

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОМПЛЕКСНОГО ИЗУЧЕНИЯ
АРКТИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА Н.П. ЛАВЕРОВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ЯКОВЛЕВ Евгений Юрьевич

**ИЗОТОПНО-РАДИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ЗАПАДНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ
АРКТИКИ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Архангельск 2024

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН)

Научные консультанты:

Малов Александр Иванович

доктор геолого-минералогических наук, директор Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН, главный научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН

Кутинов Юрий Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы Института геодинамики и геологии ФИЦКИА УрО РАН

Официальные оппоненты:

Артамонова Светлана Юрьевна

доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

Макеев Владимир Михайлович

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией эндогенной геодинамики и неотектоники им. В.И. Макарова Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

Субетго Дмитрий Александрович

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии и природопользования Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена

Ведущая организация:

Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (ИГ КарНЦ РАН)

Защита диссертации состоится «24» октября 2024 г. в 15:00 часов на заседании Диссертационного совета 24.2.364.02 (Д 212.121.04) при ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ) по адресу: 117997, Москва ул. Миклухо-Маклая д. 23

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в МГРИ по адресу: 117997, Москва ул. Миклухо-Маклая д.23

Автореферат диссертации разослан «...» 2024 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



С.Д. Ганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Морская среда и материковые территории Арктики являются важнейшим звеном в глобальном кругообороте вещества и формировании климата Земли. Возрастающий интерес к хозяйственному освоению Арктической зоны Российской Федерации, сопряжен с необходимостью обеспечения экологической безопасности региона, важнейшим аспектом которой является изучение и мониторинг радиэкологического состояния компонентов природной среды, поскольку арктические территории и акватории, а в особенности Западный сектор Российской Арктики, с момента начала атомной эры, подверглись существенному радиационному воздействию. Функционирование атомного полигона на Новой Земле, проведение ядерных испытаний в мировой практике, катастрофа на Чернобыльской АЭС, перенос течениями радиоактивных отходов от западноевропейских радиохимических заводов, проведение подземных ядерных взрывов в мирных целях способствовали выбросу в окружающую среду огромного количества техногенных радиоактивных изотопов и загрязнению территорий и акваторий Западного сектора Российской Арктики. Потенциальная радиационная опасность также связана с наличием в регионе объектов «ядерного наследия», мест захоронения радиоактивных отходов, действием силовых и энергетических ядерных установок, наличием атомного флота.

Помимо искусственных радионуклидов, значительный вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, которые присутствуют во всех природных объектах. Ведущую роль в поступлении естественной радиоактивности в окружающую среду Арктики играет хозяйственная деятельность человека, связанная с добычей и переработкой полезных ископаемых. В результате горнотехнической деятельности происходит извлечение огромных объемов горных пород, обогащенных естественными радионуклидами, откачка минерализованных подземных вод с повышенным содержанием природных радиоактивных изотопов, что в конечном итоге приводит к дополнительному радиационному воздействию на экосистемы.

В связи с этим оценка радиационного загрязнения арктических экосистем и возможных путей радиационного воздействия на биоту требуют проведения исследований накопления и распределения радиоактивных изотопов в различных компонентах экосистем, анализ источников загрязнения и разработки моделей миграции радионуклидов в окружающую природную среду.

Наряду с высокой актуальностью изучения радионуклидов для целей экологической оценки, исследование радионуклидов имеет значение для понимания геологических процессов протекающих в земной коре. Радиоактивные изотопы являются индикаторами различных геохимических обстановок, связанных, в том числе, с месторождениями полезных ископаемых.

Кроме этого, климатические изменения и вызванные ими процессы деградации многолетнемерзлых пород, обуславливают ускорение миграции радионуклидов в окружающую среду, что требует контроля естественной радиационной обстановки и развития методов оценки состояния криолитозоны и прогноза трансформации экосистем.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является разработка подходов, позволяющих использовать изотопно-радиогеохимические методы при исследовании закономерностей протекания природных и техногенных процессов и прогнозировании изменения экосистем на основе оценки радиационно-экологических параметров компонентов окружающей среды Западного сектора Российской Арктики, обусловленных естественными факторами и антропогенной деятельностью.

Задачи исследования:

1. Определить уровни активности и основные закономерности распределения природных и техногенных радионуклидов в морской среде, торфяно-болотных экосистемах, почвах, горных породах, донных осадках, поверхностных и подземных водах в пределах

ненарушенных и техногенно-измененных ландшафтов Западного сектора Российской Арктики.

2. Выявить источники поступления, определить механизмы миграции и накопления радионуклидов в объектах природной среды Западного сектора Российской Арктики.

3. Оценить влияние горнотехнической деятельности и климатических изменений, связанных с радиационным и геохимическим загрязнением природной среды и трансформацией криолитозоны с последующей оценкой негативного воздействия на биоту и человека в указанных районах.

4. Обосновать возможность использования радиоактивных элементов в качестве дополнительных признаков для поисков структур, контролирующих трубки взрыва, а также для оценки радиационного качества питьевых подземных вод и радоноопасности и прогнозирования изменений состояния природной среды Арктики.

5. Предложить комплекс рекомендаций по оценке радиоэкологической обстановки арктических территорий, как основы для принятия управленческих решений по регулированию техногенной активности, а также учету природных факторов при обеспечении безопасности хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения.

Фактический материал и методы исследований. Материалом для диссертационной работы послужили образцы объектов окружающей среды (горные породы, почвы, донные осадки, торф, вода) Западного сектора Российской Арктики, полученные автором лично в ходе экспедиционных и лабораторных исследований с 2014 по 2024 гг. База данных по отобраным объектам включает результаты изучения более тысячи образцов геологических объектов.

Изучение радиационных параметров образцов проводилось комплексом изотопно-радиогеохимических методов, включающим низкофоновую гамма- и альфа-спектрометрию с полупроводниковыми детекторами, низкофоновую жидкостно-сцинтилляционную альфа-бета-радиометрию, полевые гамма-спектрометрию, дозиметрию и эманационные исследования активности радона. В полевых условиях в водных объектах измерялись неустойчивые физико-химические параметры, такие как pH, Eh, O₂, температура и электропроводность. Определения макро- и микроэлементного состава литологических и водных проб выполнялись методами рентгенофлуоресцентного анализа, атомно-абсорбционной спектрометрии и ионной хроматографии. Датирование образцов торфа проводилось по неравновесному свинцу ²¹⁰Pb. Все аналитические работы выполнены в аккредитованных лабораториях: экологической радиологии ФИЦКИА УрО РАН № RA.RU.21HA54, радиометрической лаборатории АО «Центр судоремонта «Звездочка» № RA.RU.21AD95 и ЦКП «Арктика» САФУ № RU.0001.21AL65.

Основные защищаемые положения:

1. Изотопно-радиогеохимические методы, основанные на оценке распределения и миграции радионуклидов естественного и антропогенного происхождения в компонентах природной среды Западного сектора Российской Арктики, их изотопных и атомных отношений, позволяют выполнить идентификацию источников загрязнения, использовать радионуклиды в качестве хронометрических маркеров, определить их биологическое воздействие и выполнить прогноз изменения радиоэкологической обстановки под влиянием природных и техногенных факторов.
2. Использование изотопно-радиогеохимических методов позволяет выполнить количественную оценку воздействия горнотехнической деятельности на объекты окружающей среды, связанные с трансформацией радионуклидного и химического состава водных экосистем Западного сектора Российской Арктики.
3. Радиоактивные изотопы уранового ряда ²³⁸U отражают процессы деградации многолетней мерзлоты и могут быть использованы в качестве трассеров при исследовании состояния криолитозоны и оценки радиационного качества подземных вод.
4. Выявленные закономерности распределения радионуклидов уранового ряда (уран-радий-радон) в осадочном чехле областей развития кимберлитового магматизма являются

дополнительными признаками для поисков структур контролирующих трубки взрыва и прогнозирования радоноопасности северных территорий.

Научная новизна исследований:

Впервые для торфяных отложений Западного сектора Российской Арктики получены данные по распределению радионуклидов естественного и техногенного происхождения. Предложены методические подходы к выполнению ^{210}Pb -датирования торфяных отложений, характеризующихся сложным распределением радиоактивных элементов обусловленных их миграцией. Впервые получены данные по хронологии и скоростям накопления торфа методом ^{210}Pb -датирования для типичных болотных массивов прибрежных районов Западного сектора Российской Арктики, которые позволяют количественно оценить поток загрязняющих веществ на поверхность торфяников, уточнить данные о развитии торфяных отложений и оценить их роль в накоплении атмосферного углерода.

Впервые установлены закономерности концентрирования радионуклидов в донных отложениях района добычи алмазов, связанные со специфическим составом кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции, выветрелых до глинистого состояния (сапониты) и обладающих высокими сорбционными свойствами. Предложенный комплекс экологической оценки районов добычи алмазов, учитывающий, в том числе, радиогенные нагрузки позволяет снизить риск загрязнения речных экосистем Арктики, имеющих особый природоохранный статус как нерестилища ценных видов рыб.

Показано, что глобальное потепление климата, отражающееся на изменении параметров криолитозоны, может обуславливать трансформацию естественного радиационного фона в районах с фоновым содержанием естественных радиоактивных элементов, выражающуюся в увеличении эманаций радона и продуктов его распада, а также накоплении избытков ^{234}U в природных водах. Полученные данные необходимо учитывать при оценке и прогнозе радоноопасности, радиационных исследованиях питьевых подземных вод и организации мероприятий по снижению облучения населения от естественных источников радиации.

Впервые для Архангельской алмазоносной провинции установлены закономерности распределения изотопов уранового ряда в основных типах пород кимберлитового поля, экспериментально определены механизмы накопления радиоактивных элементов в экзоконтактах кимберлитовых тел, выполнено моделирование вертикального переноса свободного радона, которые могут служить основой для совершенствования технологии поисков структур, контролирующих трубки взрыва, а также для оценки радиационного качества питьевых подземных вод и прогнозирования радоноопасности территорий развития кимберлитового магматизма.

Практическая значимость исследований. Практические результаты диссертационного исследования заключаются в целесообразности и эффективности использования изотопно-геохимической информации для разработки программ обеспечения устойчивого развития Арктической зоны России, в том числе, – для организации радиационно-экологического мониторинга, снижения экологических рисков, планирования природоохранных мероприятий, экологических прогнозов, реализации новых подходов к индикации процессов трансформации экосистем под воздействием природных и антропогенных факторов. Результаты выполненных исследований используются при проведении мониторинговых работ по оценке радиационного качества питьевых подземных вод в Архангельской области (водозабор «Южный» ПАО «Севералмаз»). Результаты исследования используются в учебном процессе ФИЦКИА УрО РАН при проведении курса «Техногенез и формирование природно-техногенных ландшафтов» и научно-исследовательских практик аспирантов по направлению подготовки 05.06.01 – Науки о Земле, направленность (профиль) – Геоэкология.

Работа выполнялась в соответствии с планами ФНИР лаборатории экологической радиологии по проектам «Радиоизотопные исследования природных и техногенных процессов трансформации окружающей среды Европейского Севера» № АААА-А16-

116052710106-8, «Эволюция островных и материковых территорий Европейского сектора Арктики под влиянием природных и антропогенных факторов» № АААА-А16-116052710105-1, «Комплексные изотопно-геохимические исследования качества природной среды и идентификация процессов её трансформации на приморских территориях Европейского Севера в современности и в прошлом» № АААА-А19-119011890018-3 и № 122011300333-1 «Особенности миграции элементов и их изотопов в абиотических компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений». Исследования по теме диссертации также выполнялись при реализации Программ Уральского отделения РАН по проектам «Исследование естественных и техногенных систем в прибрежных почвах, донных осадках и в воде крупных озер Европейского Севера и Арктики России» № АААА-А17-117033010127-8 и «Комплексные геоэкологические и радиологические исследования района добычи алмазов в Юго-Восточном Беломорье» № АААА-А18-118012390242-5.

Работа была поддержана грантами, в которых автор был руководителем: Президента Российской Федерации «Оценка последствий совокупного влияния горнотехнической деятельности и климатических изменений на водные ресурсы арктической зоны Российской Федерации (на примере Архангельской и Мурманской областей)» № МК-1919.2020.5, «Совершенствование методики датирования торфяных отложений по неравновесному свинцу ^{210}Pb » № МК-4298.2022.1.5; РФФ «Диагностика деградации мерзлоты на базе изотопных трассеров ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $\delta^{18}\text{O}+\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}+^{14}\text{C}$)» № 20-77-10057; РФФИ «Исследование условий продуцирования повышенных концентраций радона в осадочном чехле областей развития кимберлитового магматизма (на примере Архангельской алмазоносной провинции)» № 20-35-70060, «Накопление и миграция радионуклидов атмосферных выпадений в торфяно-болотных экосистемах Европейской субарктики России и Белорусского Полесья» №19-55-04001, «Механизмы формирования изотопного состава урана алмазоносных и вмещающих пород кимберлитовых трубок Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции» № 16-35-00153; Проектного офиса развития Арктики «Техногенная радиоактивность объектов окружающей среды бассейна реки Несь (Ненецкий автономный округ): уровень загрязнения, источники, прогноз» № 245-Г; Правительства Архангельской области «Исследование изотопов урана ^{234}U , ^{238}U в кимберлитах месторождения им. М.В. Ломоносова» №13-2015-03а. Часть работ также выполнена в рамках коммерческих (хозяйственных) договоров под руководством автора.

Достоверность результатов достигалась выполнением исследований в аккредитованных лабораториях с применением современной аппаратуры проходящей метрологическую поверку и сличительные испытания, выполнением лабораторных аналитических исследований по аттестованным методикам, статистической обработкой данных.

Научная апробация работы. Основные положения диссертационного исследования прошли обсуждение в рамках специализированных научных конференций, совещаний и круглых столов: Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность» (Гомель, ИРБ НАН Беларуси, 2022, 2023 гг.); III Международная конференция «Биомониторинг в Арктике» (Архангельск, САФУ, 2022); Международная молодежная научно-практическая конференция Совета молодых ученых РАН (Сургут, СГУ, 2022); Шестая конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» (Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022); Круглый стол «Эволюция оледенения внутреннего Тянь-Шаня в условиях климатических изменений и техногенного воздействия на природные ресурсы» (Бишкек, ИВПиГЭ КР, 2022); III Международная конференция «Биомониторинг в Арктике» (Архангельск, САФУ, 2022), Международная научно-практическая конференция «Проблемы мониторинга и прогноза водно-энергетических ресурсов Центральной Азии в условиях изменения климата» (Бишкек, ИВПиГЭ КР, 2022, 2023 гг.); 2st International Conference of Mediterranean Geosciences Union – MedGU-22 (Марракеш, Марокко, 2022); Российская молодёжная научно-практическая Школа с международным участием «Новое в

познании процессов рудообразования» (Москва, ИГЕМ РАН, 2015-2022 гг.); VI Всероссийский научный молодежный геокриологический форум с международным участием «Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии» (Якутск, Институт мерзлотоведения СО РАН, 2021); Goldschmidt-2021 (Лион, Франция, 2021); The 7th International Conference on Water Resource and Environment – WRE 2021 (Сиань, КНР, 2021); VI Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, ТПУ, 2021); 2st International Conference of Mediterranean Geosciences Union – MedGU-21 (Стамбул, Турция, 2021); Всероссийская конференция с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики» (Архангельск, ФИЦКИА УрО РАН, 2020); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Науки о Земле: от теории к практике – Арчиловские чтения (Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2020); Международная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (Архангельск, ФИЦКИА УрО РАН, 2018, 2020 гг.); Goldschmidt-2020 (Гонолулу, США, 2020); Международная научная конференция «Радиобиология: современные проблемы» (Гомель, ИРБ НАН Беларуси, 2020); Всероссийская конференция с международным участием – II Юдахинские чтения (Архангельск, ФИЦКИА УрО РАН, 2019); VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения» (Апатиты, ФИЦ КНЦ РАН, 2019); 15th SGA Biennial Meeting – Life with Ore Deposits on Earth (Глазго, Великобритания, 2019); 2d Conference of the Arabian Journal of Geosciences (Сус, Тунисская Республика, 2019); Межрегиональная молодежная научно-исследовательская конференция «Геоэкологические проблемы Европейского Севера и Арктики» (Архангельск, САФУ, 2018); Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, СевГУ, 2017, 2018 гг.); 14th SGA Biennial Meeting – Mineral Resources to Discover (Квебек, Канада, 2017); Рабочее совещание «Научно-методические и технологические проблемы прогнозирования и поиска слабо контрастных кимберлитовых трубок на территории Восточно-Европейской и Восточно-Сибирской алмазоносных провинций» (Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 2017); Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2015, 2017 гг.); XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Современные исследования в геологии» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 2016); V Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека», Томск, ТПУ, 2016); Международная межвузовская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые науки - о Земле» (Москва, МГРИ-РГГРУ, 2016, 2022 гг.); V Международная конференция молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Петрозаводск, ИВПС КарНЦ РАН, 2016); Всероссийская конференция с международным участием «Экология – 2015», (Архангельск, ИЭПС УрО РАН, 2015); IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 2015).

Публикации: Основные положения диссертации опубликованы в 90 работах, в том числе 51 статье в журналах Web of Science и Scopus, 34 статьях в журналах ВАК, 5 в коллективных монографиях.

Соответствие паспорту научной специальности: диссертация соответствует пунктам 5, 11, 14, 18, 24 паспорта специальности ВАК 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (708 наименований, из них 262 – иностранные источники). Общий объем: 311 страниц, включая 77 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности: с чувством глубокой признательности автор вспоминает своего безвременно ушедшего учителя, открывшего путь в науку, д.г.-м.н. Г.П. Киселева. Автор выражает огромную благодарность научным консультантам: д.г.-м.н. А.И. Малову за

всестороннюю поддержку исследований, ценные советы и новые идеи, постоянное внимание к работе, д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинову за ценные консультации, дискуссии и критические замечания. Автор высоко ценит неоценимую научную и практическую помощь, творческое сотрудничество к.г.-м.н. И.В. Токарева (СПбГУ). Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории экологической радиологии за общую поддержку, помощь в проведении полевых и лабораторных работ, конструктивное обсуждение результатов и ценные советы к.г.-м.н. А.В. Пучкову, С.В. Дружинину, А.С. Орлову, А.А. Кудрявцевой, к.х.н. А.С. Дружининой, С.Б. Зыкову, к.б.н. А.А. Лукошковой, В.М. Быкову, к.г.н. С.А. Игловскому, к.г.н. Е.Н. Зыковой, к.х.н., Иванченко Н.Л., к.х.н. Н.С. Горбовой, к.х.н. А.В. Малкову, к.г.-м.н. А.В. Баженову, П.И. Лапикову, Д.Д. Ершовой и Н.Г. Скютте. Автор также благодарит сотрудника лаборатории глубинного геологического строения и динамики литосферы д.г.-м.н. Е.В. Полякову за общую поддержку. Автор выражает благодарность руководству ЦКП НО «Арктика» А.Ю. Кожевникову и Д.С. Косякову за помощь в проведении анализа химического состава образцов. Также автор искренне благодарен директору ММБИ РАН д.б.н. М.В. Макарову и начальнику отдела гидрометеорологии моря Северного УГМС О.Н. Балакиной за помощь в проведении морских экспедиционных исследований..

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследования, описана степень разработанности темы, сформулированы цель, задачи, методология и методы исследования, охарактеризована научная новизна диссертационной работы, описана практическая и теоретическая значимость научного исследования, приведены сведения об апробации и степени достоверности результатов диссертационного исследования.

В **первой главе** рассмотрено состояние проблемы исследования радиогенного загрязнения природных сред Российской Арктики. Значительный вклад в изучение радиоактивности экосистем Российской Арктики и сопредельных территорий внесли такие известные российские ученые как Лаверов Н.П., Саркисов А.А., Израэль Ю.А., Матишов Д.Г., Матишов Ю.В. Сивинцев, Г.Г., Айбулатов Н.А., Вакуловский С.М., Никитин А.И., Ильин Г.В., Мирошников А.Ю., Киселев Г.П., Малов А.И., Рихванов Л.П., Бахур А.Е., Григорьев А.Г., Евсеев А.В., Болсуновский А.Я. и многие другие исследователи.

Рассмотрение литературных данных о радиогенном загрязнении окружающей среды и распределении радиоактивных элементов в экосистемах арктических территорий позволило выделить ряд аспектов, определяющих актуальность настоящего исследования:

- вопрос о фоновых концентрациях радионуклидов в депонирующих средах прибрежных и морских экосистем Арктики, отражающих геохимические процессы в зоне гипергенеза и определяющих дальнейшее освоение ресурсов континентального шельфа, развитие Северного морского пути, совершенствование природоохранных мероприятий;
- остается дискуссионным вопрос об источниках техногенного радиационного загрязнения Российской Арктики, учет влияния Чернобыльских выпадений, оценка соотношения вклада в дозовые нагрузки на биоту от естественных и антропогенных источников и долгосрочный прогноз изменения радиоэкологической обстановки;
- вопросы корректной оценки радиационного и геохимического воздействия на водные экосистемы районов разработки нерадиоактивных полезных ископаемых, влияние горнотехнической деятельности на водный баланс территорий;
- проблема использования методов датирования молодых осадочных отложений по короткоживущим радионуклидам, которые не учитывают вертикальную миграцию изотопов, что может привести к ошибкам в оценке скоростей накопления и неправильным выводам о геохронологии и распределении загрязняющих нагрузок во времени;
- требует уточнения вопрос возможности использования изотопно-геохимических методов для изучения реакции геологической среды на глобальное потепление для оценки

эмиссии радионуклидов и их изотопов в экосистемы при деградации мерзлоты, прогнозирование негативных радиологических последствий этого процесса.

– вопросы применения изотопно-радиогеохимических методов для поисков нерадиоактивных месторождений полезных ископаемых, в частности алмазоносных кимберлитов, а также вопросы формирования поля радона в областях развития кимберлитового магматизма с точки зрения радиационной безопасности.

Решение этих вопросов является актуальным для целей совершенствования мониторинга окружающей среды в Арктике, обеспечения экологической безопасности территории в условиях изменения климата и развития крупных промышленных и инфраструктурных проектов в Российской Арктике, осуществления природоохранных мероприятий и эффективного ответа Российской Федерации на возникающие угрозы и глобальные вызовы.

Вторая глава посвящена характеристике природных условий региона исследований. В главе рассматриваются географическое положение региона, геолого-тектонические, геоморфологические, геокриологические, ландшафтно-климатические, а также почвенно-растительные условия.

