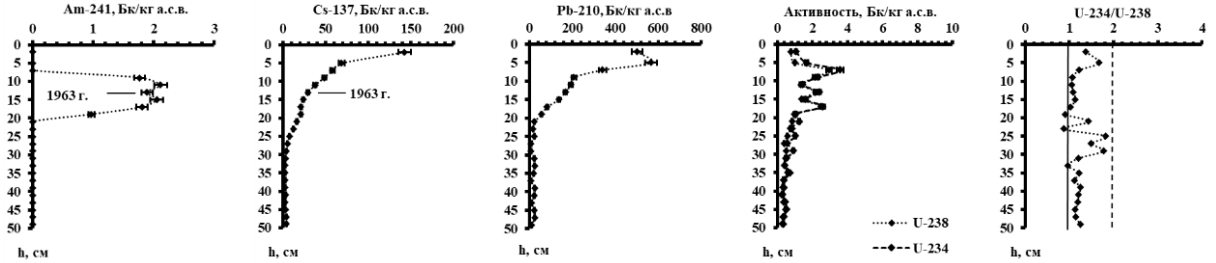
а) б) в) г) д)

Рисунок 15 – Распределение активностей ^{241}Am (а), ^{137}Cs (б), ^{210}Pb (в), ^{238}U и ^{234}U (г) и ^{234}U/^{238}U (д) по вертикальному профилю залежи участка ИСНО-1



а) б) в) г) д)

Рисунок 16 – Распределение активностей ^{241}Am (а), ^{137}Cs (б), ^{210}Pb (в), ^{238}U и ^{234}U (г) и ^{234}U/^{238}U (д) по вертикальному профилю залежи участка ИСНДО-1



а) б) в) г) д)

Рисунок 17 – Распределение активностей ^{241}Am (а), ^{137}Cs (б), ^{210}Pb (в), ^{238}U и ^{234}U (г) и ^{234}U/^{238}U (д) по вертикальному профилю залежи участка ИСО-1

Запасы ^{137}Cs для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м составили 385 Бк/м^2 для естественного участка, 404 Бк/м^2 для участка с постмелиоративным заболачиванием и 717 Бк/м^2 для осушенного участка. Полученные результаты соответствуют низкому уровню загрязнения и согласуются с ранее полученными данными для Европейской субарктики РФ (Яковлев и др., 2021).

Для более глубокого понимания процессов вертикальной миграции ^{137}Cs выполнена оценка его распределения в системе твердая фаза-взвесь-поровая вода на примере участка с естественным гидрологическим режимом ИСНО-1. Данный техногенный радионуклид обладает относительно высокой подвижностью в залежи ввиду крайне незначительного содержания минеральной компоненты, способной селективно и прочно его удерживать. Поэтому предполагается, что ^{137}Cs связывается органической частью торфа по ионообменному механизму и находиться в динамическом равновесии между твердой матрицей торфа и болотными поровыми водами.

Показано, что межфазное распределение ^{137}Cs характеризуется увеличением миграционно-способных форм (растворенных и связанных с взвешенными частицами) с глубиной залежи. Так, для горизонта 0-10 см распределение между фазами торфа, взвеси, растворенных компонентов составляет 98,1, 0,9 и 0,9 %, соответственно. При этом, на глубине 20-30 см, распределение имеет следующее соотношение 85,4 % для твердой торфа, 10,9 % для взвешенных частиц и 3,6 % для растворенных компонентов (рис. 18). Исходя из предварительно оцененной динамики изменения группового химического состава органической части торфа по вертикальному профилю залежи, и в частности фульвокислот, массовая доля которых максимальна в слое 0-10 см и снижается с глубиной а также с распределением валовой активности ^{137}Cs, предполагалось что максимальное содержание подвижных форм цезия (растворенного) будет наблюдаться для верхних горизонтов исследуемой залежи. Однако мы видим противоположную картину.

