

На правах рукописи

Слуковский Захар Иванович

**СОВРЕМЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ: ГЕОХИМИЯ, ПАЛЕОРЕКОСТРУКЦИИ,
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ**

1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской Академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН) и Институте геологии – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской Академии наук» (ИГ КарНЦ РАН)

Научный консультант:

Даувальтер Владимир Андреевич, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики ИППЭС КНЦ РАН

Официальные оппоненты:

Иванов Дмитрий Владимирович, доктор географических наук, заместитель директора по научной работе Института проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан (обособленного подразделения ГНБУ «Академия наук РТ»)

Опекунов Анатолий Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии Института наук о Земле Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Страховенко Вера Дмитриевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных газов и редких элементов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН

Защита диссертации состоится 12.11.2026 г. в 11.00 на заседании совета 33.2.018.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе РГПУ им. А. И. Герцена по адресу 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, 48, корп. 12, ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке РГПУ им. А. И. Герцена по адресу 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, 48, корп. 5 и на сайте университета по адресу: https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001276.html.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.н., доцент

Ирина Евгеньевна Сазонова

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Донные отложения (ДО) озер являются маркером состояния водоема и его водосборной площади. Их можно использовать как для оценки современного состояния озера, так и для ретроспективного анализа, способного выявить различные исторические изменения в водоеме (Субетто, 2009; Abril, 2022; Massaferto et al., 2024). Геохимические исследования озерных отложений позволяют выявлять климатические изменения на водосборе, колебания уровня воды в озере, катастрофические явления в виде падения метеоритов или извержений вулканов, влияние рудных образований горных пород водосборной площади, а также антропогенное воздействие на окружающую среду (Даувальтер, 2012; Qiu et al., 2023). При оценке техногенного влияния на водоемы и их ДО ключевыми геохимическими индикаторами служат биогенные элементы, нефтепродукты и элементы, относящиеся к группе тяжелых металлов (ТМ). В России большой вклад в изучение процессов миграции и аккумуляции микроэлементов, включая ТМ, в озерных и других пресноводных отложениях внесли В.А. Даувальтер, В.Н. Удачин, А.Ю. Опекунов, В.Д. Страховенко, В.В. Законнов, Д.В. Иванов, В.П. Шевченко, Ю.Г. Таций, Е.П. Янин, М.В. Гапеева, Н.А. Белкина и др. При этом, несмотря на богатую историю изучения озерных отложений России, озерам городской среды было уделено недостаточно внимания. Хотя очевидно, что существующие экологические риски для водоемов урбанизированных районов указывают на значимость их изучения для контроля качества воды и ДО в свете снижения стресса для водной биоты и обеспечения безопасности людей, использующих их в рекреационных и других целях. Согласно «Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года», утвержденной Указом Президента РФ № 176 от 19.04.2017 г., загрязнение водных объектов вследствие трансграничного переноса загрязняющих, в том числе токсичных и радиоактивных, веществ с территорий других государств, а также низкое качество водных объектов, – ключевые вызовы и угрозы экологической безопасности страны. В этой связи особенно актуально получение новых теоретических знаний о поведении загрязнителей в водной среде урбанизированных территорий в рамках Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021-2030 годы) (Раздел фундаментальных и поисковых научных исследований № 1.5.11.3 «Прогнозирование гидрологического цикла и опасных гидрологических явлений. Научное обеспечение водной безопасности страны»), утвержденной распоряжением Правительства РФ № 3684-р от 31.12.2020 г. Таким образом, принимая во внимание недостаток знаний в области исследования геохимии озерных отложений городских территорий, научную и практическую значимость таких работ, а также накопленные данные, полученные на современном аналитическом оборудовании, целесообразно провести комплексное исследование ДО озер городских территорий и районов промышленных зон и дать оценку их состояния с учетом анализа природных и антропогенных факторов.

Цель работы – выявить основные закономерности накопления микроэлементов, включая ТМ, в современных ДО озер урбанизированных территорий разных регионов России и оценить роль локальных и глобальных источников загрязнения в процессе озерного седиментогенеза в индустриальный период развития общества.

Задачи исследований:

1. Установить уровень накопления широкого спектра химических элементов, включая ТМ, в современных ДО озер урбанизированных территорий разных регионов России и выявить ключевые источники загрязнения и лимитирующие факторы их влияния на озера.

2. Оценить поведение литофильных элементов (редкоземельных (РЗЭ), щелочных и щелочноземельных металлов) в ходе современного озерного осадконакопления на урбанизированных территориях и обосновать использование их концентраций в качестве индикаторов антропогенного влияния на озера.