Третья глава посвящена описанию методологических подходов к использованию изотопно-радиогеохимических методов: полевых и лабораторных исследований, аналитических и инструментальных изотопно-радиогеохимических методов, картографической и статистической обработки полученных материалов.

Четвертая глава посвящена проблеме фоновых концентраций радионуклидов в прибрежных и морских экосистемах Арктики, отражающих геохимические процессы в зоне гипергенеза и определяющих дальнейшее освоение ресурсов континентального шельфа и совершенствование природоохранных мероприятий. Рассмотрены источники техногенного радиационного загрязнения Российской Арктики, дана оценка формирования дозовых нагрузок на биоту от естественных и антропогенных источников.

Пятая глава посвящена решению проблемы комплексной оценки воздействия горно-технической деятельности на водные арктические экосистемы на примере добычи и разработки алмазоносных кимберлитов в Архангельской областях, оценке негативного воздействия на биоту и человека.

В **шестой главе** рассматривается влияние потепления климата на эмиссию радиоактивных элементов в Арктике в связи с изменениями в криолитозоне, обуславливающих трансформацию естественного радиационного фона.

Седьмая глава посвящена проблеме использования изотопно-радиогеохимических методов для индикации структур, поисков месторождений нерадиоактивных полезных ископаемых с использованием на примере алмазоносных кимберлитов Архангельской алмазоносной провинции.

На основе выполненных исследований обоснованы следующие научные положения, выносимые на защиту:

Первое защищаемое положение: *изотопно-радиогеохимические методы, основанные на оценке распределения и миграции радионуклидов естественного и антропогенного происхождения в компонентах природной среды Западного сектора Российской Арктики, их изотопных и атомных отношений, позволяют выполнить идентификацию источников загрязнения, использовать радионуклиды в качестве хронометрических маркеров, определить их биологическое воздействие и выполнить прогноз изменения радиоэкологической обстановки под влиянием природных и техногенных факторов.*

Со второй половины XX века Российская Арктика подверглась значительному техногенному радиационному воздействию (Айбулатов, 2000; Сыч, Дубинко, 2005; Синивцев и др., 2005; Саркисов и др., 2012; Матишов и др., 2014). В силу географических и экономических особенностей основное техногенное радиационное воздействие испытал на себе Западный сектор Российской Арктики, где оказалось сосредоточено основное количество различных техногенных радиационных объектов СССР/России, представляющих

как потенциальную, так и реальную радиоэкологическую угрозу (Величкин и др., 2013; Саркисов и др., 2015) (рис. 1).

Несмотря на многократное снижение эмиссии техногенной радиоактивности после прекращения атмосферных испытаний и выбросов в морскую среду радиохимических заводов Западной Европы и прекращение захоронения радиоактивных отходов в морской среде, многообразие источников, значительные объемы исторических поступлений радионуклидов и вызовы связанные с глобальным потеплением, определяют необходимость радиоэкологических исследований природной среды Арктики с целью оценки распределения, уровней накопления и миграции радионуклидов в различных компонентах экосистем, определения соотношения источников, прогноза изменения радиационной обстановки под воздействием различных факторов. Наиболее информативными объектами, отражающими текущую радиоэкологическую обстановку и динамику исторических радиационных воздействий, являются депонирующие природные среды, обладающие повышенной аккумулярующей способностью по отношению к различным загрязнителям, в том числе к радионуклидам. В морской среде таким основным депонирующим объектом, очевидно можно рассматривать морские донные отложения. В континентальной части – торфяные отложения, занимающие в прибрежных районах значительные площади и представленные верховыми сфагновыми болотами с преимущественным атмосферным питанием. Таким образом, рассмотрение вопросов, связанных с оценкой радиоэкологического состояния природной среды Арктики может быть выполнено на примере двух объектов – депонирующих сред: морских донных осадков Баренцева моря и прибрежных торфяных отложений.

Морские донные отложения.

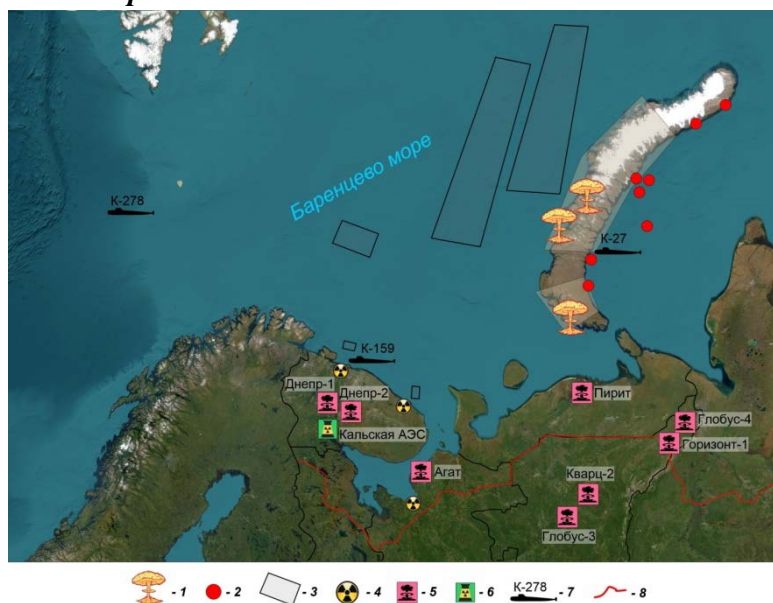


Рис. 1. Схема радиационно-опасных объектов Западного сектора Российской Арктики (составлена по данным Саркисов и др., 2015; Матишов и др., 2019). 1 - места испытаний атомного оружия на Новой Земле; 2 – места захоронения ТРО; 3 – места слива ЖРО в акватории Баренцева моря; 4 – базы военного и гражданского атомного флота, пункты хранения радиоактивных отходов, объекты атомного судостроения и судоремонта; 5 – ядерные взрывы в мирных целях; 6 – Кольская АЭС; 7 – затонувшие АПЛ; 8 – граница Арктической зоны РФ (согласно Указа Президента РФ от 27.06.2017 №287).

В верхнем слое донных осадков Кольского побережья Баренцева моря удельная активность техногенного ^{137}Cs варьирует в пределах от <2 до 12.5 Бк/кг, при среднем значении 5.5 Бк/кг. Наибольшие активности ^{137}Cs в донных осадках приурочены к заливам Кольского побережья. При этом максимально зафиксированные значения >12 Бк/кг обнаружены в Кольском заливе в районе города Мурманск. При удалении от побережья в открытом море наблюдается заметное снижение активности ^{137}Cs . Активность ^{90}Sr в донных осадках Кольского побережья варьирует от 2 до 5.9 Бк/кг при среднем значении 3.5 Бк/кг, что существенно выше средних активностей ^{90}Sr , характерных для акватории Баренцева моря в целом 0.32 Бк/кг (Кобылянский и др., 2012). Необходимо отметить, что в измеряемых количествах ^{90}Sr обнаружен лишь в 30% изученных проб. Пространственное распределение ^{90}Sr имеет общие черты с распределением ^{137}Cs , когда максимальные активности наблюдаются в заливах. Средние активности ^{137}Cs обнаруженные для открытых частей Баренцева моря в среднем составляют 3.2 Бк/кг. Полученные данные по активностям и

характеру распределения ^{137}Cs также близки к значениям ранее проведенных исследований (Усягина, 2012). В накоплении техногенных радионуклидов в поверхностном слое донных осадков основную роль играет органическое вещество и самые мелкие фракции отложений размером от тонкой глины до крупнозернистого ила, что подтверждает закономерность – осадки с высоким содержанием глинистых минералов и богатые органическим веществом имеют наибольший потенциал для накопления техногенных радионуклидов.

Среднее отношение активностей $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ в поверхностном слое донных отложениях составляет 0.51, что указывает на то, что основным источником техногенных радионуклидов в формирующихся в настоящее время осадках, вероятно, являются глобальные выпадения, для которых характерен диапазон отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 0.4-0.6 (Zhang et al., 2021). В тоже время короткоживущие техногенные радионуклиды в поверхностном слое донных осадков не обнаружены, что указывает на отсутствие значимого влияния местных источников на трансформацию техногенного радиационного фона. В целом в морской среде Баренцева моря произошло значительное снижение активности техногенных радионуклидов, обусловленных глобальными атмосферными выпадениями и трансграничным переносом от западноевропейских радиохимических предприятий (Матишов и др., 2019). Наблюдаемый в настоящее время относительно низкий уровень техногенных радионуклидов в поверхностном слое донных осадков, очевидно со временем будет ещё более снижаться при условии отсутствия влияния других источников. Тем не менее, в прибрежной зоне Кольского полуострова в настоящее время существуют радиационные объекты, вызывающие серьезную обеспокоенность. К таким объектам относится субмарина К-159, которая затонула при буксировке на завод для утилизации в августе 2003 на выходе из Кольского залива (Саркисов и др., 2015). Активность радионуклидов в реакторах подлодки, в основном ^{137}Cs и ^{90}Sr , оцениваемая в ~ 5 ПБк, является максимальным значением среди затопленных в арктических морях радиационных объектов, что выносит К-159 на первое место по степени потенциальный радиоэкологической опасности (Саркисов и др., 2015).

Другим важным источником поступления техногенной радиоактивности в морскую среду Баренцева моря в связи с глобальным потеплением климата может являться вторичное загрязнение в результате деградации ледникового покрова Новой Земли, в котором были депонированы значительные объемы техногенной радиоактивности в результате атмосферных ядерных испытаний (Мирошников и др., 2017). По оценкам (Aarkrog, 1997) расчетная суммарная активность ^{137}Cs , которая могла поступить на острова Новой Земли в результате локальных тропосферных выпадений, составляет ~ 30 ПБк. И действительно, в криоконитах ледникового покрова Северного острова Новой Земли обнаруживаются наиболее высокие для Арктики активности ^{137}Cs , варьирующие в диапазоне 5700-8100 Бк/кг (Miroshnikov, 2018; Miroshnikov et al., 2021). Столь высокое накопление ^{137}Cs в криоконитах было связано с таянием погребенного слоя загрязненного льда. С высвобождением ^{137}Cs из ледникового покрова Новой Земли связано и формирование в прибрежных донных осадках зоны с повышенной активностью ^{137}Cs , как в Карском, так и Баренцевом море (Мирошников, 2012; Miroshnikov et al., 2021). Таким образом, учитывая значительные оцененные объемы местных выпадений, вопросы оценки миграции в будущем будет иметь высокую актуальность.

Торфяной покров прибрежных территорий.

В Российской Федерации сосредоточено от 40 до 60 % мировых ресурсов торфа, при этом в северных областях Европейской части России разведано наибольшее количество запасов торфа оцененных в 6.9 млрд т (36.2 % от запасов России) (Инишева, 2005; Малыгин, Лобов, 2014; Михайлов и др., 2013). На этих территориях, в том числе в пределах границы Арктической зоны Российской Федерации, относящихся к поясу интенсивного торфонакопления, торфяно-болотные экосистемы являются основными биогеоценозами (Селянина и др., 2013).

Преобладающим типом болот на этих территориях являются верховые болота, доминирующим источником питания которых являются аэрозоли, воздушная пыль и

атмосферные осадки (Vinichuk et al., 2004), что приводит к формированию бедной питательными веществами среды, на которой преобладают сфагновые мхи. Поэтому торфяники выступают для континентальной части Западного сектора Российской Арктики представительной депонирующей средой – архивом атмосферных загрязнителей, ведущую роль среди которых играют радиоактивные элементы. Свойства торфяников как депонирующей среды имеют важнейшее значение не только с точки зрения оценки текущего радиационного состояния территории, но и для решения ряда практических задач геохимии, таких как определение хронологии торфа и скоростей накопления, оценка миграции различных радионуклидов в торфяном массиве, определение источников радионуклидного загрязнения, динамики антропогенных нагрузок и климатических изменений в прошлом (Hendon et al., 2004; Dowdall et al., 2005; Zaccone et al., 2007; Parry et al., 2013; Hansson et al., 2014; Mroz et al., 2017; Fialkiewicz-koziel et al., 2014; Li et al., 2017).

В рамках диссертационной работы для торфяных профилей, отобранных в различных природно-климатических зонах Западного сектора Российской Арктики (Мурманская и Архангельская области, Ненецкий автономный округ, рис. 2) были впервые получены данные о вертикальном распределении радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{238,239,240}\text{Pu}$, ^{210}Pb . Установлено, что активности техногенных изотопов в целом находятся в пределах диапазонов, характерных для органогенных почв Европейского Севера России. Данные по физико-химическим параметрам торфяных отложений показывает, что активности радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{210}Pb в основном контролируются зольностью, содержанием карбонатов и водорастворимых солей, что подтверждает атмосферный канал поступления указанных радионуклидов. Обнаруживается также закономерная связь радиоактивных изотопов с параметрами pH, что указывает на то, что кислотность является одним из



ключевых факторов, определяющих подвижность радионуклидов в торфяных залежах (Frohne, 2011).

Рис. 2. Районы отбора торфяных отложений.

С использованием ^{210}Pb по модели постоянного потока (Constant Rate of Supply – CRS, Appleby et al., 2017) были определены скорости накопления торфа. Для оценки неопределенности скоростей накопления торфа использовался метод Монте-Карло (Sanchez-Cabeza et al., 2012). Установлено, что средние скорости накопления торфа значительно снижаются от зоны северной тайги и лесотундры к тундровым ландшафтам (от 0.52 ± 0.14 см год $^{-1}$ до 0.29 ± 0.06 см в год $^{-1}$). Это связано с меньшей продуктивностью биомассы в холодных климатических условиях тундровой зоны, что препятствует активному формированию торфяной залежи. В целом повышенные скорости накопления торфа характерны для верхней части торфяных профилей, где наблюдается минимальное уплотнение торфа. Другим важным параметром, который можно получить из анализа активности ^{210}Pb является атмосферный поток ^{210}Pb на поверхность торфяников, позволяющий оценивать потоки загрязняющих веществ из атмосферы и закономерности распределения загрязняющих нагрузок в различных ландшафтах (Preiss et al., 1996). Атмосферный поток ^{210}Pb рассчитанный для изученных торфяных разрезов $80-167$ Бк м $^{-2}$ год $^{-1}$ близок к диапазону, характерному для других территорий Северной Европы – Финляндии, Швеции, Эстонии ($50-116$ Бк м $^{-2}$ год $^{-1}$). Однако между изученными районами есть значимые отличия в значениях потока ^{210}Pb . Так для

торфяных залежей зоны северной тайги и переходной зоны от северной тайги к лесотундре в Архангельской области атмосферный поток ^{210}Pb варьирует в диапазоне 80-92 Бк м⁻² год⁻¹, а то время как для торфяных залежей тундровой зоны поток ^{210}Pb изменяется в диапазоне 108-167 Бк м⁻² год⁻¹.

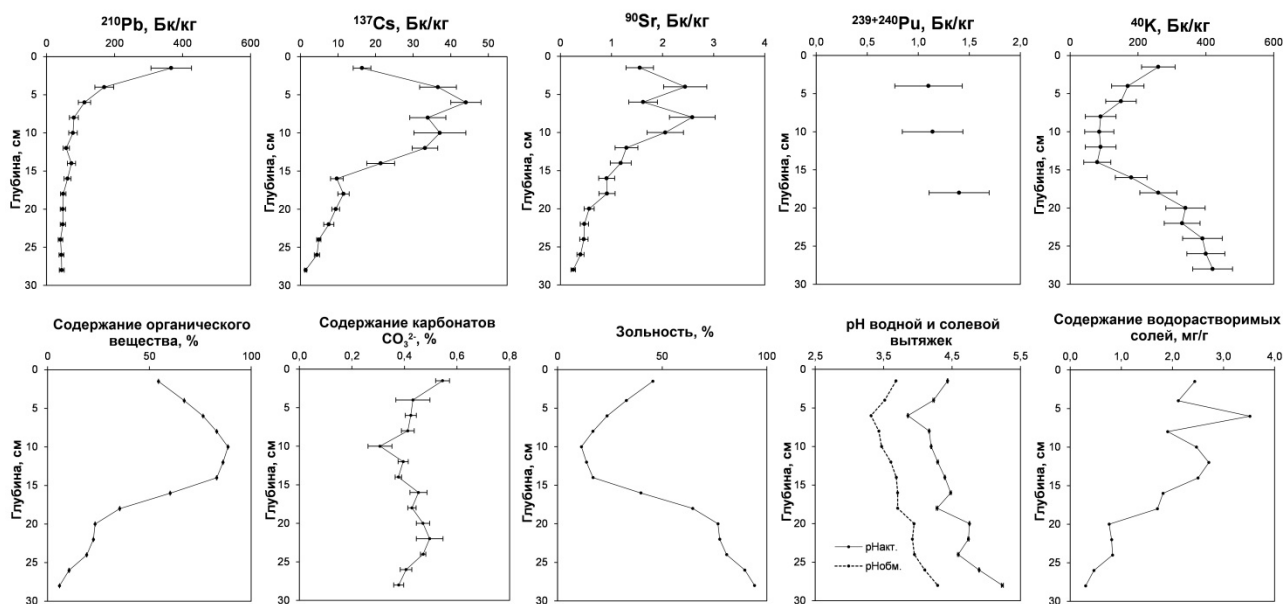


Рис. 3. Вертикальное распределение активностей радионуклидов и физико-химических параметров в торфяном разрезе Тн-1 (Ненецкий АО).

Известно, что при движении на север атмосферный поток ^{210}Pb должен снижаться за счет уменьшения активности ^{222}Rn в приземном слое (Preiss et al., 1996; Mroz et al., 2017). Однако полученные в диссертационной работе данные показывают, что атмосферный поток ^{210}Pb наоборот увеличивается от зоны северной тайги к тундре от 80 до 167 ± 59 Бк м⁻² год⁻¹. Установлено, что повышенный поток ^{210}Pb для торфяников тундровой зоны связан с активным ветровым переносом пыли и частиц минерального грунта с участков с деградировавшим растительным покровом в результате хозяйственной деятельности человека, расположенных вблизи районов опробования, что отчетливо видно по высокой зольности приповерхностного слоя торфа до 50% и активности литогенного ^{40}K . Вообще деградация тундрово-болотных ландшафтов является острой проблемой для Российской Арктики (Шарафутдинов и др., 2022). В первую очередь деградация торфяного покрова в тундре происходит в результате воздействия гусеничной техники, что приводит к разрывам сплошности торфяного покрова, изменениям микрорельефа и геокриологических условий, развитию активных эрозионных процессов (Игловский, 2007; Трегубов, 2010). Полученные данные дают основания для использования параметра атмосферного потока ^{210}Pb для выделения участков подверженных антропогенному воздействию и оценки степени нарушенности тундрово-болотных ландшафтов. Кроме этого, данные атмосферного потока ^{210}Pb на поверхность торфяников могут использоваться для количественного расчета поступления загрязняющих веществ в Арктике.

Результаты исследования вертикального распределения техногенных радионуклидов показывают, что надежное определение скорости аккумуляции и возраста торфа по изотопам, маркирующим радиационные события в условиях Западного сектора Российской Арктики может быть затруднено, что связано с различной степенью подвижности радионуклидов в торфяном массиве. Например, для определения скоростей накопления морских отложений часто используется ^{137}Cs , который во-первых, сравнительно легко определяется аналитически, и во-вторых, слабо мигрирует в донных осадках, что позволяет выполнять датирования к привязке к пикам активности, соответствующим максимуму выпадений от атмосферных испытаний (1963 год) и выбросам от аварии на Чернобыльской АЭС (1986 год) (Сидоров, Проскурнин, 2018). В случае изученных торфяных отложений

использовать ^{137}Cs для целей оценки скоростей накопления торфа и соответственно датирования не представляется возможным в связи с его высокой миграционной способностью. Другие важные маркеры техногенных радиационных воздействий, такие как ^{241}Am и изотопы Pu, которые как указывается в литературе несколько менее подвижные в торфяных отложениях, чем ^{137}Cs (Kresting, 2013; Mihalik et al., 2014), также не могут быть использованы в качестве надежных хронометрических маркеров, поскольку их трудно обнаружить в изученных торфяниках по причине их крайне низких активностей и методических сложностей определения как методом гамма-спектрометрии для ^{241}Am , так и альфа-спектрометрии с радиохимическим выделением для изотопов Pu.

В связи с этим в условиях изученных торфяных отложений единственной альтернативой методу датирования по маркирующим радиационные события горизонтам, является использование метода неравновесного свинца ^{210}Pb , который считается наименее подвижным среди радионуклидов атмосферных выпадений (Vile et al., 1999; Appleby, 2008). Однако эта методика также не может являться универсальной, поскольку основана на ряде допущений: (1) скорость осаждения ^{210}Pb из атмосферы на поверхность торфяника постоянна; (2) постаккумуляционные нарушения накопленного торфа отсутствуют; (3) содержащийся в воздухе ^{210}Pb иммобилизуется на поверхности болота и захоранивается по мере вертикального роста торфа; (4) изменение окислительно-восстановительных условий и колебания уровня торфяной воды не приводит к миграции ^{210}Pb по разрезу (Livett, 1988; Clymo et al., 1990; Vile et al., 1999; Mroz et al., 2017). Анализ вертикального распределения ^{210}Pb в изученных торфяниках в целом отвечал критериям применимости метода, что позволило получить данные по скоростям накопления. В тоже время отмечается, что в ряде случаев может наблюдаться значительная вертикальная миграция ^{210}Pb вниз по торфяному разрезу, при которой распределение ^{210}Pb , обусловленное вероятно вариациями геохимическими параметров залежей, не отвечает монотонному экспоненциальному снижению активности (Biester et al., 2007; Klaminder et al., 2011; Swanek et al., 2021; Прейс, 2012; Прейс и др., 2021). Таким примером для региона исследования служит торфяной разрез, отобранный в пределах Иласского болотного массива, расположенного в Приморском районе Архангельской области (торфяной разрез ИСНО-1). Наличие в торфяном разрезе горизонта (19-21 см) с активностью ^{210}Pb близкой к уровню современного поступления ^{210}Pb из атмосферы, свидетельствует о нисходящей миграции этого радионуклида вниз по торфяному профилю (рис. 4).