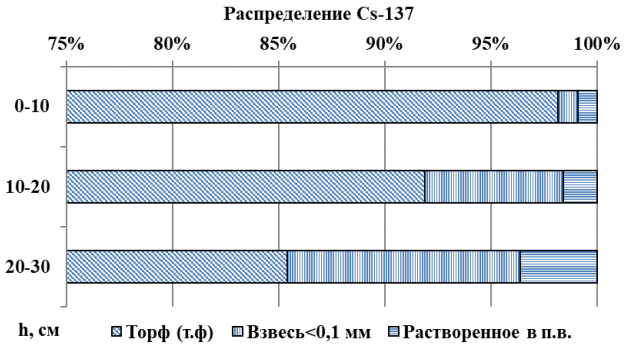


Рисунок 18 – Распределение ^{137}Cs в системе «твердая фаза-взвесь-поровая вода» естественного участка ИСНО-1

Вероятной причиной такого распределения является нахождение ^{137}Cs в составе растворенных в поровой воде комплексов с низкомолекулярными и олигомерными органическими соединениями, а также коллоидными и взвешенными частицами с размерами менее 0,1 мм. В частности, на это указывают результаты определения растворенных в поровой воде органических и неорганических веществ, концентрация которых увеличивается по глубине залежи от 95 мг/л для горизонта 0-10 см до 258 мг/л для горизонта 40-50 см, что коррелирует с результатами по валовой активности цезия в жидкой фазе торфа. Аналогичная тенденция наблюдается и для ^{137}Cs, связанного со взвешенными частицами.

Для площадок ИСНО-1, ИСНДО-1 и ИСО-1 наблюдается постепенное снижение активности ^{210}Pb по глубине залегания, при этом для профиля естественного участка зафиксирован дополнительный пик на глубине 20 см, совпадающий с максимумом параметра зольности для этого торфяного разреза (рис. 15в, 16в, 17в). Активность ^{210}Pb в керне естественного участка ИСНО-1 варьирует в пределах от 26,2 до 310,8 Бк/кг с максимумами на 1,5 и 20 см (310,8 Бк/кг и 243,9 Бк/кг). Для осушенного участка и площадки со вторичным заболачиванием активность ^{210}Pb находится в интервале от 6,3 до 567,9 Бк/кг с максимумом на 5 см (567,9 Бк/кг) и от 4,3 до 231,1 Бк/кг с максимумом на 1,5 см (231,1 Бк/кг), соответственно. Не совсем типичное распределение ^{210}Pb в профиле естественного участка связано, вероятно, с его вымыванием из вышележащих горизонтов в связанном с тонкодисперсными минеральными или гумусными частицами виде (Olid et al., 2016). Рассчитанное значение атмосферного потока ^{210}Pb на поверхность торфяника составило 69±10 Бк/м^2·год, 55±10 Бк/м^2·год, и 77±4 Бк/м^2·год для естественного, повторно заболоченного и осушенного участков, соответственно.

Наряду со ^{210}Pb особый интерес представляет вертикальное распределение изотопов урана по вертикальному профилю исследуемых залежей (рис. 15г, 16г, 17г), которое также может служить индикатором запыленности атмосферы. Активность изотопов U не равномерна по глубине разреза, варьирует в интервалах от 0,2 до 4,2 Бк/кг ^{238}U, от 0,2 до 7,1 Бк/кг ^{234}U и характеризуется наличием максимумов в слое 16 см (^{238}U 4,2 Бк/кг, ^{234}U 7,1 Бк/кг) и 26 см (^{238}U 1,3 Бк/кг, ^{234}U 4,1 Бк/кг), при этом для естественного участка основная доля изотопов урана сконцентрирована на глубине от 10 до 32 см. Для осушенного участка активность изотопов урана составляет от 0,3 до 2,9 Бк/кг ^{238}U, от 0,3 до 3,6 Бк/кг ^{234}U и приходится на горизонт 7-17 см с максимумом активности ^{238}U 2,9 Бк/кг и ^{234}U 3,6 Бк/кг. В торфе участка с повторным заболачиванием активность изотопов урана изменяется в пределах от 0,2 до 3,7 Бк/кг ^{238}U, от 0,2 до 9,0 Бк/кг ^{234}U. Наиболее существенные максимумы активности приходится на горизонты 0-5 см с ^{238}U 3,7 Бк/кг и ^{234}U 4,4 Бк/кг; 9-11 см с ^{238}U 3,2 Бк/кг и ^{234}U 9,0 Бк/кг и 19-21 см с ^{238}U 3,4 Бк/кг и ^{234}U 6,9 Бк/кг. Такое неравномерное распределение урана в профиле ИСНДО-1 может быть обусловлено его перераспределением из-за нестабильности гидрологического режима в результате осушения с последующим повторным заболачиванием.