3. Реконструировать историю техногенного воздействия на озерные экосистемы, подверженные прямому воздействию антропогенных факторов и расположенные на фоновых территориях, удаленных от непосредственного влияния промышленности и транспорта, используя метод палеоолимологических реконструкций.

4. Дать характеристику геохимического фона районов исследования на основе содержания микроэлементов в современных ДО и оценить влияние природных факторов на процессы седиментации в озерах городской среды и озерах фоновых районов.

5. Определить степень загрязнения водных объектов урбанизированной среды на основе химического состава их ДО, накопленных в современное время, используя экологические индексы, как для отдельных элементов, так и для совокупности элементов, чьи концентрации определены в ДО, и оценить экологические риски от загрязнения городских озер ТМ для водной биоты на примере исследования поведения водных организмов.

6. Оценить основные формы нахождения микроэлементов, включая ТМ, в современных ДО городских озер и озер промышленных территорий, проанализировать техногенные минеральные образования, свидетельствующие об антропогенных изменениях в озерах и на их водосборных территориях.

Объектом исследования являются ДО озер, залегающие не глубже 1 м от границы вода-дно и сформированные под влиянием природных и техногенных процессов.

Предмет исследования – геохимические особенности ДО озер, формы нахождения микроэлементов, включая ТМ, техногенные и природные минеральные образования, а также механизмы миграции и накопления элементов в ДО, оценка их опасности для водной биоты и озерных экосистем в целом.

Научная новизна работы. 1. Впервые детально изучены закономерности распределения широкого спектра микроэлементов в колонках современных отложений озер урбанизированных территорий Республики Карелии, Мурманской области, Архангельской области, Челябинской области и севера Красноярского края. В результате этих исследований установлены источники загрязнения водоемов, реконструирована история поступления химических элементов в воду и их накопления в отложениях, рассчитаны средние скорости седиментации и дана оценка степени загрязнения городских озер.

2. Доказано, что РЗЭ и щелочные металлы в виду особенностей миграции в геологической среде, содержании в антропогенных выбросах на территории городов и аккумуляции в современных отложениях могут служить индикаторами антропогенной нагрузки на водные объекты урбанизированных территорий.

3. Установлено, что в число агентов дальнего атмосферного переноса загрязнителей в северных широтах, включая Арктическую зону РФ, могут входить Pb, Cd и Hg, Sb, Sn, Bi и Tl, которые являются углефильными элементами, накапливающимися в отложениях озер на Севере России в результате выбросов промышленных предприятий, работающих на угле. Впервые показано влияние дальнего атмосферного переноса загрязнителей на современные озерные отложения Западной Антарктики на примере исследования озер острова Кинг-Джордж.

4. Оценено и обосновано влияние геологического фактора на формирование аномалий микроэлементов в ДО озер, расположенных на городских территориях или вблизи них. На Севере Мурманской области установлены аномалии U, более чем в 100 раз превышающие фоновый уровень этого металла для региона. Схожие аномалии U выявлены также в Карелии и Челябинской области. В Карелии также установлены аномалии Mo, Cu и V в городских озерах, связанные с геологическими особенностями районов исследования.

5. На основе данных о ключевых факторах, влияющих на формирование геохимического облика современных ДО озер урбанизированных территорий, озер, расположенных вблизи крупных промышленных предприятий и фоновых водоемов, предложена классификация ключевых геохимических индикаторов природного и техногенного загрязнения отложений. Также разработана схема типизации современных отложений городских озер и водоемов фоновых районов на основе соотношения сумм концентраций элементов-индикаторов трех основных типов загрязнителей водной среды.

6. Определены ключевые формы нахождения микроэлементов, в том числе ТМ в отложениях городских озер. Показано, что минеральная фаза и органическое вещество играют наиболее важную роль в аккумуляции и закреплении загрязнителей в водной среде и среде ДО. Вблизи металлургических предприятий в верхних слоях отложений обнаруживаются техногенные минеральные образования размером до нескольких сот микрометров, представленные оксидами Fe и Ni, сульфидами Fe, Ni и Cu, а также сплавами указанных элементов.

Теоретическая и практическая значимость. Диссертационная работа вносит значимый теоретический вклад в развитие современных научных представлений, связанных с изучением геохимии окружающей среды, экологической минералогии и геоэкологии. Проведенные исследования расширяют научные знания об эколого-геохимических особенностях современных ДО озер урбанизированных территорий и озер, расположенных близ промышленных зон, о специфике дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ и его влиянии на озерные отложения северных регионов, включая Арктику и о связи геологических особенностей региона, включая рудную минерализацию и рудопроявления, с озерной седиментацией на территории городов и за их пределами.