Такое распределение ^{210}Pb может затруднить получение достоверных датировок с использованием «классического» метода датирования CRS (Appleby, 2008), поскольку метод расчета основан на предположении о полном связывании свинца торфом (и соответственно крайне низкой его миграции). Связывание свинца торфом в значительной мере обусловлено хемосорбционными процессами, обусловленных наличием в торфе ионогенных групп (Масленников, 1994), и зависит от его концентрации и pH в торфяной залежи (Husson 2013, Schleich et al. 2000).

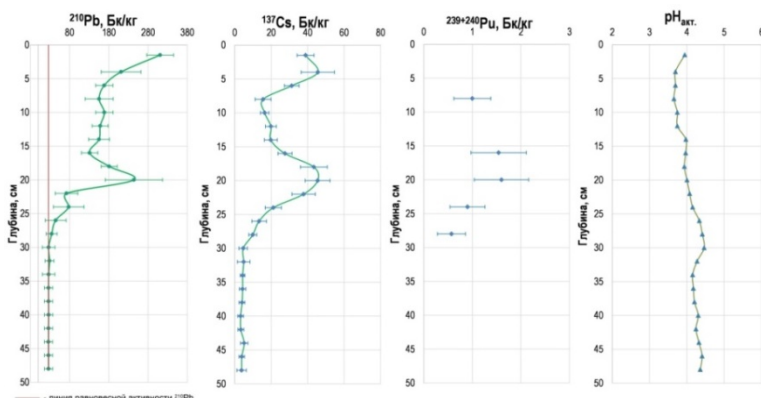


Рис. 4. Вертикальное распределение ^{210}Pb , ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$, а также величины pH в торфяном разрезе ИСНО-1 (Архангельская область).

Экспериментальное моделирование в статических условиях показало, что иммобилизация Pb усиливается с ростом pH в интервале от 2 до 6. Связывание свинца в области

ультрамалых концентраций ($1.77 \cdot 10^{-7}$ мг/г, что эквивалентно активности ^{210}Pb в 50 кБк/кг абсолютно сухого торфа) варьируется от 55.5 до 99.0 % (рис. 5).

Полученные результаты подтверждают достаточно высокую связывающую способность торфа по отношению к свинцу и позволяют сделать вывод о низкой подвижности свинца, которая, однако, может увеличиваться в низкой области рН 2-4 ед.

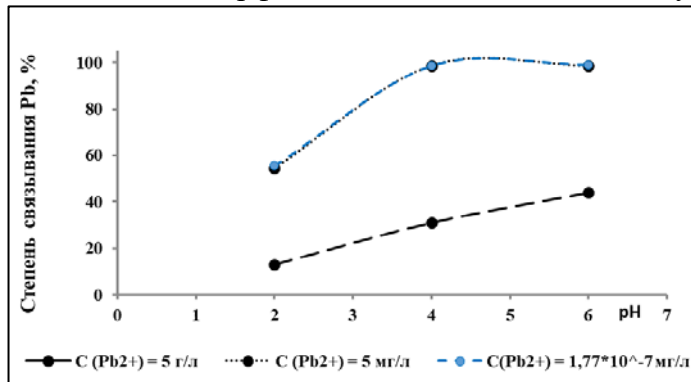
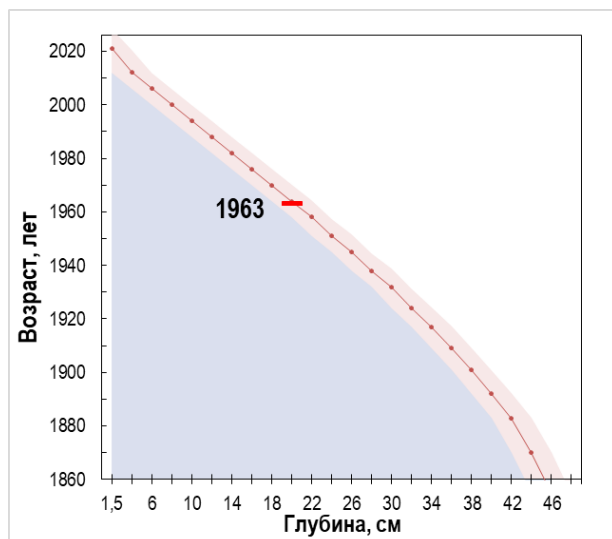


Рис. 5. Влияние рН на связывание Pb²⁺ верховым торфом Иласского болотного массива (разрез ИСНО-1)

Так, активная кислотность в разрезе ИСНО-1 до глубины 20 см находится на уровне ниже рН 4 и варьирует в диапазоне рН 3.66 – 3.95 (рис. 4). В то же время натурные экспериментальные исследования межфазного распределения ²¹⁰Pb не позволяют достоверно обнаружить наличие его миграционно-способных форм непосредственно в торфяной залежи (растворенных и связанных со взвешенными частицами). Несмотря на то, что степень химического связывания свинца торфом в области рН 4-6 ед. достигает 98-99 %, это не исключает его механическое перемещение в залежи в связанном с тонкодисперсной фракцией органической части торфа в результате разложения органического вещества торфа, био- и криотурбация внутри акротельма, которые однако не могут обеспечить столько значимую нисходящую миграцию ²¹⁰Pb, которая наблюдается для разреза.

Поскольку нисходящая миграция ²¹⁰Pb охватывает только верхнюю часть залежи, то основным механизмом его миграции может служить вымывание атмосферными осадками. Как правило, самые верхние слои торфа (акротельм), состоящие из живых сфагновых мхов, менее уплотнены, имеют высокую пористость и высокую гидравлическую проводимость (Popomareva et al., 2021). В результате чего, например, во время сильного дождя некоторая часть аэрозольных частиц, с которыми связан ²¹⁰Pb, может проникать вглубь торфяной залежи не успевая образовывать прочные связи с органическим веществом торфа. Сравнительно быстрое вымывание дождевыми осадками аэрозольных частиц из верхних слоев торфа показано на примере короткоживущего космогенного изотопа ⁷Be (T_{1/2}=53.3 дня), который также как ²¹⁰Pb прочно связывается органическим веществом торфа, но при этом обнаруживается в измеряемых количествах в торфяных залежах на глубине до 20 см (Hansson et al., 2014). Однако полученные данные по активности ²¹⁰Pb в торфяных залежах изученной территории показывают, что резко нарушенное распределение ²¹⁰Pb по торфяным разрезах скорее является исключением и вероятно обусловлено совокупностью факторов, определяющих вымывание некоторой части свинца из верхних горизонтов конкретной залежи – видовой состав болотной растительности, физико-химические характеристики верхних горизонтов торфа, компонентный состав органического вещества торфа, состав и размеры аэрозольных частиц, содержащих ²¹⁰Pb и другие факторы. В отсутствие надежных количественных параметров миграции ²¹⁰Pb, когда в разрезе наблюдается сложное вертикальное распределение и выраженная нисходящая миграция свинца-210, в первом приближении можно восстановить начальное распределение ²¹⁰Pb в залежи, которое затем можно будет использовать для датирования стандартными средствами. Для этого для рассматриваемого разреза ИСНО-1 было выполнено датирование на основе модифицированной модели IP-CRS (MacKenzie et al., 1997; Olid et al., 2016). Расчеты выполнялись с помощью программного обеспечения Matlab. Полученные данные о количестве вымытого из каждого горизонта свинца-210, позволили восстановить распределение ²¹⁰Pb по торфяному разрезу, которое отвечало требованиям модели CRS (монотонное экспоненциальное снижение активности ²¹⁰Pb), что дало возможность выполнить датирование разреза (рис. 6). Полученные возрастные характеристики разреза ИСНО-1 (рис. 6) не противоречат данным по средней скорости накопления торфа по другим

изученным торфяным разрезам Архангельской области (0.41-0.44 см в год⁻¹), что в целом подтверждает целесообразность использования модели IP-CRS для оценочных хронологических построений. В тоже время, если выполнять оценки возраста торфа с использованием только исходных данных по активности ²¹⁰Pb в разрезе, без учета миграции свинца, то это может приводить к существенным ошибкам. Так, в результате датирования исходных данных по ²¹⁰Pb для разреза ИСНО-1 с использованием стандартной модели CRS, год формирования слоя 20 см был оценен как 1978 (Yakovlev et al., 2023). В любом случае,



очевидно, что наиболее точные оценки возраста могут быть получены только на основе математической модели, которая бы охватывала все многообразие физических, геохимических и биологических процессов, происходящих в торфяной залежи, влияющих на миграцию ²¹⁰Pb и других радионуклидов.

Рис. 6. Результаты датирования торфяного разреза ИСНО-1 по модели IP-CRS (Иласский болотный массив, Архангельская область)

Правильная оценка хронологии торфяной залежи с сопоставлением результатов датирования с маркерами радиационных событий актуализирует

необходимость установления источников техногенного радиационного загрязнения торфяно-болотных экосистем Западного сектора Российской Арктики. Для оценки источников радиационного загрязнения, как правило, используется метод расчета отношений активностей техногенных радионуклидов (Holm et al., 1992; Masque et al., 2007; Lokas et al., 2013). Считается, что основным источником являются радионуклиды глобальных выпадений, образованных в результате атмосферных испытаний проведенных в атмосфере до 1963 года и за счет стратосферного переноса выпавших на поверхность земли (АМАР, 2015). Установлено, что изотопные отношения основных техногенных радионуклидов ⁹⁰Sr/¹³⁷Cs, ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu/¹³⁷Cs, ²⁴¹Am/²³⁹⁺²⁴⁰Pu, характерные для глобальных выпадений составляют 0.6, 0.025, 0.04, 0.37, соответственно, и что является ориентиром при радиоэкологических исследованиях (Kirchner, Noack, 1988; Kutkov, 1995; Kershaw et al., 1995). Однако изотопные отношения, обнаруживаемые в различных объектах окружающей среды Арктики, не всегда соответствуют глобальным выпадениям, что, вероятно, свидетельствует о вкладе других источников загрязнения (Lokas et al., 2013, 2017). Так, для тундровых почв Ненецкого автономного округа также было показано, что указанные изотопные отношения значительно отличаются от глобальных выпадений по средним значениям и по наклону линейной регрессии (Puchkov, Yakovlev, 2023). В большей степени это проявлено для значения ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu, составляющего 0.102, что может свидетельствовать о возможном вкладе чернобыльских выпадений, характеризующихся избыточностью ²³⁸Pu (Mietelski et al., 1995). Можно предположить, что подвижность различных техногенных изотопов в тундровых почвах, тем более в такой условно агрессивной среде как кислые торфяные почвы, может быть разная, что приводит к искажению изотопных отношений и отклонению их от значений глобального фона. К тому же, изотопы плутония (главным образом ²³⁸Pu) из-за крайне низких фоновых активностей трудно обнаружить и измерить с достаточной точностью методом альфа-спектрометрии с радиохимическим выделением. Измерение содержания отдельных изотопов плутония ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu, выполненное в Институте радиобиологии НАН Беларуси с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP Q-MS) Elan DRC-e, Perkin Elmer показало, что среднее значение атомного отношения ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu для торфяников Архангельской области (разрезы

Та-1 и Та-2) близко к значению глобальных выпадений 0.182 (Kelley et al., 1999). Однако в изученных профилях на глубинах 11-14 см отмечаются повышенные значения $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 0.292 – 0.315, которые по результатам ^{210}Pb -датирования соответствует временному отрезку 1985-1988 гг.

Можно предположить, что дополнительным источником техногенной радиоактивности, фиксируемой в торфяниках Западного сектора Российской Арктики являются выпадения от аварии на Чернобыльской АЭС, для которых характерно атомное отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ $\sim 0.38-0.41$ (Muramatsu et al., 2000; Lindahl et al., 2004). Вклад чернобыльского Pu обнаруживается в различных районах Северной Европы (Mietelski, 2001; Quinto et al., 2013; Mietelski et al., 2016). В лишайниках Швеции атомное отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ варьирует от 0,16 до 0,44, вклад чернобыльского Pu в общие глобальные выпадения на этой территории оценивается от 15% до 70% (Lindahl et al., 2004). В Финляндии вклад чернобыльского Pu оценивается примерно 10% от уровня глобальных выпадений (Paatero et al., 1998). В почвах Шпицбергена отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ достигает 0.241 (Lokas et al., 2013). Несмотря на то, что основная часть слаболетучего плутония выпала в 30-км зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (Лукашенко и др., 2021), распространению плутония на значительные расстояния способствовала возгонка высших оксидов Pu, в результате чего, изотопы плутония обнаруживаются в цезиевых пятнах от выбросов чернобыльской аварии (Романенко и др., 2006).

Таким образом, полученные данные по торфяникам Западного сектора Российской Арктики, свидетельствуют о том, что основным источником техногенного радиационного загрязнения являются глобальные атмосферные выпадения. В тоже время анализ изотопных и атомных отношений техногенных радионуклидов свидетельствует о некотором вкладе предположительно чернобыльский выпадений. Однако очевидная подвижность различных изотопов по профилю и методические ограничения в определении низких активностей техногенных радионуклидов требуют проведения дополнительных исследований.

Вне зависимости от источников радиационного загрязнения техногенные радионуклиды, обнаруживаемые в торфяных отложениях Западного сектора Российской Арктики, очевидно создают дополнительные дозовые нагрузки на биоту торфяно-болотных экосистем, что требует оценки радиоэкологических рисков. На основе полученных данных выполнена оценка доз облучения техногенными радионуклидами для наиболее уязвимых краснокнижных животных обитающих в пределах торфяно-болотных экосистем Западного сектора Российской Арктики на примере северной части Архангельской области: Приморский и Мезенский районы. Были выбраны следующие виды: обыкновенная гадюка (*Vipera berus*), лесной гуменник (*Anser fabalis*), серый сорокопут (*Lanius excubitor*), северный олень (дикий) (*Rangifer tarandus*). При расчете доз внешнего облучения использовался программный продукт BiotaDC v.1.5.1. Выбор параметров для расчетной модели проводился в соответствии с рекомендуемыми примерами Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Для каждого вида получены дозовые коэффициенты, которые позволили рассчитать мощность внешней поглощенной дозы излучения от техногенных радионуклидов.

Установлено, что мощность внешней поглощенной дозы от ^{137}Cs превышает на 1-3 порядка величины других изученных изотопов (рис. 7). Наибольшее значение мощности внешней поглощенной дозы ^{137}Cs среди рассмотренных видов отмечено для обыкновенной гадюки до $1.92 \cdot 10^{-2}$ мкГр/ч, что очевидно связано с образом жизни этого животного. Для остальных животных значение мощности внешней поглощенной дозы ^{137}Cs не превышает $5,20 \cdot 10^{-3}$ мкГр/ч. Для изотопов трансурановых элементов ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ характерно минимальное значение мощности поглощенной дозы для всех животных независимо от местообитания и варьирует в пределах от $n \cdot 10^{-8}$ до $n \cdot 10^{-6}$ порядка величины. Низкие значения мощности поглощенной дозы от этих изотопов обусловлены тем, что альфа-излучающие изотопы при распаде оказывают наибольший биологический эффект будучи

инкорпорированными в биологические ткани. Поэтому основной вклад в дозовую нагрузку они будут оказывать за счет внутренней, а не внешней поглощенной дозы.

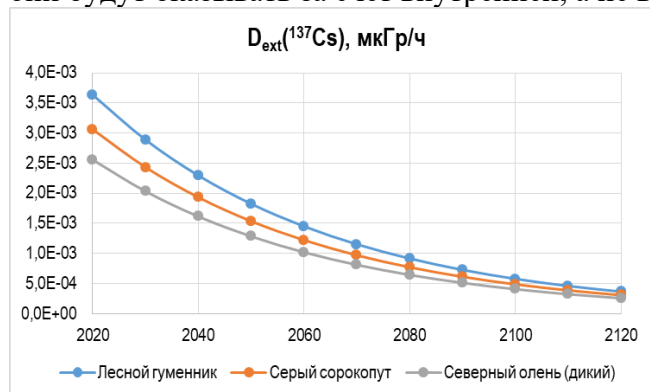


Рис. 7а. Прогноз изменения мощности дозы внешнего облучения ¹³⁷Cs для животных торфяно-болотных экосистем Мезенского района Архангельской области.

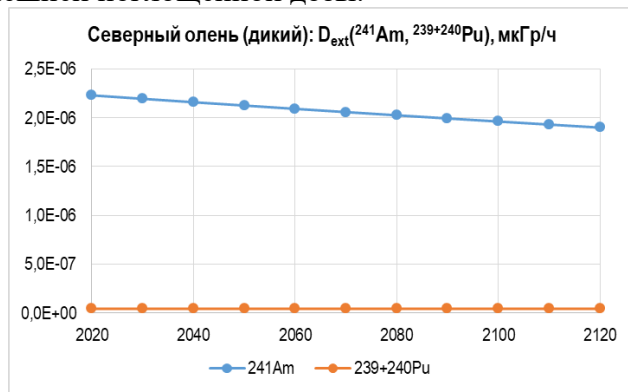
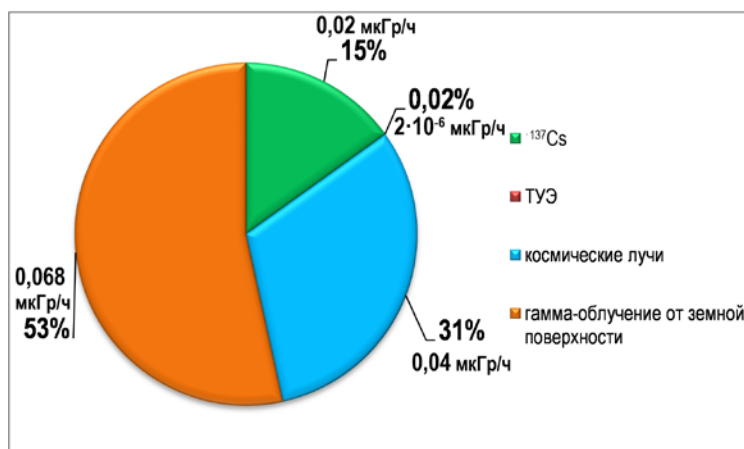


Рис. 7б. Прогноз изменения мощности дозы внешнего облучения изотопов трансурановых элементов для северного оленя (дикого).

Прогнозные значения мощности внешней поглощенной дозы ¹³⁷Cs, рассчитанные исключительно с учетом радиоактивного распада показывают, что спустя 100 лет, значения мощности дозы внешнего облучения от ¹³⁷Cs для рассмотренных видов уменьшатся на порядок величины (рис. 7). Поскольку периоды полураспада изотопов трансурановых элементов намного больше прогнозных 100 лет, то значения мощности дозы внешнего облучения останутся практически неизменными. Сравнение полученных доз облучения с производными референтными уровнями МКРЗ показало крайне низкие дозовые нагрузки: производные референтные уровни, превышение которых может вызвать биологические эффекты для обыкновенной гадюки составляют 41.67 – 4.17·10² мкГр/ч, для лесного гуменника, серого сорокопута и северного оленя (дикого) 4.17 – 41.67 мкГр/ч. В тоже время сравнение полученных данных по дозовым нагрузкам внешнего облучения от техногенных радионуклидов и естественных источников показывает, что основной вклад в дозу для наземных позвоночных дает терригенное облучение от изотопов входящих в природные ряды распада (0.068 мкГр/ч или 53 %), а также космическое излучение (0.04 мкГр/ч или 31 %) (рис. 8).

При этом доза облучения, формируемая ¹³⁷Cs составляет 0.02 мкГр/ч или 15%, что можно считать значимым вкладом в суммарную дозу внешнего облучения животных торфяно-болотных экосистем, что справедливо актуализирует вопрос



оценки эффектов хронического действия доз облучения от техногенных источников на биоту.

Рис. 8. Вклад различных источников излучения в дозы внешнего облучения наземных позвоночных. Данные по средним дозам от естественных источников взяты из работы (Линге, Крышева, 2021).

Второе защищаемое положение: использование изотопно-радиогеохимических методов позволяет выполнить количественную оценку воздействия горнотехнической деятельности на объекты окружающей среды, связанные с трансформацией радионуклидного и химического состава водных экосистем Западного сектора Российской Арктики.

Эксплуатация месторождений полезных ископаемых в осадочных бассейнах характеризуется интенсивным развитием техногенных факторов изменения геоэкологических условий окружающей среды (Fuge et al., 1992; Prasad et al., 2014; Singh and Kumar, 2017; Янин, 2003; Malov, 2018; Ahmadi et al., 2018; Çimen et al., 2018; De Carvalho Filho et al., 2017). Один из таких факторов связан с формированием радиогенных нагрузок на биоту и человека. Для некоторых отраслей горнотехнической деятельности проблема формирования повышенной радиоактивности является очевидной и известной, например добыча радиоактивных руд и углеводородов, в которых применяются соответствующие меры снижения радиационного воздействия на персонал и окружающую среду. Значительно меньше внимания уделяется исследованию горнотехнической деятельности, связанной с добычей и переработкой нерадиоактивных полезных ископаемых (в основном металлов), хотя их радиационное воздействие на экосистемы может быть вполне сопоставимо с добычей урановых руд, поскольку руды металлов часто ассоциированы с уран-торий содержащими минералами. Более того даже когда извлекаемые руды имеют близкие к кларковым содержания радиоактивных элементов, в процессе добычи, обогащения, последующей миграции радионуклидов из отвалов и хвостов происходит многократное концентрирование изотопов (особенно в депонирующих средах), при котором их активности могут представлять для экосистем значимое радиологическое воздействие. Проведенные в последние годы в ряде стран исследования показали, что эта проблема имеет значительно больший масштаб, чем считалось раньше, поэтому в настоящее время данный вопрос активно разрабатывается на уровне МАГАТЭ и крупных международных проектов (IAEA, 2019; EURATOM Horizon, 2020).

Геологические предпосылки образования повышенных содержаний естественных радиоактивных элементов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых существуют и для территории Западного сектора Российской Арктики, особенно для Кольского полуострова, где разрабатываемые месторождения часто ассоциированы с уран-ториевыми минералами в рудах и вмещающих породах. Однако вопросы, связанные с возможным радиационным воздействием на экосистемы районов добычи полезных ископаемых в регионе, освещены крайне слабо. В связи с возможностью многократного концентрирования радиоактивных элементов в процессе разработки, особенно остро (ввиду неочевидности) эта проблема может стоять для месторождений, руды которых характеризуются крайне низкими содержаниями естественных радиоактивных элементов. В Западном секторе Российской Арктики примером таких месторождений являются алмазонасные кимберлиты, которые среди магматических пород имеют наименьшее содержание радиоактивных элементов ($U < 1$ мг/кг). Для решения проблемы, связанной с разработкой методов корректной оценки воздействия горнотехнической деятельности на эмиссию в окружающую среду региона естественных радионуклидов, в качестве объекта был выбран район месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Его можно рассматривать как модельный представительный для арктического региона объект, характеризующий комплексное воздействие на окружающую среду, которое возникает при добыче полезных ископаемых открытым способом.