Запасы U для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м составили $17{,}9 \cdot 10^{-4}$ г/м^2 для естественного участка, $32{,}4 \cdot 10^{-4}$ г/м^2 для участка с постмелиоративным заболачиванием и $25{,}5 \cdot 10^{-4}$ г/м^2 для осушенного участка.

Расчет отношения активности $^{234}U/^{238}U$ (рис. 15д, 16д, 17д) выявил резкое нарушение равновесия, превышающего величину $^{234}U/^{238}U > 3$ для естественного участка, при этом изотопное отношение $^{234}U/^{238}U$ на осушенной площадке находится в пределах характерного для верхних почвенных горизонтов диапазона 1-2 Бк/Бк. Как правило, обогащение верхних почвенных горизонтов мобильным изотопом ^{234}U связано с поступлением (разгрузкой) подземных вод глубоких горизонтов, однако в случае изучаемого нами верхового болота такой механизм представляется маловероятным. Гипотетическим объяснением высоких содержаний ^{234}U может служить поступление в профиль техногенного ^{238}Pu (T½=86 лет) с последующим его распадом до ^{234}U.

Резюмируя вышесказанное, можно сказать, что физико-химический режим участков, подвергшихся осушению, способствует не только перераспределению радионуклидов к поверхности залежи, но и в целом их закреплению в торфе, что препятствует их перемещению в прилежащие экосистемы.

3. Распределение радионуклидов в торфяной залежи в основном контролируется окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиями при подчиненном влиянии зольных элементов и водорастворимых солей.

Анализ физико-химических условий и активности радионуклидов с использованием комплекса статистических методов: парного корреляционного и факторного анализа позволил выявить структуру связей между исследуемыми параметрами. Визуализация результатов факторного анализа в графическом виде представлена на рис. 19. Необходимо отметить, что наличие и сила связи между отдельными радиоэкологическими параметрами и условиями миграции для естественного и осушенных участков могут несколько отличаться, поскольку особенности поведения каждого конкретного радионуклида обусловлены не одним, а совокупностью ряда параметров. Их взаимный баланс в пределах каждой изученной площадки уникален, и обусловлен ее индивидуальными особенностями, в том числе

биогенной составляющей, которой также отводиться существенная роль в перераспределении радионуклидов в экосистемах (Щеглов, 2000; Mietelski et al., 2007; Mroz et al., 2017).

Таким образом, показано наличие положительных связей в распределении изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb с окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиям, которые существенно изменяются в ходе осушения, а также обнаружена положительная связь с содержанием зольных элементов, водорастворимых солей и металлами K, Na, Mg и Mn. Для изотопов U распределение связано преимущественно с такими параметрами как Eh, зольностью и макроэлементами Ca, Al и в некоторой мере с Fe, при этом связь с фактором Eh усиливается в ряду ИСНО-1, ИСО-1 и ИСНДО-1.