Выполненные исследования геохимической специализации состава ДО озер на урбанизированных территориях Карелии, Мурманской области, Архангельской области, Челябинской области и других регионов позволяют идентифицировать источники поступления микроэлементов, включая ТМ, и выделять маркеры природного и техногенного влияния на водную среду. Это дает возможность на качественно новом уровне проводить геоэкологические исследования, которые неизменно включают изучение водных объектов, в том числе озера.

В рамках диссертационной работы разработана и предложена концепция классификация основных геохимических индикаторов природного и техногенного влияния на водные объекты урбанизированных районов и фоновых территорий. Проведена типизация ДО озер на основе оценки вклада доминирующих воздействий на озера и геохимию их современных ДО со стороны локальных и дальних источников загрязнения.

С практических позиций исследования городских водных объектов – важный элемент в общем экологическом мониторинге состояния урбанизированных территорий, нацеленном на контроль безопасности и комфорта городской среды. В этом отношении анализ уровня загрязнения воды и ДО озер, используемых людьми в рекреационных целях, является крайне необходимой задачей исследования. Кроме этого, озерные отложения северных озер обладают большим потенциалом для добычи сапропеля, богатого органическим веществом, и диатомита, состоящего из панцирей отмерших водорослей. Анализ геохимических особенностей таких ДО также важная практическая задача, учитывая, что в нормативных документах по добыче органических отложений, используемых в сельском хозяйстве и медицине, необходимо вести контроль уровня содержания потенциально токсичных веществ, включая ТМ.

Защищаемые положения

1. Приоритетными элементами-загрязнителями из числа ТМ для современных отложений озер урбанизированных территорий Северо-Запада России, Южного Урала и севера Красноярского края выступают V, Sb, Pb, Cu, Ni, Co, W, Bi, Tl и Sn. Их концентрации в верхних слоях отложений (на глубине до 5-10 см) превышают региональные фоновые значения ($K_c \geq 5-10$), кларк земной

кору и концентрации этих элементов в нижних слоях отложений, сформированных в доиндустриальное время. Палеолимнологический анализ показал, что несмотря на разность климатических, геологических и гидрологических условий регионов, указанные элементы имеют общий тренд накапливаться в осадках под влиянием антропогенных факторов, имеющих близкую специфику.

2. Геохимическими маркерами техногенного воздействия на экосистемы городских озер выступают РЗЭ и щелочные металлы, концентрации которых имеют тенденцию к увеличению от фоновых слоев отложений до современных. Миграция РЗЭ и щелочных металлов в отложения озер городских территорий происходит в результате ускоренных эрозионных процессов, разрушения дорожных покрытий и зданий и пыления на урбанизированных территориях. В отложениях озер фоновых территорий подобное явление не наблюдается: РЗЭ накапливаются, подчиняясь природным факторам ландшафта и климата.

3. Агентами дальнего атмосферного переноса, влияющего на основное загрязнение озер фоновых районов, выступают Pb, Sb, Cd, Tl, Bi, Sn, Ni и Cu. На примере анализа соотношения концентраций Pb и Sb показан единый тренд накопления углефильных элементов дальнего атмосферного переноса в современных отложениях озер фоновых и урбанизированных территорий. Вне зависимости от уровня антропогенной нагрузки, в отложениях озер фоновых и городских районов отмечаются геохимические аномалии U, Mo, V, РЗЭ, связанные с локальным влиянием рудоносных пород водосборных территорий.

4. Высокий и экстремально высокий уровень антропогенной нагрузки на озера урбанизированных территорий, рассчитанный по индексу PLI (>2) отражает экстремальный и значительный уровни потенциального экологического риска по индексу RI, учитывающего негативное влияние ТМ на биоту. Наибольший вклад в формирование высокого значения индексов вносят приоритетные загрязнители окружающей среды. Негативное влияние загрязнения озер городских территорий Северо-Запада России отражается на изменениях в структуре диатомовых комплексов (водорослей) и бентосных организмов.

Достоверность исследований и защищаемых положений обеспечена использованием современных концепций, теорий, методов и принципов геохимии окружающей среды, экологической минералогии и геоэкологии. Работа основана на обширных фактических материалах, включая статистически значительное количество образцов, отобранных и подготовленных в соответствии с современными методиками и нормативными документами. Анализ образцов проводился с использованием высокочувствительных аналитических методов в аккредитованных лабораториях, а полученные данные были подвергнуты статистической обработке с глубоким анализом материала.