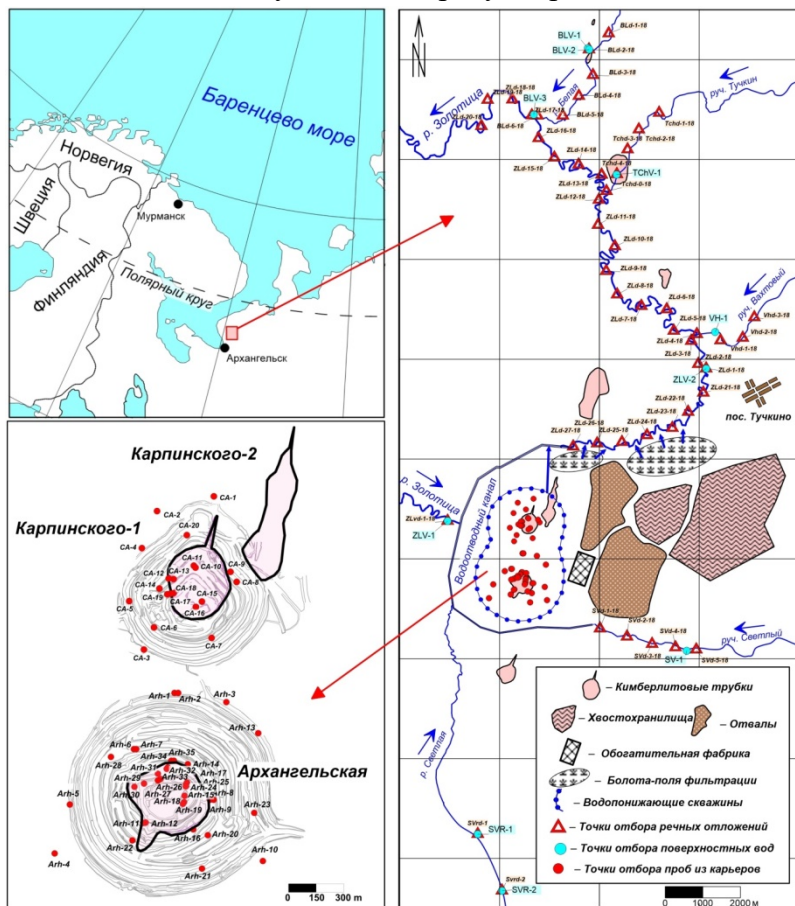
Месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова является крупнейшим промышленным месторождением алмазов в Европе, на долю которого приходится 18 % запасов алмазов Российской Федерации (Истратова, 2023). Промышленное освоение месторождения (горно-капитальные работы) началось в 2003 году, а в 2005 году началась разработка первой трубки Архангельская и заработала обогатительная фабрика. На проектную мощность горно-обогатительная фабрика вышла в 2014 году с началом разработки второй трубки Карпинского-1 (Солдатов, 2016). В настоящее время добыча алмазов ведется открытым способом из двух карьеров, сближенных друг к другу трубок Архангельская и Карпинского-1, включает в себя полный цикл обогащения и различные мероприятия по обеспечению функционирования горно-обогатительного производства (сооружение отвалов и хвостохранилищ, водопонижение, очистка промывных вод обогатительной фабрики,

сооружение полей фильтрации). Основное экологическое воздействие с начала разработки кимберлитовых трубок испытала на себе река Золотица – основная река, протекающая в районе месторождения. С начала разработки с 2003 года в связи со сбросом дренажных вод произошла значительная трансформация химического состава воды в реке, приведшая к изменению ее ионного состава (Malov, 2018). Так гидрохимический состав поменялся с CaHCO_3 на $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$, а общая минерализация выросла практически в 2.5 раза, с 160-172 мг/л до 380 мг/л. Концентрации ряда тяжелых металлов, таких как Sr, B, Mo, Zn, Cr в речной воде также значительно повысились (Malov, 2018). Сброс дренажных вод закономерно отразился на увеличении расхода реки, особенно в меженный период (Котова и др., 2022). Среднее содержание растворенного в воде кислорода снизилось с 12.75 до 9.47 мг/л, при чем отмечались периоды когда концентрация кислорода опускалась ниже ПДК (6.0 мг/л) (Котова и др., 2022). Изменение кислотности и рост минерализации речной воды привел с одной стороны к увеличению разнообразия водных растений (гидрофитов) в реке Золотице, с другой стороны к снижению доли часто встречающихся и росту доли редких видов (Селянина и др., 2020). Важно отметить, что риски загрязнения речной экосистемы во многом связаны с масштабной сапонитизацией кимберлитовых пород. Из-за высокой степени химического выветривания кимберлитов месторождения высокомагнезиальный глинистый минерал сапонит практически полностью замещает минералы слагающих трубки пород (автолитовые и туфобрекчии) (Вержак, Гаранин, 2005). Сапонитсодержащая пульпа, образующаяся в результате обогащения кимберлитов, складывается в хвостохранилищах. Однако тонкодисперсная сапонитовая суспензия, составляющая основную часть легкой фракции хвостов, имеет очень низкие скорости седиментации (~0.004 см/час) и плотность осадка, что вынуждает увеличивать площадь и объем хвостохранилищ (Карпенко, 2009). Значительное количество сапонита содержится и в карьерных водах (Алексеев и др., 2020). После предварительного осветления в отстойниках, воды сбрасываются на болота-поля фильтрации (верховые сфагновые торфяники), после чего самотеком поступают в пойму реки (Атрощенко, 2019).

Экспериментальное моделирование показало, что, несмотря на высокую буферную способность верхового торфа, сброс сапонитсодержащих вод, оказывает раскисляющее действие на болотный массив и приводит к повышению общей минерализации болотных вод (Пономарева и др., 2019). Воздействие сапонита на болотные воды, обуславливающий изменение их физико-химических параметров, приводит к образованию органоминеральных ассоциатов устойчивых к седиментации. Этот процесс обеспечивает транзит минеральных частиц, связанных с органическим веществом болотных вод с последующей аккумуляцией в донных осадках реки (Селянина и др., 2020). Таким образом, сапонит оказывает влияние на снижение буферной способности болот-полей фильтрации за счет изменения сорбционной способности торфа, в результате чего, недостаточно очищенные сбрасываемые воды могут поступать в русло реки и оказывать негативное влияние на экологическое состояние водных экосистем реки Золотицы. В тоже время река Золотица относится к высшей категории водных объектов рыбохозяйственного значения, поскольку является крупным в бассейне Белого моря нерестилищем семги – атлантического лосося (*Salmo salar*) (Калюжин, 2003). В среднем течении реки Золотицы расположен крупный Приморский государственный природный ландшафтный заказник, основными охраняемыми природными объектами которого являются старовозрастные леса и семужье-нерестовые реки. В нижнем течении реки, на северной границе заказника, расположены традиционные поморские деревни, для которых река является основным источником воды и промысла рыбы (Селянина и др., 2020).

Таким образом, особый природоохранный статус р. Золотицы требует сохранения экологической устойчивости водной экосистемы реки (гидрофиты, зообентос, рыбы) и снижения экологических рисков, что определяет необходимость комплексной оценки всех возможных рисков и источников загрязнения. Один из таких рисков для водной экосистемы реки Золотицы может быть связан с естественными радиоактивными элементами, поскольку было установлено, что в глубоких горизонтах трубок месторождения породы экзоконтактов

кимберлитов значительно обогащены ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th (Kiselev et al., 2018). Возможность поступления в реку сбрасываемых сапонитсодержащих вод, обогащенных



естественными радиоактивными элементами, и аккумуляция сапонита в донных осадках требуют проведения исследований на оценки влияния разработки месторождения на формирование радиогенных нагрузок для водной экосистемы р. Золотицы. Для решения этой задачи были выполнены изотопно-радиогеохимические исследования речных отложений р. Золотицы и ее притоков – как основной депонирующей среды, отражающей степень антропогенного воздействия на водную экосистему (рис. 9).

Рис. 9. Обзорная карта месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова и расположение точек опробования.

Донные осадки играют важнейшую роль в накоплении загрязняющих веществ и соответственно от степени из загрязненности зависит экологическая устойчивость всей водной экосистемы реки Золотицы, поскольку они являются субстратом для произрастания гидрофитов и местом обитания зообентоса (двустворчатые моллюски, водные личинки, малощетинковые черви), являющего основной кормовой базой семги (Завиша и др., 2020). Также выполнены исследования различных типов пород, извлекаемых из карьеров как источников радионуклидов – перекрывающие и вмещающие породы, кимберлиты. Помимо радионуклидного состава определены геохимические параметры донных отложений, поскольку сапонит, обладая высокими сорбционными свойствами, активно сорбирует содержащиеся в сбрасываемых водах металлы (Malov et al., 2023), что определяет многоаспектность проблемы загрязнения речной экосистемы, требующей использования комплекса изотопно-радиогеохимических методов.

Средние удельные активности изученных радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K для речных осадков р. Золотицы и ее притоков имеют относительно низкие значения и составляют 5.4, 9.0, 11.3, 321.6 Бк/кг, соответственно, что в целом характерно для донных осадков рек бассейна Белого моря, состоящих в основном из мелкозернистых фракций песка (Киселев и др., 2012). Однако при таких относительно низких средних активностях радионуклидов в речных отложениях показательным является пространственное распределение изотопов. Пики повышения активности радионуклидов имеют выраженную приуроченность к устьевым частям притоков р. Золотицы, что очевидно связано с выносом радионуклидов в составе мелкодисперсного материала с водосборных площадей этих притоков и накоплением их вблизи устьевых частей (рис. 10).

Наиболее высокими активностями ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th характеризуются речные осадки участка русла р. Золотицы, протянувшегося на ~3 км от северной границы горно-обогатительного комбината до поселка Тучкино (5.4). Так удельные активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th в донных осадках этого участка достигают значений 15, 29 и 37 Бк/кг соответственно, в

то время как средние удельные активности ^{137}Cs , ^{226}Ra и ^{232}Th ниже по течению составляют 3, 9 и 12 Бк/кг.

При этом заметного увеличения активности ^{40}K не обнаруживается. В связи с тем, что на данном участке русла р. Золотицы отсутствует какие либо притоки, вероятным просматривается влияние деятельности ГОКа на изменение радионуклидного состава речных осадков. Так извлекаемые из карьеров и складированные в отвалы вмещающие песчано-глинистые породы венда, представленные алевролитами, аргиллитами и песчаниками, в среднем содержат практически в два раза больше ^{226}Ra и в три раза больше ^{232}Th , чем речные осадки реки Золотицы (табл. 1).

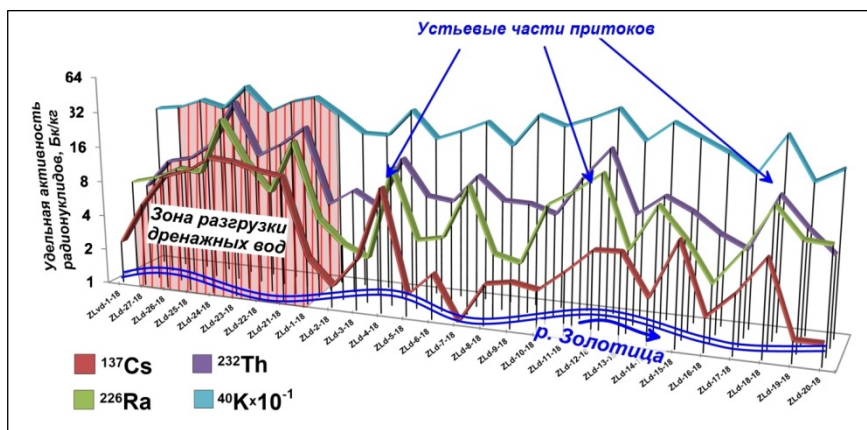


Рис. 10. Распределение удельных активностей радионуклидов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K в донных осадках р. Золотицы (красной заливкой показана зона разгрузки карьерных вод с болот-полей фильтрации).

Удельная активность ^{226}Ra в перекрывающих четвертичных породах и отложениях карбона сопоставима с активностью радия в речных осадках, однако ^{232}Th в них в два раза больше. Кимберлиты также несколько обогащены ^{226}Ra и ^{232}Th , относительно речных отложений, но обеднены ^{40}K . Для остальных типов пород средние содержания ^{40}K находятся на одном уровне ~ 300 Бк/кг. Исходя из полученных данных возможно два пути поступления радионуклидов в речную систему. Первый путь, вероятно, связан с тем, что отвалы горных пород, содержащие повышенные активности естественных радионуклидов подвержены выветриванию и размыву дождевыми и тальными водами. В результате возможен перенос радионуклидов временными потоками в р. Золотицу и накопление их в донных отложениях в ближней зоне ГОКа.

Таблица 1. Средние активности радионуклидов и параметры радиационной безопасности речных отложений и горных пород.

Тип отложений*	^{137}Cs , Бк/кг	^{226}Ra , Бк/кг	^{232}Th , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
Перекрывающие породы, Q и C ₂	-	9.2	21.0	318.0
Вмещающие породы, V ₂	-	18.2	32.7	317.5
Кимберлиты, D ₃ -C ₂	-	13.6	19.1	230.3
Речные отложения	5.4	9.0	11.3	321.6

*Q – четвертичные отложения (пески, суглинки, галечник, супеси),

C₂ – среднекаменноугольные отложения (песчаники, известняки и доломиты),

V₂ – отложения верхнего венда (алевролиты, аргиллиты и песчаники),

D₃-C₂ – кимберлиты верхнего девона-среднего карбона (автолитовая брекчия, кимберлитовый туф, туффиты).

Другим источником повышения активности радионуклидов в донных осадках р. Золотицы в ближней зоне влияния ГОКа могут служить карьерные воды, которые сбрасываются на болота-поля фильтрации, после чего поступают в русло реки. По-видимому, полной очистки откачиваемых карьерных вод в результате фильтрации через болотный массив, не происходит. При этом разгрузка болотных (фактически дренажных) вод, обогащенных естественными радионуклидами в русло р. Золотицы происходит на достаточно широком участке протяженностью около 3 км. Подтверждением этих выводов служат результаты исследования физико-химических параметров донных отложений (рис.

11). Пространственный анализ этих параметров показывает, что максимальные значения приурочены к участку разгрузки дренажных вод из болот-полей фильтрации.

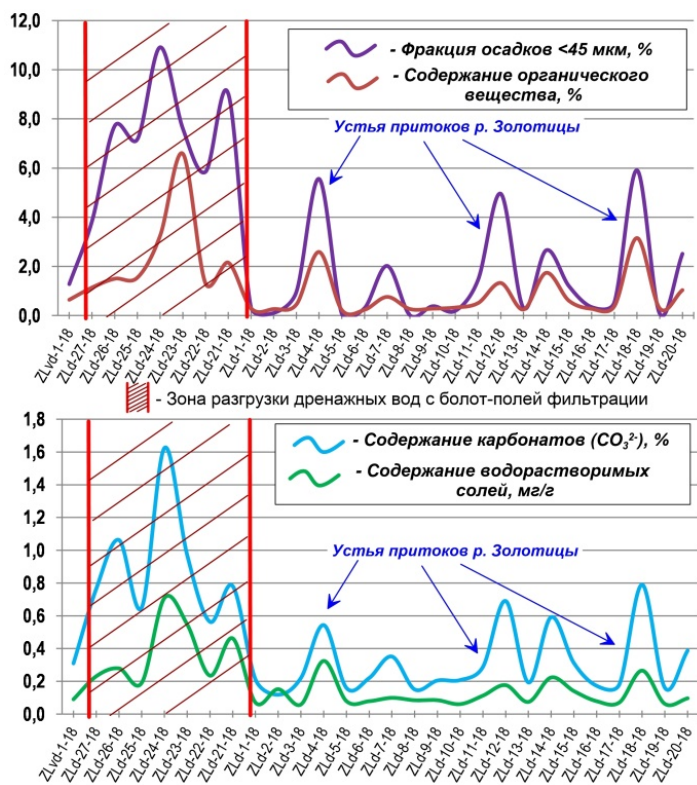


Рис. 11. Изменение содержания мелкой фракции <45 мкм, органики, карбонатов и водорастворимых солей в донных осадках р. Золотицы.

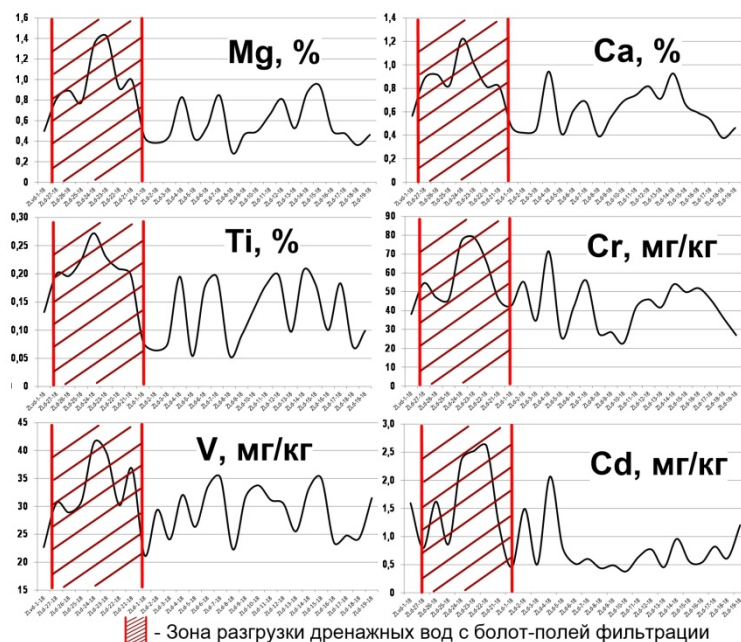
Как видно из графиков на рис. 11 разгрузка на этом участке минерализованных дренажных вод, содержащих значительные количества глинистых частиц, приводит к увеличению в донных осадках доли глинистой составляющей (фракций <45 мкм), карбонатов CO₃²⁻, водорастворимых солей, активностей естественных радионуклидов. Фильтрация дренажных вод через болотный массив также приводит к увеличению массовой доли органического вещества в донных осадках, источником которого

являются органические компоненты торфа.

Примечательным является распределение ¹³⁷Cs, которого нет ни в составе горных пород, извлекаемых из карьеров, ни откачиваемых дренажных вод. Однако в зоне разгрузки дренажных вод с полей фильтрации в реку активность ¹³⁷Cs, относительно фонового участка выше сброса, увеличивается практически в 7 раз с 2.3 Бк/кг до 14.3 Бк/кг (рис. 10). Источником ¹³⁷Cs может служить болотный массив, поскольку органические комплексы торфяных залежей верхового типа фиксируют техногенные радионуклиды глобальных выпадений (Rosern et al., 2009). Сопоставление графиков распределения удельной активности ¹³⁷Cs и содержания органического вещества в речных осадках показывает, что миграция ¹³⁷Cs происходит в составе органики. При этом в зоне разгрузки дренажных вод не происходит заметного увеличения удельной активности ⁴⁰K. Это может быть связано тем, что в процессе фильтрации минерализованных дренажных вод через болотный массив в торфяной матрице происходит замещение радиоцезия другими катионами металлов (в том числе калия), которые в избытке присутствуют в дренажных водах, в результате ионного обмена по схеме R-COOCs⁺ + Kt⁺ ⇌ R-COOKt⁺ + Cs⁺. При этом удельная активность ¹³⁷Cs в верхнем 20 см слое верхового торфа в районе месторождения варьирует в диапазоне от 25 до 111 Бк/кг, составляя в среднем ~ 57 Бк/кг.

Также миграция ¹³⁷Cs может происходить в составе, образующихся при взаимодействии сапонитсодержащих дренажных вод с богатыми органикой болотными водами (в которых также присутствует ¹³⁷Cs), органоминеральных ассоциатов устойчивых к седиментации, что приводит к снижению буферной способности полей фильтрации. Как было показано в главе 3, верховые торфяники Западного сектора Российской Арктики являются основными концентраторами техногенной радиоактивности, поступившей на поверхность земли в результате атмосферных выпадений и это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании полей фильтрации, поскольку мобилизация ¹³⁷Cs из торфяной залежи из-за воздействия сапонитсодержащих дренажных вод может значительно повысить радиационные нагрузки на водную биоту.

Разработка месторождения также отражается на трансформации геохимического фона речных осадков в р. Золотица. Результаты геохимических исследований показывают, что речные осадки оказываются несколько обогащены типичными сопутствующими элементами кимберлитовых пород месторождения – Cr, Ni, V, Co, Ba, V, Mg. Пространственный характер распределения металлов в речных отложениях в целом схож с характером распределения радионуклидов – максимальные концентрации приурочены к зоне разгрузки



дренажных вод с болот-полей фильтрации. Наиболее характерным является распределение в речных осадках Mg (рис. 12), который является основным минералообразующим элементом сапонита (Посухова и др., 2013), что очевидно указывает на наибольшее поступление Mg и других металлов в русло р. Золотицы в составе сапонитсодержащих карьерных вод, недостаточно очищенных на полях фильтрации.

Рис. 12. Изменение содержания металлов в речных отложениях р. Золотицы.

Высокие сорбционные свойства сапонита, способствуют активной сорбции растворенных в сбрасываемых водах металлов (Malov et al., 2023), и накоплению их в донных осадках. Таким образом, помимо увеличения активностей радионуклидов в водной экосистеме деятельность ГОКа отражается на трансформации геохимического фона речных осадков в районе месторождения, что требует оценки токсикологических последствий для водной биоты.