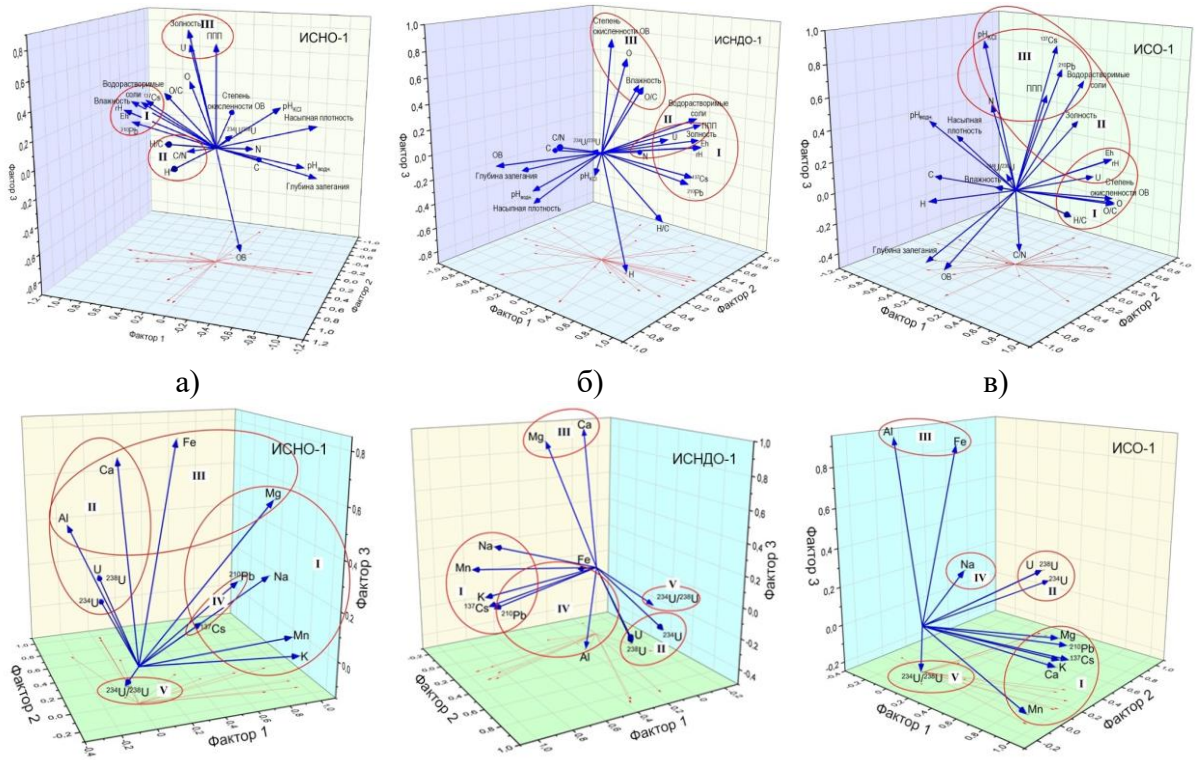
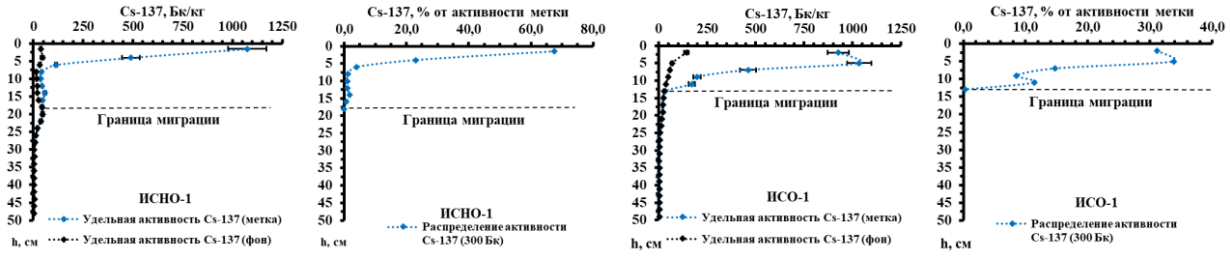


Рисунок 19 - Результаты факторного анализа данных по профилям
а, г – ИСНО-1; б, д – ИСНДО-1; в, е – ИСО-1

Для уточнения влияния роли физико-химических условий в распределении радионуклидов в торфяных отложениях выполнено моделирование вертикальной миграции ^{137}Cs за 1-летний период в деятельном слое торфяных залежей в лизиметрах. Это позволяет исключить вклад латеральной (горизонтальной) миграции за пределы изучаемых кернов, но проводить эксперимент в условиях в значительной мере приближенных к естественному и осушенному участку рассматриваемого верхового болота. Оно позволило выявить следующие отличия (рис. 20).