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и представлялись на международных, всероссийских и региональных научных конференциях, симпозиумах, форумах и совещаниях: Winter Limnology course (Финляндия, 2015), Международная молодежная

школа-конференция «Моря, озера и трансграничные водосборы России, Финляндии и Эстонии» (Петрозаводск, 2015), Международная научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2016, 2017), Международная конференция «Озера Евразии: проблемы и пути их решения» (Петрозаводск, 2017, Казань, 2019, 2025), Международная биогеохимическая школа «Современные проблемы состояния и биогеохимической эволюции таксонов биосферы» (Москва, 2017), Международная научная конференция «Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых» (Минск, 2017), International Scientific Conference and School for Young Scientists "Lateglacial-Interglacial transition: glaciotectonic, seismoactivity, catastrophic hydrographic and landscape changes" (Петрозаводск, 2018), International Conference «Freshwater Ecosystems – Key Problems» (Иркутск, 2018), The X International Siberian Early Career GeoScientists Conference (Новосибирск, 2022), Международная научная конференция «Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, экология, флористика, палеогеография, биостратиграфия» (Апатиты, 2023 г.), Всероссийская конференция «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 2022), Всероссийская научная конференция «Лимнология в России» (Санкт-Петербург, 2024), Конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2021), VI Международная конференция «Палеолимнология Северной Евразии 2024» (Красноярск, 2024), Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологической геохимии» (Москва, 2024) и др.

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в более 160 работах, в том числе 2 монографиях, в 43 статьях в научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, в 23 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и в 23 статьях, входящих в базу данных РИНЦ.

Личный вклад автора состоит в планировании исследований и реализации их на всех этапах: участии во всех экспедициях и полевых работах, во время которых были отобраны пробы для дальнейших исследований, первичной пробоподготовке образцов перед аналитическими исследованиями, определении минералов и минеральных видов в ДО и их химического состава на микрозонде, подготовкой отчетов и публикаций по результатам исследований. Кроме того, во время работ автор активно привлекал финансовые средства в виде грантов различных фондов для реализации поставленных целей и задач.

Структура, содержание и объем диссертации определены поставленными задачами и целью исследования. Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав, заключения и списка литературы. Рукопись изложена на 420 страницах машинописного текста, включающего 238 рисунков и 23 таблицы. Список литературы состоит из 615 источников, в том числе 333 (54%) на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую искреннюю благодарность моим учителям и наставникам: главному научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, профессору, д.г.н., Даувальтеру В.А. за научное руководство, совместное обсуждение результатов исследований озер, поддержку и ценные советы при выполнении диссертационной работы и директору ИГ КарНЦ РАН, д.г.-м.н. Светову С.А. за веру в меня и поддержку с первого дня работы в науке. Также за совместные экспедиции, аналитические работы, обсуждение полученных результатов и просто поддержку я признателен своим коллегам из ИГ КарНЦ РАН (Петрозаводск), а именно к.г.н. Шелеховой Т.С., Гоголеву М.А., Утицыной В.Л., Эховой М.В., Парамонову А.С., к.ф.-м.н. Бурдюху С.В., Прокоповичу П.Ф., Терновому А.Н., Бубновой Т.П. и Дьяковой Э.М., коллегам из ИППЭС КНЦ РАН (Апатиты), а именно к.б.н. Денисову Д.Б., Черепанову А.А., к.г.-м.н. Гузевой А.В., Малышевой М.Б., к.т.н. Елизаровой И.Р., к.г.н. Кудрявцевой Л.П., Летунской Е.А., Косовой А.Л., Вокуевой С.И., к.б.н. Вальковой С.А., к.б.н. Терентьеву П.М., к.г.н. Постевой М.А., Адамской П.Н., директору Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (Миасс) д.г.-м.н. Удачину В.Н. и заведующей отделом биогеохимии и экологии ГЕОХИ РАН (Москва) д.б.н., член-корреспонденту РАН Моисеенко Т.И. Особенную благодарность я хочу выразить своим родителям Слуковским Ивану Захаровичу и Татьяне Степановне, родным и друзьям.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 «Геохимия донных отложений, как маркер состояния водоема (литературный обзор)». *Рассматриваются современные представления об использовании ДО озер для оценки их современного состояния и изменений в водоемах и на их водосборных площадях, о возможностях химического анализа озерных отложений для индикации техногенных процессов в окружающей среде, приводится обзор работ, посвященных палеолимнологическим реконструкциям антропогенных событий, проводившихся на территории России.*