Расчет индексов токсического биологического эффекта от загрязнения тяжелыми металлами согласно (Long et al., 1995; MacDonald et al., 2000) показал, что наибольший вклад в экотоксичность речной экосистемы вносят Cr и Ni, являющиеся основными сопутствующими элементами кимберлитовых пород, что требует контроля за уровнями их накопления в донных осадках р. Золотицы. Радиоэкологические риски от естественных радионуклидов в настоящее время можно считать низкими, поскольку значения удельной эффективной активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K (Аэфф) в речных осадках существенно ниже 370 Бк/кг (НРБ-99/2009). В тоже время вызывает опасение миграция техногенного ^{137}Cs – основного дозообразующего техногенного радионуклида с болот-полей фильтрации в р. Золотицу, что требует дальнейшего контроля за уровнем накопления ^{137}Cs в донных осадках. Среди радиоактивных элементов определенную токсикологическую опасность для водной биоты района месторождения им. М.В. Ломоносова может представлять уран, фоновая концентрация которого в речной воде р. Золотицы до сброса дренажных вод составляет 0.61 мкг/л, а после разгрузки с болот-полей фильтрации достигает 1.16 мкг/л. Концентрация U в подземных водах водопонижительных скважин варьирует от 0.13 до 18.5 мкг/л. При общем дебите скважин около 5000 м³/ч и расходе реки в межень 10000 м³/ч смешение дренажных вод с речной водой может происходить в соотношении 1:2 (Шкиль и др., 2016; Малов, 2018), что вполне очевидно влияет на резкое повышение концентрации U в р. Золотице. Наиболее чувствительными к U являются донные беспозвоночные (зообентос), для которых хронические токсические эффекты могут проявляться уже при концентрациях урана от 0.5 мкг/л (Goulet et al., 2011). Учитывая, что зообентос (двустворчатые моллюски, водные личинки, малощетинковые черви) является основной кормовой базой для семги (Завиша и др., 2005), которая после выклева из икры может жить в реке до 5 лет (Студенов, 2005),

оценка накопления урана в речной экосистеме для определения его воздействия на рыб через пищевые цепи требует дополнительных исследований. То же касается оценки миграции по пищевым цепям тяжелых металлов. Требуется оценка и влияние на токсикологическую реакцию гидробионтов, видовой состав которых после начала разработки также претерпел изменения (Селянина и др., 2020).

Обнаруженные закономерности повышенного концентрирования радиоактивных элементов, а также ряда тяжелых металлов в донных отложениях р. Золотицы, связанные с деятельностью ГОКа, могут иметь тенденцию к увеличению концентраций при расширении объемов добычи (углубление карьеров, разработка новых трубков, увеличение технологических площадей под отвалы и хвостохранилища и т.д.), что в свою очередь усилит радиогенные и токсикологические нагрузки на водные экосистемы. Установлено, что основная проблема загрязнения речной связана с попаданием в русло реки не полностью очищенных дренажных вод, обусловленных снижением буферной способности болот-полей фильтрации из-за взаимодействия обогащенных сапонитом карьерных вод с болотной водой (раскисление, образование устойчивых к седиментации органо-минеральных ассоциатов). Снижение буферной емкости болот-полей фильтрации надежно диагностируется по изменению радиоизотопных, физико-химических и геохимических параметров речных отложений в зоне разгрузки вод с полей фильтрации в реку. Увеличение в донных осадках активности ^{137}Cs диагностирует о процессе мобилизации из торфяной залежи этого техногенного радионуклида под воздействием сбрасываемых вод. Предполагается, что в будущем с увеличением объемов сбрасываемых вод буферная способность полей фильтрации еще больше снизится.

Таким образом, данный подход по оценке экологического состояния районов горнотехнической деятельности с использованием изотопно-радиогеохимических методов может быть масштабирован на другие районы добычи твердых полезных ископаемых в Западном секторе российской Арктики, месторождения которых ассоциированы с ураном и торием содержащими минералами или имеют фоновые содержания естественных радиоактивных элементов.

Третье защищаемое положение: *радиоактивные изотопы уранового ряда ^{238}U отражают процессы деградации многолетней мерзлоты и могут быть использованы в качестве трассеров при исследовании состояния криолитозоны и оценки радиационного качества подземных вод.*

Известно, что в связи с деградацией мерзлоты, обусловленной глобальным потеплением климата, происходит эмиссия в атмосферу значительных объемов парниковых газов C , CO_2 , CH_4 , N_2O (IPCC, 2023). В то же время вопрос возможной интенсификации выхода радиоактивных газов, таких как радон – основного дозообразующего радионуклида естественного происхождения, в случае оттаивания верхней части геологического разреза остается открытым (Puchkov, Yakovlev, 2022; Zhang et al., 2024). В пределах Западного сектора Российской Арктики районы, относящиеся к зоне повышенной потенциальной радоноопасности, занимают значительные площади (Максимовский и др., 1997, рис. 13).

Однако в настоящее время, объемная активность радона в воздухе жилых помещений является низкой и, например, в для Ненецкого автономного округа (НАО) составляет около 10 Бк/м^3 (Романович и др., 2018). При этом большая часть этих районов согласно карте прогноза изменения криолитозоны, уже к 2050 году может освободиться от мерзлоты. Моделирование поведения радона в случае оттаивания многолетнемерзлых пород, выполненное для условий канадской Арктики (Glover, Blouin, 2022) показало, что при мощности мерзлоты в 13 м и средней активности ^{226}Ra в породах 39 Бк/кг , мерзлота снижает концентрацию радона в зоне сезонно-талого слоя на 80–90% до $4\text{--}8 \text{ Бк/м}^3$. При этом объемная активность ^{222}Rn в подмерзлотном слое возрастает в десятки раз. Таким образом, мерзлота является эффективным барьером для радона. Однако в случае условно залпового оттаивания мерзлых пород при модельной объемной активности радона внутри помещения

5-10 Бк/м³, активность ²²²Rn уже через 1.5 года внутри помещения увеличится до 200 Бк/м³ в основном за счет диффузионного переноса (Glover, Blouin, 2022), что является пороговым значением для эксплуатируемых жилых и общественных зданий согласно НРБ-99/2009. В свою очередь увеличение выбросов радона, вероятно, также приведет к росту активностей его дочерних продуктов распада ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, которые имеют для человека и биоты высокую радиотоксичность за счет внутреннего облучения (Тихонов, Рылов, 2011).

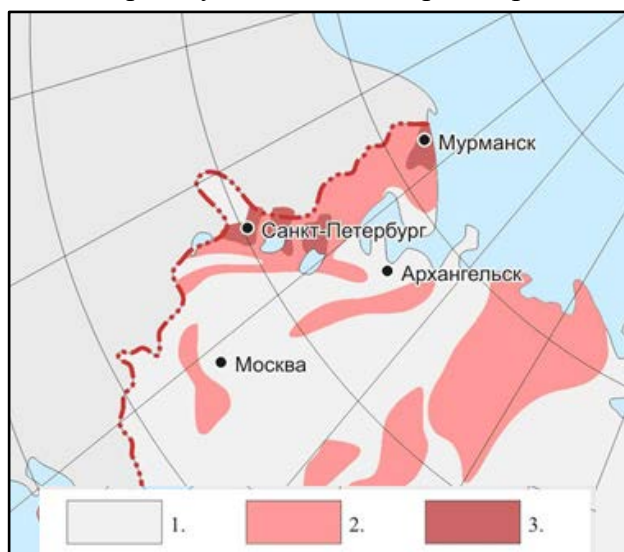
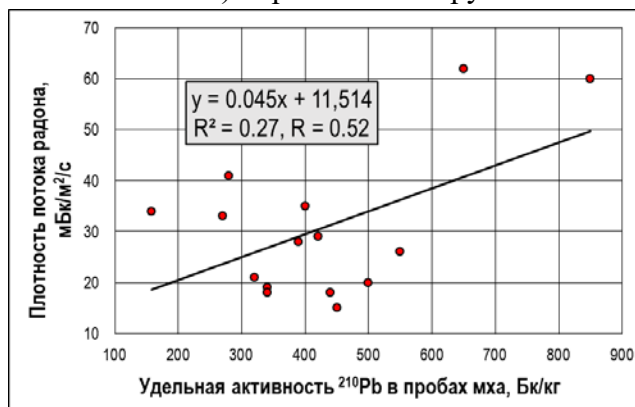


Рис. 13. Фрагмент карты радоноопасности территории Российской Федерации (Максимовский и др., 1997): 1 – территории с низким потенциалом радоноопасности, 2 – территории потенциального риска, 3 – районы широкого развития радонопродуцирующих геологических комплексов (наибольшего риска радоноопасности).

Данные по увеличению плотности потока и активности продуктов распада радона в почвах и растительности были получены в ходе полевых исследований на Приполярном Урале (Республика Коми, Интинский район) в зоне развития горной мерзлоты. Как правило, при опробовании небольших площадок (например, болото), в верхних слоях почв и одинаковых видах растительности (сфагновый мох) активность ²¹⁰Pb по площади изменяется незначительно, поскольку в основном связана с потоком ²¹⁰Pb из атмосферы (Yakovlev et al., 2023). Однако было обнаружено, что на участках, характеризующихся по данным георадарной съемки контрастным изменением мерзлотных условий (увеличение мощности и осушение верхней части сезонно-талого слоя), наблюдаются максимальные значения плотности потока радона и значительный диапазон вариаций активности ²¹⁰Pb в верхнем слое почв и растительности (до 62 мБк/м²/с и 850 Бк/кг, соответственно). При этом обнаруживается наличие корреляционной связи на уровне R=0.52



между плотностью потока радона и удельной активностью ²¹⁰Pb в пробах мха (рис. 14).

Рис. 14. График зависимости плотности потока радона с поверхности болота и удельной активности ²¹⁰Pb в пробах мха.

Полученные данные косвенно свидетельствуют о том, что на участках, где мерзлота деградировала более интенсивно, радон активнее мигрирует к поверхности земли, с накоплением продуктов распада, таких как ²¹⁰Pb, в почвенно-растительном покрове. Подобная картина наблюдалась и в западной части Ненецкого АО в пределах Канинской тундры, где для участка верхового болота близ русла реки Несь, которая оказывает отепляющее влияние на разрез, была выявлена сильная корреляционная связь R = 0.90 между плотностью потока радона и глубиной протаивания сезонно-талого слоя, измеренной прямым методом с помощью термощупа (Пучков, Яковлев, 2023). Модельные исследования влияния изменения мерзлотных условий на высвобождение (поток) ²²²Rn были проведены на примере экспериментальной площадки с заданными радиационно-физическими параметрами имитирующей строение верхнего разреза криолитозоны (сезонно-талый слой, многолетнемерзлые породы), на которой в течение 5

месяцев непрерывно проводили измерение плотности потока радона (Пучков и др., 2023). Экспериментальные работы показали, что в мерзлом состоянии грунта диффузионная подвижность радона сильно ограничена в присутствии льда (коэффициент эманирования около 1 %). Однако при полном оттаивании мерзлых пород активность радона в реальных условиях увеличивается в 6-8 раз, моделирование (расчетные значения) показывает увеличение в 20 раз и активность до 43000 Бк/м³. Это подтверждает то, что деградация мерзлых пород в регионах Западного Сектора Российской Арктики может привести к значительному увеличению потока радона, что потребует изменения существующих подходов к оценке радоноопасности территорий. В свою очередь увеличение потока ²²²Rn при оттаивании многолетнемерзлых пород может привести к изменению параметров естественного радиационного фона на поверхности земли за счет накопления продуктов распада.

Помимо возрастания активности радона и продуктов его распада в связи с деградацией мерзлоты, глобальное потепление, вызывающее масштабные климатические изменения, может также привести к возрастанию активностей изотопов урана в поверхностных и подземных водах Западного сектора Российской Арктики, что отражается в изменении отношения изотопного состава ²³⁴U/²³⁸U в природных водах. В ряде регионов изотопы урана являются основными радионуклидами, которые определяют радиационное качество подземных вод (Nordberg et al., 2007; Keith et al., 2013; Sofield, Kantar, 2013; Silva, Bonotto, 2015; Thang et al., 2022; Vengosh et al., 2022). В изотопной смеси природного урана изотоп ²³⁴U по массе занимает всего 0.0054 %, но поскольку ²³⁴U является продуктом распада урана-238 (99.27 % в изотопной смеси) с более коротким периодом полураспада ($T_{1/2} \text{ } ^{234}\text{U} = 245$ тыс. лет, $T_{1/2} \text{ } ^{238}\text{U} = 4.47$ млрд. лет), то его активность такая же, как и у родительского нуклида (Чердынцев, 1969). Это свойство имеет важнейшее значение в радиологических исследованиях природных вод, поскольку в данном случае активность природного урана удваивается (Киселев, 1999). Радиационное воздействие ядра отдачи и химическое растворение пород приводит к небольшому обогащению природных вод ²³⁴U, что впервые обнаружили В.В. Чердынцев и П.И. Чалов (Чалов, 1975). В результате радиационных и химических взаимодействий в системе «вода-порода» типичный диапазон вариаций отношения ²³⁴U/²³⁸U в подземных водах составляет 1.2-2.5 (Киселев, 2005; Бахур, 2008). Исходя из этого, прогнозируемая предельная удельная активность ²³⁴U может превышать активность ²³⁸U не более чем в 2.5 раза. В связи с этим высказываются предложения по отказу от дорогостоящего определения активностей отдельных изотопов урана, ограничиваясь измерением общей концентрации урана (фактически ²³⁸U, если его активность не превышает 0.7 Бк/л), по которой можно оценить активность изотопа ²³⁴U (Кадука и др., 2018). Однако обнаруживаются подземные воды с избытками ²³⁴U относительно родительского нуклида ²³⁸U более 50 (Поляков, 1991; Osmond, Ivanovich, 1992; Bonotto, 1999; Suksi et al., 2006; Токарев, 2008; Petersena et al., 2013; Mejean et al., 2016; Almasoud et al., 2020), что очевидно может повлиять на ухудшение радиационного качества подземных вод в плане превышения уровня вмешательства по суммарной альфа-активности за счет изотопов урана.

При этом в формировании аномальных избытков ²³⁴U (в виде отношения ²³⁴U/²³⁸U) наблюдается примечательная географическая закономерность. Такие аномальные избытки ²³⁴U (²³⁴U/²³⁸U = 56) обнаружены в северо-западной части Восточно-Европейской платформы в зоне сочленения Русской плиты и Балтийского кристаллического массива – в Прибалтике, Карелии, Ленинградской и Архангельской областях в водоносных горизонтах венда и верхней трещиноватой части кристаллического фундамента (Поляков, 1991; Ежова и др., 1996; Малов, Киселев, 2009; Токарев, 2012; Mokrik, Samalavičius, 2022). Похожая картина характерна для глубоких водоносных горизонтов краевых частей Канадского щита в Северной Америке (Канада, северные штаты США) (Banner et al., 1990; Arndt, West, 2000; Peterman et al., 2016; Mejean et al., 2016, 2017). Сверхвысокое обогащение подземных вод изотопом ²³⁴U могло быть обусловлено глобальными климатическими изменениями позднего

плейстоцена-голоцена, связанными со становлением и деградацией покровного оледенения (Лаврентийский ледниковый щит в Северной Америке, Скандинавский – на севере Европы) и подземной мерзлоты, существовавшей на краевых частях ледников.

Влияние этих событий могло привести к аномальному обогащению подземных вод ^{234}U в результате совокупного воздействия нескольких процессов. Во-первых, со снятием ледниковой нагрузки на породы водоносных горизонтов существенно возросла их трещиноватость (Баранская и др., 2019), а интенсивность выхода ядра отдачи из пород пропорциональна площади взаимодействия в системе «вода-порода», что увеличивает в воде содержание изотопа ^{234}U (Malov, 2016). Такой механизм экспериментально показан для водоносных горизонтов Канадского щита (Mejean et al., 2017). Во-вторых, талые ледниковые воды после таяния ледниковых щитов, по мере движения к областям разгрузки расходовали кислород на химические реакции, в результате чего в глубоких водоносных горизонтах установилась восстановительная обстановка (Provost et al., 1998). В таких условиях химическое растворение урана значительно замедляется (Дутова, 2008), а распад продолжается, что приводит к накоплению ^{234}U . В-третьих, в перигляциальных условиях в связи с длительным нахождением водонасыщенных пород в мерзлом состоянии подвижность урана снижена, однако накопление продуктов распада продолжается и с оттаиванием мерзлоты происходит залповый выброс наколенного ^{234}U в воду (Поляков, 1991; Токарев, 2008; Tokarev et al., 2022). В-четвертых, обогащение подземных вод изотопом ^{234}U могло происходить в результате формирования остаточных вод при промерзании разреза, когда остаточные воды обогащаются вытесненными из льда солями (Ежова и др., 1996). Обогащение остаточной воды при частичном ее замерзании изотопом ^{234}U было экспериментально подтверждено Г.П. Киселевым (Киселев и др., 2016). В-пятых, в перигляциальной зоне в подмерзлотных водах существовала восстановительная обстановка при которой ^{238}U мог преимущественно осаждаться при восстановлении U^{6+} до U^{4+} с накоплением продуктов распада (Mokrik, Samalavičius, 2022).

Поскольку накопление ^{234}U имеет важное радиологическое значение, проверка возможности обнаружения подземных вод с аномальными значениями $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и оценка влияния избытков ^{234}U на радиационное качество подземных вод выполнена на примере водоносных горизонтов Ленинградской области и южной части Карелии. Данная территория не относится к Арктической зоне Российской Федерации, однако может быть рассмотрена как представительный пример в качестве иллюстрации гидрогеологической обстановки, сформированной под воздействием климатических вариаций позднего плейстоцена-голоцена (Tokarev et al., 2019) (рис. 15). Кроме этого, в регионе подземные воды активно эксплуатируются для целей питьевого водоснабжения и реликты криогенных вод вполне могли сохраниться за счет наличия в разрезе водоупорных отложений – вендских и кембрийских глин (Воронюк и др., 2016; Виноград и др., 2019).

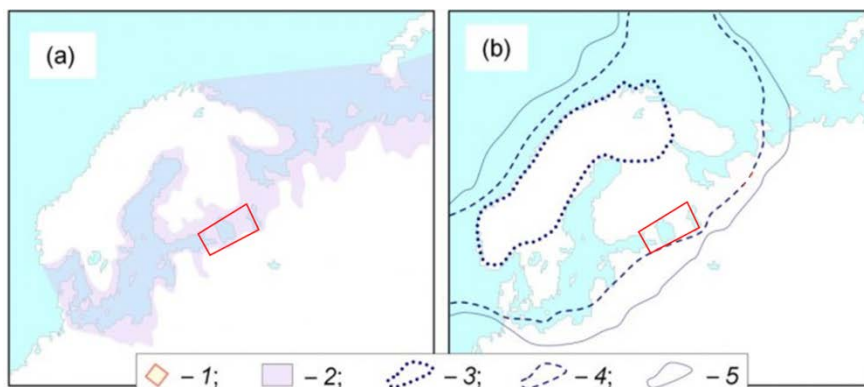


Рис. 15. Микулинское море (а) и Скандинавский ледниковый щит (б): 1 - исследуемый регион; 2 - Микулинское море 115–130 тыс. лет назад; граница ледникового покрова при трех максимумах климатического похолодания: 3 - 85, 4 - 60, 5 - 18 тыс. лет назад (Малов, 2020).

Исследования основных эксплуатируемых водоносных горизонтов показали, что в изученных подземных водах наблюдается аномальный изотопный состав урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, с избытками ^{234}U более 25. При этом вариации изотопного состава урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ имеют

отчетливую связь с химическим составом подземных вод и физико-химическими параметрами водоносных горизонтов (рис. 16).

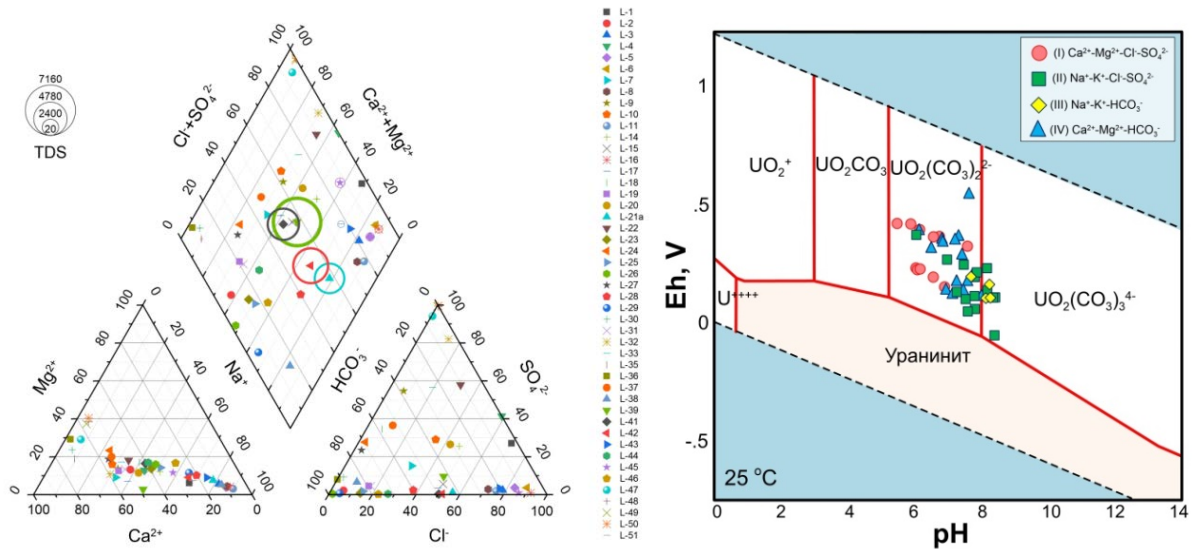


Рис. 16. Распределение химического состава (левый рисунок) и форм нахождения урана (правый рисунок) в подземных водах Ленинградской области и южной части Карелии. Гидрохимические типы подземных вод согласно диаграмме Пайпера: I – фация хлоридных натриевых вод; II – фация сульфатных кальциевых вод; III – фация вод измененных под влиянием ионного обмена кальция на натрий; IV – фация пресных гидрокарбонатных кальциевых вод.

Так, аномальные значения изотопного состава урана характерны для подземных вод глубокой циркуляции с преобладанием ионов хлора и натрия, которые приурочены к трещиноватым породам верхней части фундамента и песчано-глинистым отложения венда. Для этих вод глубоких вод наблюдается увеличение активности ²³⁴U с ростом минерализации (рис. 17). При этом по предельным избыткам ²³⁴U они разделяются на две подгруппы, что, вероятно, отражает процессы формирования подземных вод (рис. 17).