Максимальная глубина вертикальной миграции ^{137}Cs в керне, моделирующем условия естественного участка, составила 17 см, при этом наблюдается неравномерное распределение по глубине: 90,5 % активности изотопной метки зафиксировано в слое 0-5 см и лишь 9,5 % в слое 5-17 см. Для керна, моделирующего условия осушенного участка, вертикальная миграция ^{137}Cs составила 14 см, а распределение более

равномерное: в слое 0-5 см зафиксировано 65 %, а в 5-14 см связано 35 % от вносимого количества (300 Бк) ^{137}Cs.

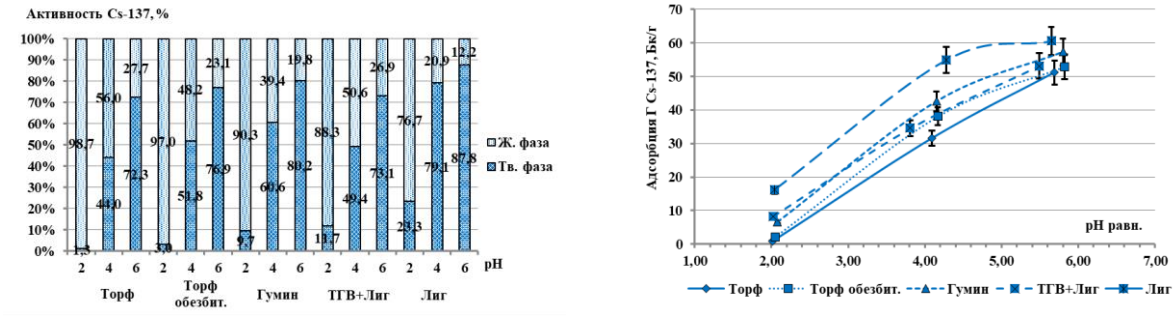


а) б) в) г)

Рисунок 20 – Результаты моделирования вертикальной миграции ^{137}Cs
а, б – естественный участок ИСНО-1; в, г – осушенный участок ИСО-1

В целом, полученное распределение изотопной метки ^{137}Cs в модельных кернах повторяет его естественное распределение, сформировавшееся в ходе глобальных выпадений и зафиксированное на естественном и осушенном участках болота. Отличия в распределении, по-видимому, связаны в первую очередь с разницей режима сезонных колебаний УБВ, деятельностью растительного покрова участков, а также разницей в физико-химических условиях миграции.

Дополнительно была выполнена оценка связывания ^{137}Cs верховым торфом с учетом влияния pH в статических условиях (рис. 21). Такой эксперимент важен с точки зрения геохимии, поскольку позволяет дать ориентировочную оценку связывающей способности торфа, как компонента геохимического барьера – торфяной залежи.



а) б)

Рисунок 21 – Связывание ^{137}Cs верховым торфом и остатком после последовательного удаления компонентов его органической части
а) распределение между твердой и жидкой фазой; б) предельная адсорбция

Согласно полученным данным при pH=2 (в сильнокислой области) сорбция ^{137}Cs исследуемыми материалами из раствора минимальна и варьируется в диапазоне от 1,31 до 23,27 %. Исходным торфом из раствора извлекается менее 1,5 %. Последовательное извлечение отдельных групп компонентов торфа приводит к постепенному увеличению степени извлечения ^{137}Cs из раствора. Максимум приходится на негидролизуемый остаток – лигнин, что отчасти согласуется с данными (Межибор, 2009). При pH=4 (в условиях, максимально приближенным к естественным) наблюдается резкий скачок связывания ^{137}Cs из раствора. Твердой фазой связывается от 44,02 до 79,12 % ^{137}Cs. Минимум связывания также характерен для исходного торфа, максимум для образца Лиг. Промежуточный минимум наблюдается для образца ТГВ+Лиг и составляет 49,38 %. В нейтральных условиях (pH=6) процент связываемого из раствора ^{137}Cs

максимален и варьируется в диапазоне от 72,33 до 87,77 %. Минимальные значения 72,33 и 73,09 % характерны для образцов исходного торфа и фракции ТГВ+Лиг, соответственно (рис. 21а).