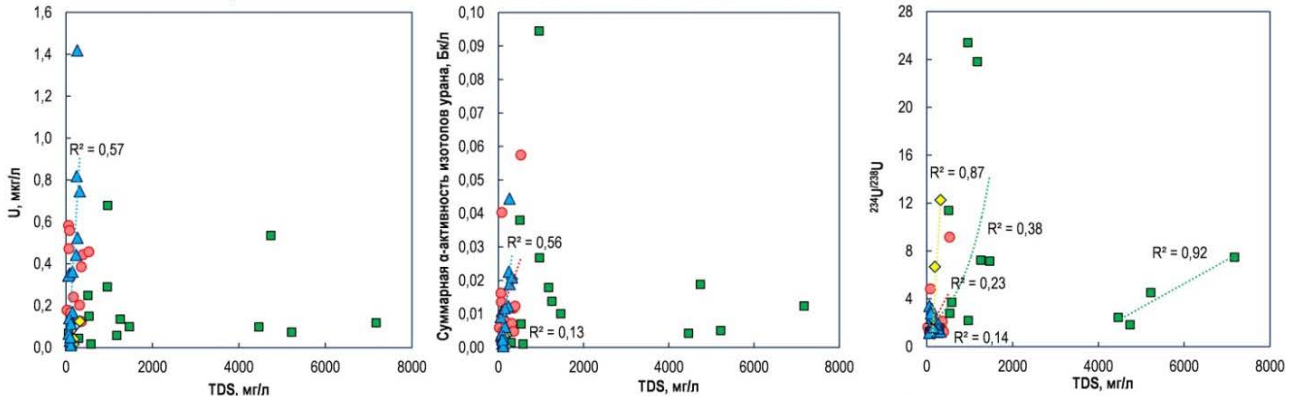


Рис. 17. Графики зависимости минерализации и радиационных параметров подземных вод Ленинградской области и южной части Карелии

Первый компонент имеет высокие значения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 25$ при относительно низкой минерализации около 1 г/л, а второй – отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 7$ и высокую минерализацию более 5-7 г/л. Вероятно, первая подгруппа глубинных вод содержит примесь компоненты образованной как в результате таяния покровного ледника, так и подземной мерзлоты, что фиксируется по легкому составу стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, отражающему формирование вод в холодных климатических условиях. Вторая подгруппа вод с высокой минерализацией – это остаточные воды, отесненные вниз по разрезу при его замораживании. В условиях этих глубоких водоносных горизонтов преобладает восстановительная обстановка (увеличение величины Eh), которая при снижении

выщелачиваемости урана способствует росту отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$. Аномальному росту активности ^{234}U также вероятно способствует и трещиноватость водоносных горизонтов, возросшая в связи со снятием ледниковой нагрузки.

Подземные воды верхнего водоносного горизонта гидрокарбонатного состава имеют наибольшую концентрацию урана, которая определяется ростом содержания кислорода, сменой восстановительной среды на окислительную (рис. 18). Изотопное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ при этом в этих водах минимальное, поскольку компенсируется повышенным выщелачиванием урана из пород. Исходя из этого для пресных гидрокарбонатных вод с минимальными избытками изотопа ^{234}U имеет место практически прямая зависимость общей альфа-активности и концентрации урана (рис. 18а).

Однако в глубинных водах такой зависимости не наблюдается, поскольку на их радиационное качество начинает влиять изотоп ^{234}U , активность которого до 25 раз выше, чем активность ^{238}U . Так, например, проба воды (L-6) из трещиноватого архей-протерозойского горизонта при крайне низкой активности изотопа $^{238}\text{U} = 0.0036$ Бк/л (0.29 мкг/л) из-за аномально высоких избытков ^{234}U ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 25.39$) имеет суммарную альфа-активность $^{234}\text{U} + ^{238}\text{U}$ около 0.1 Бк/л, что является пороговым значением норматива НРБ-99, который ранее действовал в России. Действующей в настоящее время в Российской Федерации норматив НРБ-99/2009 ограничивает уровень вмешательства по суммарной альфа-активности величиной 0.2 Бк/л. Можно предположить, что при обнаружении подземных вод с отношениями $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ более 36, уровень вмешательства по суммарной альфа-активности 0.2 Бк/л может быть превышен (рис. 18б). Такие оценки необходимо провести, поскольку воды с обнаруженным аномальными избытками ^{234}U имеют минерализацию около 1 г/л и используются для питьевого водоснабжения.

Возможность обнаружения столь высокого соотношения изотопов урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 36$ не исключена, поскольку ранее на водозаборах Эстонии были выявлены отношения 56 отн. ед. (Поляков, 1991). В связи с этим в некоторых случаях может быть некорректно из общей концентрации урана (фактически ^{238}U) рассчитывать суммарную активность его изотопов, что может не в полной мере отражать действительные радиационные характеристики подземных вод.

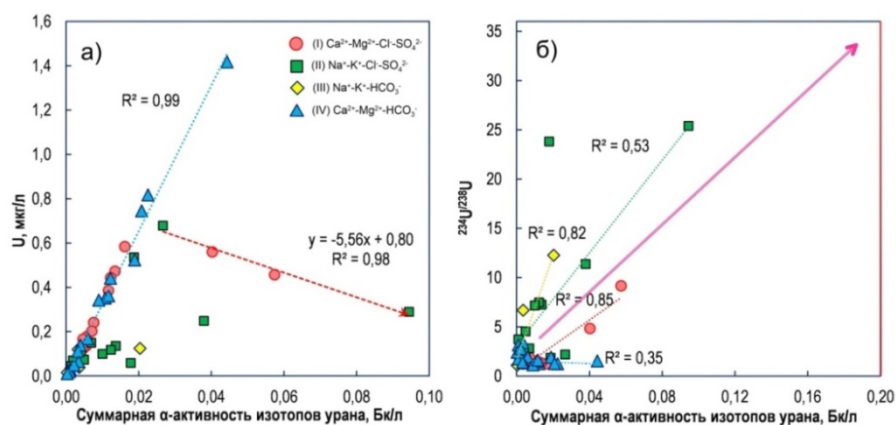


Рис. 18. Зависимость суммарной альфа-активности $^{234}\text{U} + ^{238}\text{U}$ от концентрации урана (а) и изотопного отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (б) для различных гидрохимических типов подземных вод Ленинградской области и южной части Карелии.

Гидрохимические параметры подземных вод, характерные для водоносных горизонтов районов распространения мерзлоты, могут способствовать накоплению ^{234}U в восстановительных условиях подмерзлотных водоносных горизонтов (Mokrik, Samalavičius, 2022). Однако в настоящее время данных об изотопном составе урана таких вод нет. В тоже время для района Тибетского нагорья было показано (Ma et al., 2020; Gao et al., 2023), что деградация мерзлоты, нарушая гидродинамический режим мерзлотных водоносных горизонтов, повышает интенсивность подтока подмерзлотных подземных вод, что влияет на увеличение речного стока. Очевидно, что увеличение вклада этой компоненты в речной сток должно отражаться на изменении гидрохимических параметров поверхностных вод. Так для Восточной Сибири достоверно установлено, что потепление климата ускоряет гидрогеохимические процессы в речных бассейнах занятых мерзлотой в плане увеличения

общей минерализации воды и концентраций основных ионов в поверхностных водах (Wang et al., 2024). Подобные процессы должны также наблюдаться и в пределах Западного сектора Российской Арктики, выражающиеся в трансформации гидрохимических параметров поверхностного стока крупных речных бассейнов, в первую очередь Печорского. Однако в настоящее время при увеличении общего стока р. Печоры (АМАР, 2021) изменения модулей ионного стока в целом для Печорского бассейна достоверно не выявлены (Даниленко и др., 2020). В тоже время в малых водотоках бассейна Печоры, например, в зоне формирования стока в области развития горной мерзлоты Приполярного Урала обнаруживаются повышенные для поверхностных вод отношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ до 2.59, что может быть связано с вкладом подземной компоненты. При этом вклад талых сезонных снегов в речном стоке диагностируется по закономерному снижению с набором высоты температуры, минерализации и величины рН, а также $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, окислительно-восстановительный потенциал возрастает (Яковлев и др., 2023). Подобные изменения проявлены в микроэлементном составе и содержании стабильных изотопов в притоках реки Печоры (Токарев и др., 2022; Yakovlev et al., 2023). Изотопные эффекты, наблюдаемые в компонентах континентального стока могут оказывать влияние на изотопный состав растворенного урана в арктическом бассейне и отражаться в виде накопленного $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ сигнала, что было продемонстрировано для канадской Арктики и центральной части Северного-Ледовитого океана (бассейн Макарова) (Andersen et al., 2010). При этом уран, содержащийся в речном стоке выносится в арктический бассейн практически полностью, не осаждаясь на геохимическом барьере в устьях рек (Andersen et al., 2007). Было установлено, что изотопный состав растворенного урана в Баренцевом море также значительно отличается от среднего для Мирового океана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ до 2.08) (Tokarev, Yakovlev, 2021). Повышенные значения активности ^{234}U наблюдаемые в Баренцевом море, могут быть связаны как с вкладом речного стока, так за счет субмаринной разгрузки подземных вод с аномальным изотопным составом $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, обнаруженных в Белом море (Киселев, 2005).

Таким образом, обнаруженные закономерности в реакции изотопов уранового ряда ^{238}U могут быть использованы в качестве трассеров при исследовании состояния криолитозоны, оценки радиационного качества природных вод и прогнозирования изменения радоновой обстановки в связи с деградацией многолетней мерзлоты.

Четвертое защищаемое положение: *Выявленные закономерности распределения радионуклидов уранового ряда (уран-радий-радон) в осадочном чехле областей развития кимберлитового магматизма являются дополнительными признаками для поисков структур контролирующих трубки взрыва и прогнозирования радоноопасности северных территорий.*

Исследование радионуклидов в различных компонентах природной среды в Арктике имеет не только важнейшее геоэкологическое значение, связанное с оценкой источников радиационного загрязнения и формирования радиогенных нагрузок на биоту и человека, но и геохимическое значение, направленное на понимание геологических процессов протекающих в земной коре и индикацию различных геохимических обстановок. Важнейшим направлением приложения радиогеохимических знаний является прогноз и поиски месторождений полезных ископаемых, в первую очередь нерадиоактивных (Арбузов, Рихванов, 2009).

Возможности использования радиогеохимических методов для целей поисков широкого спектра нерадиоактивных полезных ископаемых определяются закономерностями распределения естественных радиоактивных элементов в различных геохимических обстановках, обуславливающих формирование различных концентраций радиоактивных элементов и их соотношений, нарушение равновесных соотношений изотопов, что приводит к образованию радиогеохимической зональности и создает методическую основу для применения радиогеохимических методов (Титаева, 2000). Определенные перспективы радиогеохимические методы имеют для поисков алмазоносных кимберлитов, что было показано на примере кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции (Конторович,

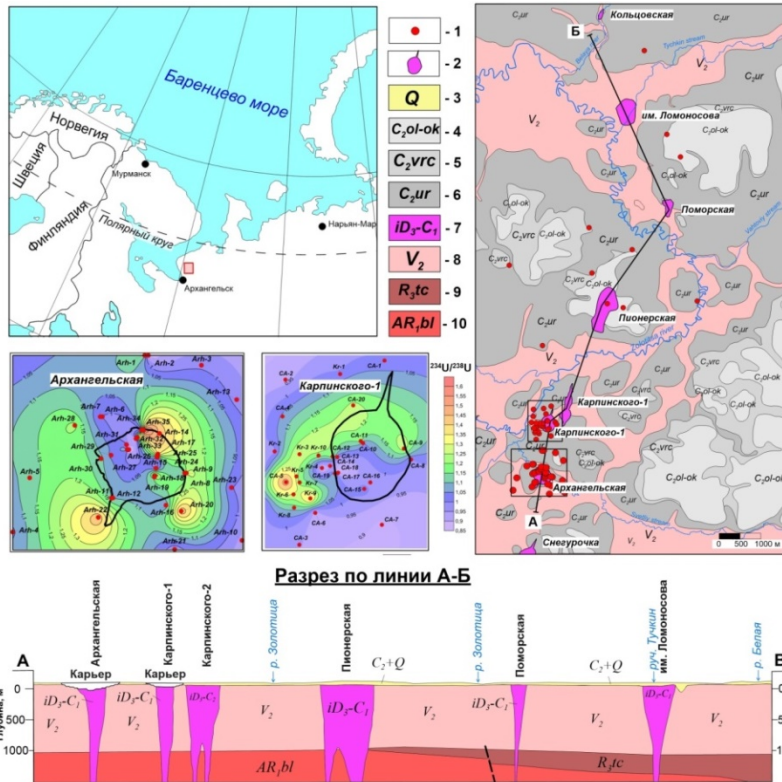
1997), а также для ряда других алмазных месторождений различных регионов мира (McDowall, Koketso, 1991; Versteeg, Paterson, 1997; Elliot et al., 1998; Mwenifumbo, Kjarsgaard, 1999; Cordani et al., 2010; Ramadass et al., 2015; Khati, Matabane, 2019; Fadeyi et al., 2021; Silva, 2024). Особую актуальность развитие новых методов поисков алмазоносных кимберлитов имеет для Западного сектора Российской Арктики, поскольку к настоящему времени, в применении традиционных методов прогноза и поисков месторождений алмазов на территории Архангельской алмазоносной провинции (ААП) наметился определенный кризис (Добыча алмазов..., 2023; Перспективные...2023). Были попытки выделения методом наземной гамма-спектрометрии вторичных радиогеохимических ореолов в качестве поисковых признаков кимберлитов ААП (Киселев и др., 2013). Опытные-методические работы, проведенные на ряде кимберлитовых полей ААП показали, что известные трубки выделяются аномалиями гамма-поля – ореолами повышенных концентраций тория и калия, в то время как в поле урана трубки проявлены слабо, что позволяет в качестве отличительного критерия радиогеохимических ореолов трубок использовать Th/U отношение (Киселев и др., 2016). В тоже время, несмотря на показательные примеры, связанные с формированием радиогеохимических ореолов от уже известных трубок, которые также контрастно проявлены в других геофизических полях, значительное количество обнаруживаемых ложных гамма-спектрометрических аномалий и мощный чехол перекрывающих отложений крайне осложняют интерпретацию радиогеохимических данных (Киселев и др., 2016; Yakovlev, 2019). Эти же причины осложняют использование других, более традиционных геофизических методов поисков кимберлитов (Коротков, 2011).

В связи с этим в настоящее время, по мнению ряда исследователей, наиболее перспективным представляется использование нетрадиционных методов поисков скрытых рудовмещающих и рудоконтролирующих структур (Андросов и др., 2004; Бушков, 2006; Вержак и др., 2008; Гладков и др., 2008; Васильев, 2010; Коротков, 2011). Выделение и исследование подобных структур традиционными геофизическими методами зачастую не приносит положительного результата в связи с закрытостью территории и слабой проявленностью рудоконтролирующих разломов в физических полях (Игнатов и др., 2008). Важнейшее значение при этом приобретает выделение признаков разломной тектоники и околорудных изменений горных пород, а также связанных с ними изотопно-геохимических и вещественных изменений непосредственно в разрезах поисковых скважин. (Игнатов и др., 2011). Во вмещающих кимберлиты породах венда Золотицкого поля установлены локальные тектонические элементы, вещественные изменения пород, геохимические аномалии, специфические минеральные ассоциации, вариации стабильных и радиоактивных изотопов, указывающие на околорудное пространство и маркирующие рудоконтролирующие структуры (Игнатов и др., 2009; Игнатов, 2010; Вержак и др., 2008; Зарипов, 2014). Поиск таких признаков кимберлитового магматизма в разрезах поисковых скважин со структурными построениями позволяет выделять перспективные участки на обнаружение кимберлитов (Игнатов и др., 2008, 2012; Новиков и др., 2009; Васильев, 2010). Учитывая негативное влияние геологических факторов на эффективность поисков кимберлитов, перспективным направлением в развитии поисковых методов на территории ААП выступает выделение кимберлитоконтролирующих структур и выявление вещественных, тектонических и изотопно-геохимических признаков околотрубного пространства в разрезах поисковых скважин. В связи с этим, задачей данного исследования выступала необходимость ответа на вопрос, каким образом воздействие кимберлитов на вмещающие породы отражается на изменении активности и соотношения радиоактивных изотопов и как следствие формирование изотопно-радиогеохимических признаков в экзоконтактах кимберлитовых трубок. Выполненные ранее исследования на территории ААП показали существование предпосылок изучения изотопно-радиогеохимических признаков рудоконтролирующих структур, которые могут выделяться по изотопам уранового ряда (Утузикова, Киселев, 2011; Киселев и др., 2013).

Изотопы урана ^{234}U и ^{238}U в породах кимберлитового поля.

Для всех типов горных пород возрастом более 1 млн лет изотопное отношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ равно 1, поэтому изменение этой величины, связанное с концентрированием или выщелачиванием дочернего изотопа ^{234}U , является индикатором геохимической активности геологической среды (Чалов и др., 1990; Киселев, 1999; Тихонов, 2009). Формирование ореолов неравновесного урана во вмещающих породах и рудах было обнаружено для ряда полиметаллических и ртутно-сурьмяных месторождений Средней Азии (Киселев, 1999). В пределах кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции также было установлено, что во вмещающих кимберлиты породах наблюдаются избытки ^{234}U , приуроченные к разломам и трещиноватым зонам, связанные с осаждением урана из подземных вод (Зверев и др., 1979; Киселев, 2005).

В рамках данной работы был изучен изотопный состав урана в кернах поисковых и разведочных скважин, а также в пробах из карьеров трубок Карпинского-1 и Архангельская Золотицкого кимберлитового поля, входящих в состав месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (рис. 19). Получены данные изотопного состава урана по разрезу разновозрастных отложений Золотицкого поля, представленные кимберлитами верхнего девона-среднего карбона D_3-C_2 , вмещающими кимберлиты песчано-глинистыми отложениями венда V_2 (алевролиты, аргиллиты и песчаники), перекрывающими



среднекаменноугольными C_2 (песчаники, известняки и доломиты) и четвертичными породами Q (пески, суглинки, галечник, супеси). В общей сложности проанализировано 140 проб.

Рис. 19. Схема геологического строения Золотицкого кимберлитового поля и точки опробования на изотопный состав урана и ореол с повышенным отношением $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в карьерах трубок Архангельская и Карпинского-1.

Так перекрывающих отложениях и вмещающих породах удаленных от трубок взрыва и в которых отсутствуют признаки кимберлитового магматизма,

обогащение изотопом ^{234}U не наблюдается, за исключением отдельных случаев, вероятно обусловленных локальными геохимическими обстановками, характерными для конкретного глубинного интервала, либо для специфических обстановок в приповерхностных условиях. В целом в перекрывающих кимберлиты четвертичных и каменноугольных отложениях и вмещающих трубки породы венда средние значения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ варьируют в диапазоне 0.92 – 0.94. В кимберлитах жерловой фации, представленных автолитовой брекчией сохраняется равновесный изотопный состав урана $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.00$. В большинстве образцов из околотрубочного пространства, представленных отложениями верхнего венда и периферийными частями кратерных фаций трубок установлены избытки дочернего изотопа ^{234}U составляющие в среднем 1.24, которые в пределе достигают значений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 3.57$. Наиболее контрастные аномалии $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ наблюдаются при опробовании в карьерах трубок Архангельская и Карпинского-1 (рис. 19).

Формирование высоких значений $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, вероятно, обусловлено геологическим строением околотрубочного пространства, поскольку хорошо согласуется с данными по тектоническим и вещественным изменениям, установленных рядом авторов (Новиков и др., 2009; Васильев, 2010; Игнатов и др., 2015, Зарипов, 2017). Развитие зон трещиноватости, ограничивающих трубки, по всей видимости, приводит к проникновению инфильтрационных вод в водоносные горизонты вендских отложений и изменению гидрохимического режима подземных вод, в результате которого происходит осаждение урана с избытками подвижного изотопа ^{234}U (Kiselev et al., 2018).

Возможность осаждения из подземных вод урана с избытками ^{234}U в зонах трещиноватости околотрубочного пространства подтверждено экспериментальными исследованиями по определению форм нахождения урана, выполненных методом селективного растворения (Malov et al., 2021). В результате последовательного выщелачивания вмещающих вендских пород по методике Yanaze (1991) выделены различные урансодержащие минеральные фазы. Установлено, что основная концентрация урана связана с осаждением из подземных вод в форме ферригидрита, аморфных минералов железа и в составе карбонатных минералов в которых уран находится в резко неравновесном состоянии. При этом минералого-геохимические исследования методом цифровой радиографии также показали, что уран во вмещающих породах не образует собственных минеральных фаз и находится в изученных породах преимущественно в рассеянном состоянии (Тарасов, 2021).

Таким образом, накопление урана с избытками ^{234}U в околотрубочном пространстве кимберлитов, по всей видимости, связано с осаждением из подземных вод в результате преимущественной сорбции уранил иона (UO_2^+) оксидами железа на отрицательно заряженных поверхностях глинистых минералов (сапонита), которыми обогащены экзоконтакты кимберлитов. Сравнение содержаний урана и тория, измеренных методом рентгенофлуоресцентного анализа показало (Тарасов, 2021), что не смотря на невысокую чувствительность данного метода в области низких концентраций, условно можно выделить две группы урана: первая группа – терригенный уран, генетически связанный с породами, где Th/U отношение составляет ~ 4.3 (Смыслов и др., 1974), и, вторая группа, где у Th и U наблюдается обратная зависимость, что говорит о том, что этот уран, вероятно, является наложенным при гипергенных процессах, формирование которого связано с осаждением из подземных вод.

Объемная активность радона ^{222}Rn .

Радон, являясь газообразным продуктом распада в цепочке урана-238, ввиду своих физических и химических свойств выступает оптимальным индикатором для изучения многих процессов, происходящих в окружающей среде, в том числе и в геологической (Baskaran, 2016). Связано это с тем, что радон в свободном состоянии за счет эманирования горных пород проявляет способность легко мигрировать в геологической среде в газовой фазе или растворенным в поровых водах, формируя радоновое поле с проявлением эманационных аномалий в приповерхностных горизонтах горных пород, грунтов и почв. Анализ эманационного поля имеет важнейшее значение при геохимических, геофизических и геодинамических исследованиях (Бобров, 2008; Микляев, 2015; Baskaran, 2016; Selvam et al., 2021; Peel et al., 2023), а также при поисках месторождений полезных ископаемых, в том числе нерадиоактивных, таких как кимберлиты (Kiselev et al., 2017). Эманационная съемка традиционно считается методом, позволяющим выявлять разломы, скрытые под наносами, но проницаемые в настоящее время для подземных газов (Neznal et al., 1991, 1996; Семинский, Бобров, 2009). Ввиду достаточно большого времени распада радона, эманационный метод наиболее эффективен при картировании внутренней структуры разломов, определении ширины зон трещиноватости, оценки степени геодинамической активности разломов (Бобров, 2008). Возможность использования эманационной съемки для выделения кимберлитовых тел потенциально обусловлена двумя факторами. Во-первых, кимберлитовые тела контролируются разломами (Милашев, 1984; Кутинов, Чистова, 2004).