Зависимость предельной сорбции ^{137}Cs торфом от pH среды имеет классический вид S-образной кривой (рис. 21б). Величина предельной адсорбции ^{137}Cs для исследуемого верхового торфа варьируется в диапазоне от 1 до 51 Бк/г, что существенно превышает фоновые значения, определяемые в торфяной залежи (Yakovlev et al., 2022), и указывает на высокую сорбционную емкость верховых торфяников по отношению к техногенным радионуклидам. Для производных торфа, полученных методом последовательной разборки, величины предельной сорбции составляют от 2 до 61 Бк/г в области исследуемого диапазона pH, что позволяет сделать вывод о перспективности использования верхового торфа и продуктов на его основе в качестве эффективных сорбентов для связывания ^{137}Cs при проведении природоохранных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для исследуемых залежей характерно наличие контрастного окислительно-восстановительного режима: при движении от поверхности в глубь залежи умеренно-окислительные условия постепенно сменяются интенсивно восстановительными. Установлено, что осушение приводит к существенным изменениям практически всех исследуемых параметров: сопровождается снижением влагосодержания в торфе, что способствует более интенсивной аэрации и выражается в росте окислительно-восстановительного потенциала и увеличении интервала его сезонных колебаний, увеличении плотности залежи, степени разложения, содержания в торфе доли термодинамически устойчивых соединений – битумов и гуминовых кислот, а также изменениях в элементном составе, которые указывают на увеличение степени окисленности органического вещества и увеличении доли ароматических фрагментов в нем.

2. Процессы физической и химической трансформации залежи в ходе осушения приводят к изменению темпа торфонакопления (от естественного к осушенному участку снижается в 3 раза), а также способствует смещению обогащенного зольными элементами и радионуклидами слоя ближе к поверхности залежи.

3. Охарактеризованы вертикальные профили распределения радионуклидов ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{238}U, ^{234}U и ^{210}Pb в залежах естественного и нарушенных участков верхового болота. Выявлено неравномерное распределение исследуемого ряда радионуклидов, при этом для апробированных торфяных залежей в целом наблюдается снижение их активностей при движении от поверхности вглубь залежи. Установлено, что запасы ^{137}Cs и U для исследуемого приповерхностного слоя мощностью 0,5 м увеличиваются от естественного участка к площадкам, подверженным действию осушения. Таким образом, можно сказать, что геохимические процессы, вызванные осушением, усиливают связывание радионуклидов торфом бореальных верховых торфяников.

4. На примере участка с естественным гидрологическим режимом показано, что межфазное распределение ^{137}Cs характеризуется увеличением миграционно-способных форм (растворенных и связанных с взвешенными частицами) с глубиной залежи.

5. Показано наличие сильных положительных связей в распределении изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb с окислительно-восстановительными и кислотно-основными условиями, которые существенно изменяются в ходе осушения, а также обнаружена их

положительная связь с содержанием зольных элементов, водорастворимых солей и металлами K, Na, Mg и Mn. Для изотопов U распределение связано преимущественно с такими параметрами как Eh, зольностью и макроэлементами Ca и Al, при этом связь с фактором Eh усиливается в ряду: естественный участок, осушенный участок, участок с постмелиоративным заболачиванием.

6. В условиях модельного эксперимента показано, что максимальная глубина вертикальной миграции ^{137}Cs в условиях естественного участка составила 17 см, при этом наблюдается неравномерное распределение по глубине активности вносимой изотопной метки. Для осушенного участка вертикальная миграция ^{137}Cs составила 14 см, а распределение его активности более равномерное. Увеличение параметра pH (в интервале pH от 2 до 6) сопровождается ростом степени связывания ^{137}Cs верховым торфом с 1,3 до 72,3 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Зубов И.Н., **Орлов А.С.,** Селянина С.Б. О применимости окислительно-восстановительного потенциала для оценки состояния торфяных залежей болотных экосистем // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 3. – С. 51-55. https://doi.org/10.17513/use.37070
2. Лукошкова А.А., Яковлев Е.Ю., **Орлов А.С.,** Кудрявцева А.А., Дружинин С.В. Вертикальное распределение радионуклидов и физико-химических параметров в торфянике Ненецкого автономного округа // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 11. – С. 83-88. https://doi.org/10.17513/use.37717
3. Лукошкова А.А., Яковлев Е.Ю., **Орлов А.С.** Удельная активность и особенности вертикальной миграции стронция-90 в торфянике Мурманской области // Вестник геонаук. – 2022. – № 5 (329). – С. 21-25. https://doi.org/10.19110/geov.2022.5.3
4. Татаринцева В.Г., Котова Е.И., **Орлов А.С.,** Пономарева Т.И., Селянина С.Б., Дайбова Е.Б. Металлы и As в торфе верховых болот Архангельской области // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 6. – С. 60-65. https://doi.org/10.17513/use.37842
5. Яковлев Е.Ю., Кудрявцева А.А., **Орлов А.С.** Сравнение моделей ^{210}Pb-датирования применительно к торфяным отложениям Европейской субарктики России (на примере Архангельской области) // Вестник геонаук. – 2022. – № 11 (335). – С. 35-42. https://doi.org/10.19110/geov.2023.7.5

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень Web of Science и Scopus

6. Yakovlev E., Druzhinina A., Druzhinin S., Bedrina D., **Orlov A.** Assessment of physicochemical parameters and metal distribution in bog peat of the western segment of the North European part of Russia (Arkhangelsk region) // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – V. 28. – № 1. – P. 300-313. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10501-z
7. Zubov I.N., **Orlov A.S.,** Selyanina S.B., Zabelina S.A., Ponomareva T.I. Redox potential and acidity of peat are key diagnostic physicochemical properties for the stratigraphic zones of a boreal raised bog // Mires and Peat. – 2022. – Vol. 28. – Art. 5. – P. 1-16. https://doi.org/10.19189/MaP.2020.GDC.StA.1987
8. Yakovlev E., **Orlov A.,** Kudryavtseva A., Zykov S. Estimation of physicochemical parameters and vertical migration of atmospheric radionuclides in a raised peat bog in the Arctic zone of Russia // Applied Sciences. – 2022. – №. 12. – Art. 10870. – P.

1-21. https://doi.org/10.3390/app122110870

9. **Orlov A.S.,** Zubov I.N., Yakovlev E.Yu., Bogdanovich N.I. Evaluation of Cs-137 binding by high-moor peat in the European North of Russia // Solid Fuel Chemistry. – 2023. – V. 57. – № 5. – P. 343-347. https://doi.org/10.3103/s0361521923050051

10. Yakovlev E.Yu., **Orlov A.S.,** Kudryavtseva A.A., Zykov S.B., Zubov I.N. Assessment of the Impact of Anthropogenic Drainage of Raised Peat-Bog on Changing the Physicochemical Parameters and Migration of Atmospheric Fallout Radioisotopes in Russia's Subarctic Zone (Subarctic Zone of Russia) // Applied Sciences. – 2023. – №. 13(9). – Art. 5778. – P. 1-19. https://doi.org/10.3390/app13095778

11. Yakovlev E., Kudryavtseva A., **Orlov A.** Comparison of ^{210}Pb age models of peat cores derived from the Arkhangelsk region // Applied Sciences. – 2023. – V. 13. – № 18. – Art. 10486. https://doi.org/10.3390/app131810486