Во-вторых, в околотрубочном пространстве кимберлитовых тел обычно расположены трещиноватые зоны. Эта трещиноватость образовалась в результате значительного механического воздействия внедряющихся газов и расплавов на вмещающие породы в процессе образования диатрем (Никитин, 1980; Милашев, 1984; Хазанович-Вульф, 2007). Результатом этого является система радиальных и концентрических трещин в околотрубочном пространстве трубок с дроблением и смещением по вертикали блоков вмещающих пород. Наибольшую площадь тектонических нарушений имеют незэродированные или слабоэродированные трубки, а по мере увеличения глубины эрозионного среза трещиноватость вокруг них уменьшается (Хазанович-Вульф, 2007). Развитие разломных зон и повышенной трещиноватости создает условия переноса радона в массиве вмещающих пород. Подобные тектонические признаки в виде разломных нарушений и трещиноватости отчетливо фиксируются на трубках Золотицкого кимберлитового поля Архангельской алмазоносной провинции, как в карьерах, так и кернах разведочных скважин (Игнатов и др., 2012).

В ходе проведенных в рамках данной работы исследований в пределах трубок Золотицкого, Чидвинско-Ижмозерского и Мегорского кимберлитовых полей Архангельской алмазоносной провинции было установлено, что в почвенных горизонтах над трубками часто наблюдается аномальная объемная активность радона, превышающая в несколько раз фоновые значения. Так, для Золотицкого поля фоновая активность радона варьирует в диапазоне 91 – 664 Бк/м³ увеличиваясь над трубками в среднем от 2508 до 11519 Бк/м³ (Яковлев, 2016). Над трубкой Верхнетовская Мегорского поля значения объемной активности радона превышают 6000 Бк/м³ при фоновых активностях до 500 Бк/м³ (рис. 20). При этом максимальная активность радона наблюдается в точках, расположенных над границей разделения кратерной и жерловой частей трубки, что вероятно связано с развитием повышенной трещиноватости на границах раздела туфогенно-осадочных и жерловых отложений (Danilov, Yakovlev, 2023).

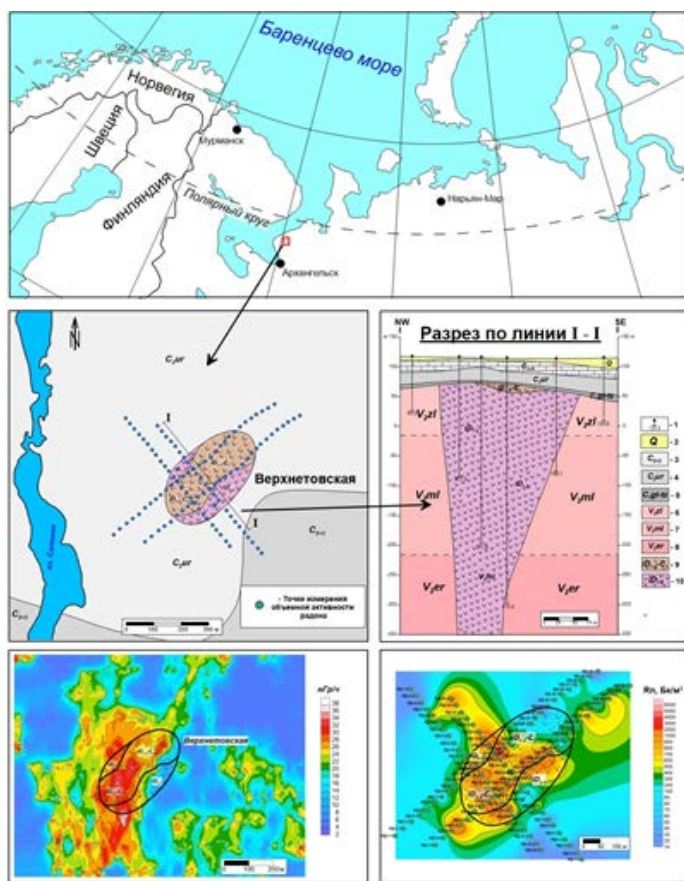
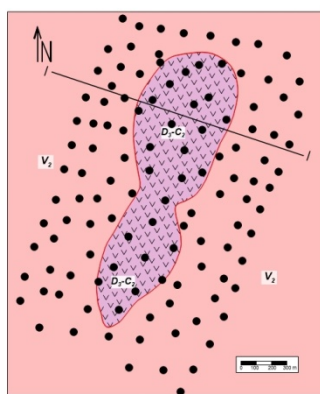
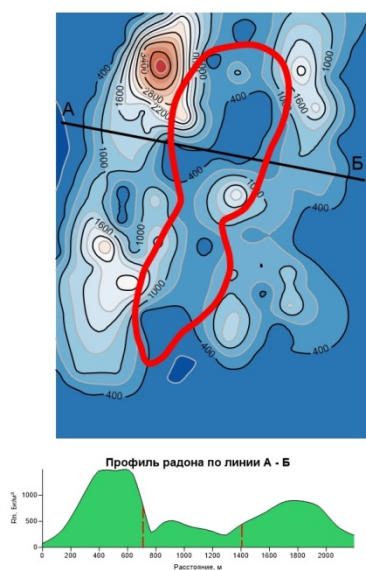


Рис. 20. Схема геологического строения трубки Верхнетовская Мегорского поля (по Попов, 1988) и распределение мощности дозы гамма-излучения и объемной активности радона.

В ряде случаев обнаруживается тенденция формирования контрастных радоновых аномалий приуроченных к околотрубочному пространству кимберлитовых тел (Kiselev et al., 2018). Наиболее выражено это проявляется для трубки Чидвинская Чидвинско-Ижмозерского поля (Yakovlev, Puchkov, 2021), что вероятно связано с тем, что среди трубок Архангельской алмазоносной провинции она имеет наименьшую мощность перекрывающих отложений (рис. 21).

Поскольку в околотрубочном пространстве кимберлитов Золотицкого поля обнаруживаются повышенные активности ²²⁶Ra(U) (Kiselev et al., 2017), можно предположить, что именно породы экзоконтактов трубок будут продуцировать наибольшее количество радона.

Для установления механизмов формирования наблюдаемой активности радона в лабораторных условиях выполнены экспериментальные работы по определению основных радиационно-физических параметров, влияющих на продуцирование радона, в основных



типах пород кимберлитового поля – кимберлиты жерловой фации, туфогенно-осадочные породы кратера, вмещающие и перекрывающие отложения на примере трубки Архангельская (табл. 2).

Рис. 21. Распределение объемной активности радона в районе трубки Чидвинская Чидвинско-Ижмозерского поля

Результаты экспериментальных исследований показали, что среди изученных типов пород наибольшее количество радона в свободном

состоянии продуцируют породы околотрубочного пространства, представленными вмещающими вендскими отложениями 63.88 Бк/(м³·ч), а также туфогенно-осадочные породы кратера трубки 75.39 Бк/(м³·ч), характеризующиеся высокими значениями коэффициента эманации, активности радия и пористости.

Таблица 2. Результаты определения радиационных параметров в основных типах пород кимберлитового поля (пробы из карьера трубки Архангельская)

Тип пород	Удельная активность ²²⁶ Ra, Бк/кг	Коэффициент эманации, %	Уровень продуцирования радона, Бк/(м ³ ·ч)
Перекрывающие породы, C ₂ и Q (n=5)	<u>*15.88–30.21</u> 22.19	<u>11.09–24.91</u> 17.41	<u>38.88–59.12</u> 52.47
Вмещающие породы, V ₂ (n=15)	<u>16.05–63.32</u> 35.52	<u>6.19–29.13</u> 13.94	<u>37.19–132.03</u> 63.88
Туфогенно-осадочные породы кратера, iD ₃ -C ₂ (n=5)	11.45–48.4 28.81	<u>9.82–34.13</u> 22.34	<u>33.97–139.57</u> 75.39
Кимберлиты жерла, iD ₃ -C ₂ (n=5)	12.42–31.46 17.59	<u>1.76–10.67</u> 7.14	<u>9.84–18.96</u> 16.15

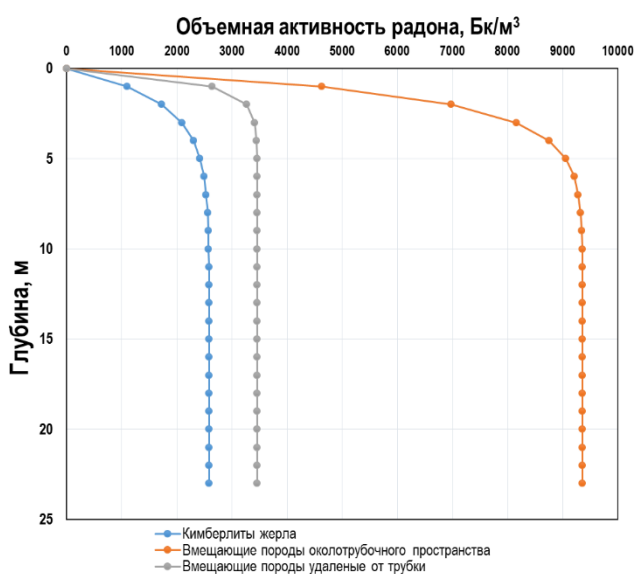
*в числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее.

Результаты экспериментальных исследований показали, что среди изученных типов пород наибольшее количество радона в свободном состоянии продуцируют породы околотрубочного пространства, представленными вмещающими вендскими отложениями 63.88 Бк/(м³·ч), а также туфогенно-осадочные породы кратера трубки 75.39 Бк/(м³·ч), характеризующиеся высокими значениями коэффициента эманации, активности радия и пористости. Кимберлиты жерла, представленные автолитовой брекчией, закономерно продуцируют минимальное количество радона 16.15 Бк/(м³·ч), что более чем в три раза меньше других типов пород. Исходя из экспериментальных данных основным источником радона, наблюдаемого в почвенном воздухе над кимберлитовыми трубками, являются вмещающие вендские породы околотрубочного пространства, а также туфогенно-осадочные породы кратера (в случае если у трубки сохранилась кратерная часть).

Для количественной оценки объемной активности радона, которая может быть зафиксирована в почвенном воздухе при проведении эманационных исследований в районах развития кимберлитового магматизма было выполнено теоретическое моделирование переноса радона в массиве пород. В качестве модели переноса радона была выбрана

диффузионная, описываемая законами Фика, которая имеет хорошие результаты сходимости с экспериментальными данными и часто используется для описания процесса переноса радона (Minkin, 2003; Маренный и др. 2016; Лившиц и др., 2017; Микляев, Петрова, 2019).

Моделирование проводилось на примере трубки Чидвинская Чидвинско-Ижмозерского поля, которая среди известных трубок Архангельской алмазонасной провинции характеризуется наименьшей мощностью перекрывающих отложений (Kiselev et al., 2017), что дало возможность использовать однослойный однородный профиль для расчета переноса



радона. Расчет переноса радона проведен для трех профилей, характеризующих непосредственно трубчатое тело, вмещающие породы околотрубочного пространства и удаленные от трубки (Рис. 22).

Рис. 22. Диффузионная модель распределения концентрации радона в массиве пород трубки Чидвинская

Результаты показали, что при заданных радиационно-физических параметрах, экспериментально установленных для пород, средняя концентрация радона в почвенном воздухе над околотрубочным пространством

составит более 9000 Бк/м³. На удалении от трубки концентрация радона значительно снижается до 2000 Бк/м³. Результаты моделирования переноса радона в целом подтверждают данные полевых измерений и отражают реально наблюдаемое распределение объемной активности радона на трубке Чидвинская (рис. 21).

Следует отметить, что расчеты переноса радона проводились с использованием средних значений радиационно-физических параметров пород (Yakovlev, Puchkov, 2021), при максимальных значениях, установленных экспериментально, активность радона в почвенных отложениях может достигать 50-100 кБк·м⁻³. Такие значения могут представлять опасность воздействия радона в плане повышения радиационных рисков для человека, связанных с возможностью накопления радона в жилых и производственных помещениях с превышением норм радиационной безопасности. Более того, случаи превышения объемной активности радона более 200 Бк·м⁻³ отмечены для северной части Архангельской области, в частности для населенных пунктов Архангельской агломерации (Пучков, Киселев, 2011), что актуализирует необходимость установления факторов формирования поля радона и прогноза радиационной обстановки. В связи с этим, изложенный в данной работе подход к оценке уровней продуцирования радона различными типами отложений и переноса радона в массиве пород кимберлитового поля можно использовать для оценки степени радоноопасности территорий и прогнозирования активности радона в подземных водах районов развития кимберлитового магматизма в Архангельской области. С учетом того, что радон является основным дозообразующим радионуклидом, формирующим более 50 % годовой дозы облучения населения, оценка формирования радонового потенциала территорий с использованием современных подходов является крайне актуальной.

Заключение

Таким образом, комплекс изотопно-радиогеохимических методов позволил уточнить имеющиеся и получить новые данные о закономерностях распределения и миграции радиоактивных элементов в природных и техногенно-измененных ландшафтах Западного сектора Российской Арктики. Совокупность предложенных изотопно-радиогеохимических

методов позволила решить проблему корректной оценки геоэкологической обстановки Западного сектора Российской Арктики, учитывающей комплексное воздействие на экосистемы техногенных и климатических факторов. Полученные новые знания определяют целесообразность и эффективность предложенных в работе подходов к использованию изотопно-радиогеохимической информации для количественной оценки радиогенных нагрузок в регионе, имеющей решающее значение для социально-экономического развития Арктики и сохранения её природно-ресурсного потенциала.

Основные выводы исследования, отражающие научную и практическую значимость диссертационной работы, заключаются в следующем.

1. В поверхностном слое донных Баренцева моря в настоящее время наблюдается сравнительно низкий уровень активностей ^{90}Sr и ^{137}Cs , связанный со значительным снижением эмиссии техногенной радиоактивности за счет глобальных атмосферных выпадений и трансграничного переноса от западноевропейских радиохимических предприятий. В накоплении техногенных радионуклидов в поверхностном слое донных осадков основную роль играет органическое вещество и самые мелкие фракции отложений размером от тонкой глины до крупнозернистого ила, что подтверждает закономерность – осадки с высоким содержанием глинистых минералов и богатые органическим веществом имеют наибольший потенциал для накопления техногенных радионуклидов.

2. Отношение активностей $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ в поверхностном слое донных отложениях составляет 0.51, что указывает на то, что основным источником техногенных радионуклидов в формирующихся в настоящее время осадках, вероятно, являются глобальные выпадения, для которых характерен диапазон отношения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 0.4-0.6. В то же время короткоживущие техногенные радионуклиды в поверхностном слое донных осадков не обнаружены, что указывает на отсутствие значимого влияния местных источников на трансформацию техногенного радиационного фона.

3. Для торфяных отложений, отобранных в различных природно-климатических зонах Западного сектора Российской Арктики (Мурманская и Архангельская области, Ненецкий автономный округ) получены данные о вертикальном распределении техногенных и естественных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{210}Pb . Активности изученных радионуклидов в основном контролируются зольностью, содержанием карбонатов и водорастворимых солей, что подтверждает атмосферный канал поступления указанных радионуклидов. Обнаруживается также закономерная связь радиоактивных изотопов с параметрами pH, что указывает на то, что кислотность является одним из ключевых факторов, определяющих подвижность радионуклидов в торфяных залежах.

4. С использованием данных по распределению ^{210}Pb по модели постоянного потока были определены скорости накопления торфяных отложений. Установлено, что средние скорости накопления торфа значительно снижаются от зоны северной тайги и лесотундры к тундровым ландшафтам, что связано со снижением продуктивности биомассы в холодных климатических условиях субарктики, препятствующих активному формированию торфяных залежей.

5. Установлено, что атмосферный поток ^{210}Pb на поверхность торфяников увеличивается от зоны северной тайги к тундре, нарушая известную ранее закономерность снижения потока ^{210}Pb при движении на север за счет уменьшения активности ^{222}Rn в приземном слое. Установлено, что это явление связано с активным ветровым переносом пыли и частиц минерального грунта с участков с деградировавшим растительным покровом в результате хозяйственной деятельности человека, что подтверждается данными физико-химических исследований торфа и активностью литогенного ^{40}K . Обнаруженные закономерности изменения атмосферного потока ^{210}Pb позволяют использовать этот параметр для выделения участков подверженных антропогенному воздействию и оценки степени нарушенности тундрово-болотных ландшафтов, а также для количественного расчета поступления загрязняющих веществ в Арктике.

6. Показано, что надежное определение скоростей накопления и возраста торфа по техногенным изотопам, маркирующим радиационные события, может быть затруднено, что связано как с различной степенью подвижности радионуклидов в торфяном массиве, так и с их крайне низких активностей и методических сложностей определения (Pu и ^{241}Am). Установлено, что даже ^{210}Pb , считающийся наименее подвижным в болотных водах радионуклидом, в некоторых случаях, проявляет значительную вертикальную миграцию и не может являться надежным инструментом датирования с использованием стандартных методов. В отсутствие надежных количественных параметров миграции ^{210}Pb , в первом приближении можно восстановить начальное распределение ^{210}Pb с использованием модифицированной модели IP-CRS, позволяющей оценить количество вымытого из верхних горизонтов в составе аэрозольных частиц, а также его механическое перемещение за счет био- и криотурбации. Полученные возрастные характеристики с использованием модели IP-CRS не противоречили данным по средней скорости накопления торфа по другим изученным торфяным разрезам, что в целом подтверждает целесообразность использования метода для оценочных хронологических построений.

7. Показано, что основным источником техногенного радиационного загрязнения торфяно-болотных экосистем Западного сектора Российской Арктики являются глобальные выпадения, однако также обнаруживается некоторая доля предположительно чернобыльских выпадений. Основной вклад в дозовые нагрузки от внешнего облучения дает терригенное облучение изотопов входящих в природные ряды распада. Основным дозообразующим техногенным радионуклидом является ^{137}Cs , вклад которого составляет около 15% от суммарной дозы внешнего облучения.

8. Выявлены закономерности распределения радионуклидов в природно-техногенных образованиях района алмазодобычи в Архангельской области. Установлена приуроченность повышенных содержаний радионуклидов в речных водах и донных отложениях к местам разгрузки минерализованных дренажных вод с болот-полей фильтрации в речную сеть.

9. Показано, что среди естественных радионуклидов основные экологические риски для водной биоты района алмазодобычи связаны с накоплением урана, к повышенным концентрациям которого наиболее чувствительны донные беспозвоночные. Среди тяжелых металлов наибольший вклад в экотоксичность речной экосистемы вносят хром и никель, являющиеся основными сопутствующими элементами кимберлитовых пород. Комплекс экологической оценки районов добычи алмазов позволяет снизить риск загрязнения речных экосистем Арктики, имеющих особый природоохранный статус как нерестилища ценных видов рыб.

10. Показано, что глобальное потепление климата, отражающееся на изменении параметров криолитозоны, может обуславливать трансформацию естественного радиационного фона в районах с фоновым содержанием естественных радиоактивных элементов, выражающуюся в увеличении эманаций ^{222}Rn и продуктов его распада, а также накоплении избытков ^{234}U в природных водах. Полученные данные необходимо учитывать при оценке и прогнозе радоноопасности, радиационных исследованиях питьевых подземных вод и организации мероприятий по снижению облучения населения от естественных источников радиации.

11. Выявлены закономерности распределения радионуклидов уранового ряда в породах кимберлитовых полей Архангельской алмазодобывающей провинции. Установлено, что в породах околотрубочного пространства кимберлитов, представленных отложениями венда и периферийными частями кратерных фаций трубок обнаруживаются избытки дочернего изотопа ^{234}U , накопление которого связано с осаждением из подземных вод, что подтверждается данными минералого-геохимических исследований и сравнительного выщелачивания.

12. Породы околотрубочного пространства кимберлитов также продуцируют наибольшее количество радона в свободном состоянии, что может приводить к формированию

аномалий объемной активности радона в почвенном воздухе. Моделирование переноса радона в массиве пород в целом подтверждает данные полевых измерений и отражает реально наблюдаемое распределение объемной активности радона в пределах кимберлитовых полей. Обнаруженные закономерности создают предпосылки использования изотопов уранового ряда в качестве дополнительного признака для поисков структур, контролирующих кимберлитовые тела в Архангельской алмазоносной провинции, а также для оценки формирования радиационного качества питьевых подземных вод и прогнозирования радоноопасности.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Коллективные монографии:

1. Строеение и динамика литосферы Беломорья: монография / отв. ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 239 с. ISBN 978-5-9274-0914-3. (**Яковлев Е.Ю.** – раздел 2.5).
2. **Yakovlev E.Yu.**, Malov A.I. Selyanina S.B. Evaluation of the impact from diamond mining on the radioecological state of ecosystems of the Arctic zone (Example of Arkhangel'sk region, Russia). In book: *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences* / Edited by Haroun Chenchouni, Helder I. Chamine, Md Firoz Khan, Broder J. Merkel, Zhihua Zhang, Peiyue Li, Amjad Kallel, Nabil Khelifi. Springer International Publishing. 818 p. ISBN: 978-3-030-72542-6
3. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Zykov S.B., Zykova E.N. Features of radon distribution over kimberlite pipes of the Arkhangel'sk diamondiferous province: possible directions for the study of the structure near-pipe space and development of the emanometric method for the search for kimberlites. In book: *Radon: Detection, Exposure and Control* / Edited by Ramesh Chandra Tiwari. Series: Earth Sciences in the 21st Century. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers. 2020. 330 p. ISBN: 978-1-53616-791-7.
4. Danilov K.B., **Yakovlev E.Yu.**, Afonin N.Yu. Diamond Deposits of the European Arctic of Russia: Problems of the Kimberlites Exploration, Limits of Conventional Methods and New Approaches. In book: *The Arctic current issues and challenges* / Edited by Oleg S. Pokrovsky, Sergey N. Kirpotin, Alexander I. Malov. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers. 2020. 425 p. ISBN: 978-1-53617-306-2.
5. Zykov S.B., Druzhinin S.V., **Yakovlev E.Yu.**, Zykova E.N. Radionuclides in sea ecosystems of the western sector of the Russian Arctic. In book: *The Arctic current issues and challenges* / Edited by Oleg S. Pokrovsky, Sergey N. Kirpotin, Alexander I. Malov. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers. 2020. 425 p. ISBN: 978-1-53617-306-2.

Статьи в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus:

6. Tokarev I.V., Poturay V.A., **Yakovlev E.Yu.** Estimation of the thermal water formation at the Kuldur site (Amur region, Russia) according to water isotope composition (^2H , ^{18}O) // *Environmental Earth Sciences*. 2024. Vol. 83, № article 126. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11422-7>
7. **Yakovlev E.Yu.**, Tokarev I.V., Orlov A.S., Zykov S.B. Assessment of the radiation quality of groundwater with an increased uranium isotope ratio $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (Pre-Volga region, European Russia) // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2023. Vol. 332, 4963-4975. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09174-y>
8. **Yakovlev E.Yu.**, Tokarev I.V., Erokhin S.A., Tuzova T.V., Druzhinin S.V., Puchkov A.V., Zykov S.B., Orlov A.S. Assessment of river runoff formation sources in the mountain-arid zone by data on water isotopic composition // *Water Resources*. 2023. Vol. 50, 354-357. <https://doi.org/10.1134/S0097807823700598>
9. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhininina A.S., Tokarev I.V., Druzhinin S.V. Ivanchenko N.L. Heavy metal concentrations and groundwater quality assessment in the territory of Leningrad oblast and

- Southern Republic of Karelia // *Water Resources*. 2023. Vol. 50, 341-345. <https://doi.org/10.1134/S0097807823700562>
10. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Druzhinina A.S., Zykov S.B., Ivanchenko N.L. Trace metals in surface water of the Pechora River and its tributaries: Content, water quality and risks assessment (Arctic Ocean basin) // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 194. Part B. № article 115317. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115317>
 11. **Yakovlev E.Yu.**, Kudryavtseva A.A., Orlov A.S. Comparison of ²¹⁰Pb age models of peat cores derived from the Arkhangelsk Region // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(18):10486. <https://doi.org/10.3390/app131810486>
 12. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Druzhinina A.S., Zykov S.B., Ivanchenko N.L. Seasonal dynamics of heavy metals content and assessment of water pollution in the Northern Dvina River (Arkhangelsk) // *Arctic: Ecology and Economy*. 2023, Vol. 13. Is. 2, P. 223-233. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-2-223-233>
 13. **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 // *Applied Sciences*. 2023; 13(9):5778. <https://doi.org/10.3390/app13095778>
 14. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V., Druzhinin S.V. Evaluation of current natural and anthropogenic radionuclide activity in coastal area bottom sediments of the Barents Sea (North of the Kola Peninsula) // *Marine Pollution Bulletin*. 2023. Vol. 189. № article 114809. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114809>
 15. Iglovsky S.A., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Tokarev I.V. Permafrost conditions of the Subpolar Urals based on studies of lateral moraine peatlands // *Polar Geography*. 2023. Vol. 46 (4). P. 228-245. <https://doi.org/10.1080/1088937X.2023.2290013>
 16. Puchkov A. V., **Yakovlev E.Yu.** Activity Concentrations of Cs-137, Sr-90, Am-241, Pu-238, and Pu-239+240 and an Assessment of Pollution Sources Based on Isotopic Ratio Calculations and the HYSPLIT Model in Tundra Landscapes (Subarctic Zone of Russia) // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(23): 12952. <https://doi.org/10.3390/app132312952>
 17. Puchkov A.V., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Druzhinin S.V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities in fish from Arctic rivers (Northwestern Russia) // *Pollution*. 2023. Vol. 9. Iss. 3. P. 1098-1116. <https://doi.org/10.22059/POLL.2023.350148.1668>
 18. Borodulina G.S., Tokarev I.V., **Yakovlev E.Yu.** Isotope Composition of Natural Water in Lake Onega Basin // *Water*. 2023; 15(10):1855. <https://doi.org/10.3390/w15101855>
 19. Puchkov, A. V., Druzhinina, A. S., **Yakovlev, E. Yu.**, Druzhinin, S. V. Accumulation of radionuclides in fish from the rivers of the northwestern sector of the Russian Arctic // *Arctic: Ecology and Economy*. 2023, Vol. 13. Is. 1, P. 127-137. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-127-137>
 20. Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Kriauciunas V.V., **Yakovlev E.Yu.** Features of the spatial distribution of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th in the soils of the city of Kirovsk (Murmansk region) // *Arctic: Ecology and Economy*. 2023. Vol. 13 (3). P. 473-481. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-473-481>
 21. 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. Vol. 57, P. 343–347. <https://doi.org/10.3103/S0361521923050051>
 22. **Yakovlev E. Yu.**, Orlov A.S., Kudryavtseva A.A., Zykov S.B. 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(21):10870. <https://doi.org/10.3390/app122110870>
 23. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Zykova E.N., Zykov S.B., Ivanchenko N.L. Assessment of heavy metal pollution of the snow cover of the Severodvinsk industrial district (NW Russia) // *Pollution*. 2022. Vol. 8. Is. 4. P. 1274-1293. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.341500.1438>

24. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Druzhinin S.V., Zykov S.B., Ivanchenko N.L. Assessment of trace metal contamination and water quality of surface waters in the area surrounding the Lomonosov diamond deposit (NW Russia) // *Pollution*. 2022. Vol. 8. Is. 4. P. 1196-1215. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.340938.1416>
25. **Yakovlev E.Yu.**, Zykova E.N., Zykov S.B., Druzhinina A.S., Ivanchenko N.L. Evaluation of heavy metal pollution of snow and groundwater on the territory of suburban community garden plots of the Arkhangelsk agglomeration (Northwest Russia) // *Pollution*. 2022. Vol. 8. Is. 4. P. 1448-1473. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.342253.1456>
26. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V., Malkov A.V., Bedrina D.D. Assessment of heavy metals distribution and environmental risk parameters in bottom sediments of the Pechora River estuary (Arctic Ocean Basin) // *Marine pollution bulletin*. 2022. Vol. 182. № article 113960. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113960>
27. Danilov K.B., **Yakovlev E.Y.**, Afonin N.Y., Druzhinin S.V. Deep structure of the Verkhnetovskaya kimberlite pipe in the Arkhangelsk diamondiferous province according to passive seismic and radiological methods // *Geophysical Prospecting*. 2022. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13254>
28. Iglovsky S.A., Lubas A.A., **Yakovlev E.Yu.** New Data on Paleogeography of Quaternary Coast Sediments of the Rivers of the European North of Russia Using Isotope-Geochemical Methods // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(14). № article 6988. <https://doi.org/10.3390/app12146988>
29. Tokarev I.V., Rummyantsev V.A., Rybakin V.N., **Yakovlev E.Yu.**, Inflow of surface and groundwater to Lake Ladoga based on stable isotope (^2H , ^{18}O) composition // *Journal of Great Lakes Research*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.04.019>
30. Puchkov A.V., Berezina E.V., **Yakovlev E.Yu.**, Hasson N.R., Druzhinin S.V., Tyshov A.S., Ushakova E.V., Koshelev L.S., Lapikov P.I. Radon Flux Density In Conditions Of Permafrost Thawing: Simulation Experiment // *Geography, Environment, Sustainability*. 2022. Vol. 15(3). P. 5-18. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-023>
31. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Druzhinin S.V., Zykov S.V., Ivanchenko N.L. Assessment of physical and chemical properties, health risk of trace metals and quality indices of surface waters of the rivers and lakes of the Kola Peninsula (Murmansk Region, North–West Russia) // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01027-5>
32. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V., Bykov V.M. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin) // *Marine Pollution Bulletin*. 2021, 172, 112765, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112765>
33. **Yakovlev E.Yu.**, Spirov R.K., Druzhinin S.V., Ocheretenko A.A., Druzhinina A.S., Mishchenko E.V., Zhukovskaya E.V. Atmospheric fallout of radionuclides in peat bogs in the Western Segment of the Russian Arctic // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, 28, 25460–25478 <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12224-7>
34. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V. Radon Over Kimberlite Pipes: Estimation of the Emanation Properties of Rocks (Lomonosov Diamond Deposit, NW Russia) // *Applied Sciences*. 2021, 11, 6065. <https://doi.org/10.3390/app11136065>
35. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V. Radon over Kimberlite Pipes: Surface Field Experiments and Calculations of Vertical Diffusion (Arkhangelsk Diamondiferous Province, NW Russia). *Applied Sciences*. 2021, 11, 11765. <https://doi.org/10.3390/app112411765>
36. **Yakovlev E.Yu.**, Tokarev I.V., Zykov S.V., Iglovsky S.A., Ivanchenko N.L. Isotope Signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of Groundwater: An Investigation of the Existence of Paleo-Permafrost in European Russia (Pre-Volga region) // *Water*. 2021, 13, 1838. <https://doi.org/10.3390/w13131838>
37. Puchkov A.V., **Yakovlev E.Y.**, Hasson N., Sobrinho G., Tsykareva Y.V., Tyshov A.S., Lapikov P.I., Ushakova E.V. Radon Hazard In Permafrost Conditions: Current State Of Research // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-037>

38. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinina A.S., Druzhinin S.V., Bedrina D.D., Orlov A.S. 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, 28, 300–313. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10501-z>
39. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V. Radiation and physical parameters of kimberlites and host rocks of the Lomonosov diamond deposit (Russian North-West) // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. 867, 012023 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012023>
40. **Yakovlev E.Yu.**, Ocheretenko A.A., Druzhinin S.V., Druzhinina A.S., Spirov R.K. Quantification of peat accumulation rates of European subarctic of Russia based on ^{210}Pb dating using the Constant Rate of Supply model (on example of Arkhangelsk region) // *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 867. 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/867/1/012022>
41. Tokarev I.V., **Yakovlev E.Yu.** Non-Equilibrium Uranium as an Indicator of Global Climate Variations—The World Ocean and Large Lakes // *Water*. 2021, 13(24), 3514. <https://doi.org/10.3390/w13243514>
42. Danilov K.B, **Yakovlev E.Yu.**, Afonin N.Yu. Study of Deep Structure of the Kimberlite Pipe Named After M. Lomonosov of the Arkhangelsk Diamondiferous Province Obtained by Joint Using of Passive Seismic and Radiometric Methods // *Pure and Applied Geophysics*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02864-2>
43. Tokarev I.V., **Yakovlev E.Yu.**, Zykov S.B., Zimina I.A. Disequilibrium Uranium ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in Natural Aqueous Objects and Climatic Variations: World Ocean // *Geochemistry International*. 2021. 59(9), 857-864, <https://doi.org/10.1134/S001670292109007X>
44. **Yakovlev E.Yu.**, Puchkov A.V.. Assessment of current natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the bottom sediments from the Barents Sea // *Marine Pollution Bulletin*, 2020. Vol.160, 111571. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111571>
45. **Yakovlev E.Yu.** Features of radioactive element distribution within the Arkhangelsk diamondiferous province: possible directions for development of isotope–radiogeochemical methods for kimberlite prospecting in complex landscape–geology and climate conditions of the subarctic zone // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2020. Vol. 20 (3), 269-279. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-023>
46. **Yakovlev E.Yu.**, Malov A.I., Druzhinin S.V., Zykova E.N., Malkov A.V. Bedrina D.D. Distribution of trace metals and an environmental risk assessment of the river sediments in the area of the Lomonosov diamond deposit (NW Russia) // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, 35392–35415. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09809-7>
47. **Yakovlev E.Yu.**, Malov A.I., Druzhinin S.V., Zykova E.N., Orlov A.S. Transformation of the radionuclides composition of river sediments in the area of the exploited Lomonosov diamond deposit (NW Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 213, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106142>
48. **Yakovlev E.Yu.**, Malov A.I. Evaluation of the impact of diamond mining on the radioecological state of the arctic zone ecosystems (example of Arkhangelsk region, Russia) // *Pollution Research*. 2020. Vol. 39 (4), 131-143.
49. **Yakovlev E. Yu.**, Zykova E. N., Zykov S.B., Malkov A.V., Bazhenov A.V. Heavy metals and radionuclides distribution and environmental risk assessment in soils of the Severodvinsk industrial district, NW Russia. // *Environmental Earth Sciences*. 2020. Vol. 79, 218. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08967-8>
50. Kiselev G.P., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Zykov S.B., Kiseleva I.M., Bagenov A.V. Radioactive investigation of the impact the Kostomuksha mining enterprise on the radioecological state of adjacent areas, the republic of Karelia, the Russian Federation // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77, 264. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7432-4>
51. Kiselev G.P., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Galkin A.S. Local variations of the volume activity of radon over kimberlite pipes of the Arkhangelsk diamondiferous province // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77, 568. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7751-5>

52. Kiselev G.P., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Zыkov S.B., Bykov V.M., Ocheretenko A.A. Uranium even isotopes in kimberlites, enclosing and overburden rocks of the Zolotitskoye ore field (Arkhangelsk diamondiferous province) // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2018. Vol. 18, ES3002. <https://doi.org/10.2205/2018ES000622>
53. Kiselev G.P., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V., Galkin A.S. Distribution of Radioactive Isotopes in Rock and Ore of Arkhangelskaya Pipe from the Arkhangelsk Diamond Province // *Geology of Ore Deposits*. 2017. Vol. 59 (5) 391-406. <https://doi.org/10.1134/S1075701517050014>
54. Kiselev G.P., Danilov K.B., **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V. Radiometric and seismic study of Chidvinskaya kimberlite pipe (Arkhangelsk diamondiferous province, North of the East European Craton, Russia) // *Geofísica Internacional*. 2017. Vol. 2, 147-155.
55. Danilov K.B, **Yakovlev E.Yu.**, Afonin N.Yu. The new approach for kimberlite pipes exploration based on passive seismic and radiometric methods (the example of the Arkhangelsk province) // Life with ore deposits on earth, Proceedings of the 15th SGA biennial meeting, 2019, Vol. 1-4, 1389-1392 <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000503111600364>
56. **Yakovlev E.Yu.**, Druzhinin S.V. $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotopic ratio as a vector to kimberlite pipes: the example of the Arkhangelsk diamondiferous province, Russia // Mineral resources to discover, Proceedings of the 15th SGA biennial meeting <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000439764100395>

Статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

57. **Яковлев Е.Ю.**, Кудрявцева А.А., Орлов А.С. Моделирование нисходящего переноса ^{210}Pb на примере естественного торфяника Иласского болотного массива Европейской Субарктики России: модель IP-CRS // Вестник геонаук. 2023. №7 (343). С. 43-51. DOI: 10.19110/geov.2023.7.5
58. Пучков А.В., **Яковлев Е.Ю.** Особенности накопления и миграции техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в тундровых ландшафтах Российской Арктики (на примере бассейна реки Несь, Канинская тундра) // Вестник геонаук. 2023. №1 (337). С. 42-51. DOI: 10.1134/S0026364819050076
59. Игловский С.А., Баженов А.В., **Яковлев Е.Ю.** Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область) // Вестник геонаук. 2023. № 10 (346). С. 51-57. <https://doi.org/10.19110/geov.2023.10.6>
60. Игловский С.А., Баженов А.В., **Яковлев Е.Ю.** Пространственное распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Оленегорск (Мурманская область) // Почвы и окружающая среда. 2023. № 4. e225. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.225>
61. **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. С. 35-42. DOI:10.19110/geov.2022.11.5
62. **Яковлев Е.Ю.**, Дружинина А.С., Дружинин С.В., Иванченко Н.Л. Оценка воздействия промышленных выбросов на качество поверхностных вод Кольского полуострова // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 88–101. DOI:10.17076/lim1617
63. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н., **Яковлев Е.Ю.** Результаты применения изотопных методов при картировании листа Q-39 (Нарьян-Мар) // Разведка и охрана недр. 2022. № 9. С. 25-30. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_09_25
64. Пучков А.В., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинина А.С., Дружинин С.В. Радиоактивность нефтешлама: первые результаты исследований территории Большеземельской тундры // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 75-80 DOI:10.17513/use.37911
65. Баженов А.В., **Яковлев Е.Ю.**, Игловский С.А., Дружинин С.В. Радиоэкологические исследования городских почв в Архангельской области // Почвы и окружающая среда. 2022. № 5(3). С. 1-12 DOI:10.31251/pos.v5i3.182

66. 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. DOI: 10.19110/geov.2022.5.3
67. Токарев И.В., **Яковлев Е.Ю.**, Зыков С.Б., Зимина И.А. Неравновесный уран ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) водных объектов и климатические вариации: океанический резервуар // Геохимия. 2021. № 9. С. 857-864. DOI: 10.31857/S0016752521090077
68. **Яковлев Е.Ю.**, Очеретенко А.А., Спилов Р.К., Мищенко Е.В., Жуковская Е.В. Применение метода моделирования по типу Монте-Карло для оценки погрешностей ^{210}Pb -датирования торфяных отложений европейской субарктики России (на примере Архангельской области). // Вестник геонаук. 2020. № 7 (307). С. 18-28 DOI: 10.19110/geov.2020.7.3
69. Borodulina G., Tokarev I., Levichev M., **Yakovlev E.**, Kamensky I., Skiba V. Paleoenvironmental reconstruction for mineral groundwater area Marcial Waters (Lake Onega catchment) // Limnology and Freshwater Biology. 2020. №4. С. 472-473 DOI: <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-472>
70. 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. DOI: 10.17513/use.37717
71. Котова, Е.И., Пучков, А.В., **Яковлев, Е.Ю.**, Иванченко, Н.Л., Бедрина Д.Д. Состав снежного покрова западной части Ненецкого автономного округа (тяжелые металлы и радиоактивность), Экологический мониторинг и моделирование экосистем. 2021. Т. XXIII, № 3-4. С. 58-70, DOI: 10.21513/0207-2564-2021-3-4-58-70
72. Баженов А.В., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Игловский С.А. Радиозокологические исследования почв в районе разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (Архангельская область) // Почвы и окружающая среда. 2021 Том 4, № 2, С. 1-12. DOI: 10.31251/pos.v4i2.137
73. Зыкова Е.Н., **Яковлев Е.Ю.**, Зыков С.Б., Очеретенко А.А., Лапиков П.И. Тяжелые металлы в пробах снега и грунтовых водах в окрестностях северодвинского промышленного района // Вестник геонаук. 2020. № 6 (306). С. 20-26. DOI: 10.19110/geov.2020.6.4
74. Пучков А.В., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Естественные и искусственные радионуклиды в снеговом покрове условной чистой территории Ненецкого автономного округа // Успехи современного естествознания. 2020. № 4. С. 140-145. DOI: 10.17513/use.37376.
75. **Яковлев Е.Ю.**, Дружинина А.С., Дружинин С.В., Бедрина Д.Д., Орлов А.С., Спилов Р.К., Мищенко Е.В., Жуковская Е.В. Оценка физико-химических параметров и распределения металлов в верховом болоте архангельской области // Успехи современного естествознания. - 2020. - № 5. - С. 115-120. ВАК: DOI: 10.17513/use.37401
76. Пучков А.В., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Радиационные параметры гидробионтов условно чистой территории Ненецкого автономного округа // Успехи современного естествознания. 2020. № 6. С. 118-122. DOI: 10.17513/use.37420.
77. Зыкова Е.Н., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В., Бедрина Д.Д., Зыкова А.С. Сравнение нерастворимой и растворимой формы тяжелых металлов в снеге вокруг Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2020. № 1. С. 26-30. DOI:10.17513/use.37317
78. Зыков С.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Зыкова Е.Н., Дружинин С.В. Распределение и миграция ^{137}Cs в торфяных горизонтах верхового болота в окрестностях Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2019. № 5. С. 53-57. DOI:10.17513/use.37121
79. Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Ларионов Н.С., Скютте Н.Г. Распределение ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и некоторых тяжелых металлов в пробах почвы с участков вокруг

- Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2019. № 7. С. 77-81. DOI:10.17513/use.37163
80. **Яковлев Е.Ю.**, Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., Очеретенко А.А. Пространственное распределение тяжелых металлов в пробах снега вокруг Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 179-184. DOI:10.17513/use.37259
81. Kiselev G.P., **Yakovlev E.Y.**, Druzhinin S.V., Kiseleva I.M., Bagenov A.V., Bykov V.M. Assessment of radioactivity of environmental components in the Kostomuksha State Nature Reserve // Arctic Environmental Research. 2018. №18 (1). С. 3-13. DOI 10.17238/issn2541-8416.2018.18.1.3
82. Зыков С.Б., Дружинин С.В., Зыкова Е.Н., **Яковлев Е.Ю.**, Покровский О.С. Новые данные о долгоживущих техногенных и естественных радиоактивных изотопах в верхних горизонтах почвы в окрестностях Северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2018. № 11(2). С. 328-333.
83. Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Ларионов Н.С. Сравнительно-временной анализ содержания тяжелых металлов в аномальных зонах почв северодвинского промышленного района // Успехи современного естествознания. 2018. № 8. С. 130-135.
84. Зыкова Е.Н., Зыков С.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Ларионов Н.С. Четные изотопы урана в поверхностных водах группы малых озер Северо-Запада Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. С. 114-120.
85. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В., Киселева И.М., Баженов А.В., Быков В.М. Естественная и техногенная радиоактивность донных отложений озер северо-запада России (на примере республики Карелия и Архангельской области) // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 152-157.
86. **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В., Быков В.М. Влияние короткоживущих радиоактивных изотопов на изменение гамма-фона во время осадков на Европейском Севере России // Успехи современного естествознания. 2017. № 6. С. 123-129.
87. Киселев Г.П., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Неравновесный уран в околотрубном пространстве кимберлитовых тел Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции // Успехи современного естествознания. 2016. № 9. С. 117-125.
88. Киселев Г.П., Данилов К.Б., **Яковлев Е.Ю.**, Дружинин С.В. Радиометрические и сейсмометрические исследования кимберлитовой трубки Чидвинская (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2016. № 2 (30). С. 43-53.
89. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П., Дружинин С.В. Неравновесный уран в кимберлитах и вмещающих породах трубки Пионерская месторождения им. М.В. Ломоносова // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2016. №1. С. 19-28.
90. **Яковлев Е.Ю.**, Киселев Г.П., Дружинин С.В., Зыков С.Б. Исследование фракционирования изотопов урана (^{234}U , ^{238}U) в процессе образования кристаллов льда // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки. 2016. № 3. С. 15-23.