В подавляющем большинстве озер мира накапливаются отложения. По аналогии с осадочными породами, к основным факторам, влияющим на процесс седиментогенеза и формирования химического состава ДО, относятся петрофонд (состав пород водосборной площади), климат, ландшафт, тектонические процессы, гидрологические условия и влияние биоты (Юдович, Кетрис, 2011). При геоэкологических исследованиях современных геологических образований, включая ДО озер, большое значение имеет оценка антропогенного воздействия (Yao, Gao, 2007; Machowski et al., 2019). На рис. 1 показаны основные пути, включая техногенные эмиссии, по которым вещество разного генезиса попадает в озера, образуя на дне осадка. При формировании современных ДО озер, особенно когда речь идет о временном промежутке в два-три последних столетия, влияние человека может оказывать, если не ключевое, то весомое значение

для их геохимических особенностей. В русскоязычной литературе применительно к пресноводным ДО выделяется термин «техногенные илы», в котором подчеркивается роль антропогенного фактора в формировании геохимических особенностей современных осадков (Сает и др., 1990; Опекунов, 2004; Янин, 2018).

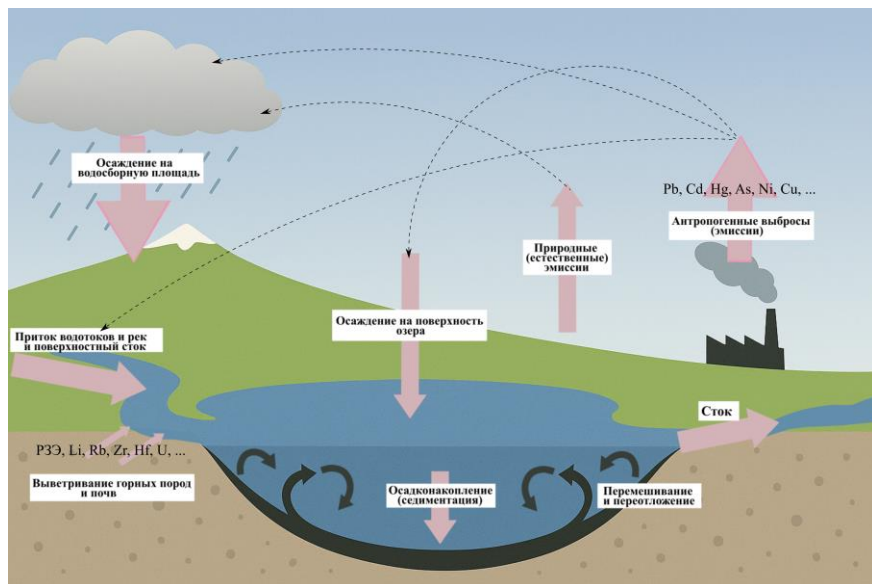


Рисунок 1. Общая схема поступления различных веществ от разных источников в озеро и их отложения (автор иллюстрации М.А. Шестаков)

По данным (Niu et al., 2020) с 1970-х годов исследования содержания ТМ в современных ДО озер проводились и проводятся на всех континентах Земли. Наибольшей изученностью характеризуются ДО озер Северной Америки, наименьшей – Азии и Африки, хотя в последние десятилетия наблюдается всплеск исследований, связанных с загрязнением озерных экосистем Китая (Xu et al., 2017). При этом самыми информативными являются работы с послойным анализом колонок современных ДО озер, что позволяет детально реконструировать историю техногенного воздействия на окружающую среду и водные объекты. На территории России, согласно проведенному в рамках диссертации обзору палеолимнологических исследований техногенного влияния на озерные экосистемы страны, хорошо изучены промышленные территории и условно-чистые районы Южного Урала и Мурманской области, а также фоновые территории Сибири и Северо-Запада РФ (Moiseenko et al., 1995; Jernström et al., 2010; Даувальтер, 2012; Масленникова и др. 2014; Страховенко и др., 2014; Tatsii et

al., 2020). Важно отметить, что лишь тонкие аналитические работы, в частности геохимический анализ, позволяют распознать в маломощных и внешне однообразных слоях современных ДО влияние техногенеза.

Глава 2 «Районы исследований: география, геология, климат». В данном разделе приводится краткое описание районов исследования (геология, гидрология и климат), а также дается описание изученных озер включая их морфометрические особенности и статус «городского» или «фонового» водоема.

Большинство озер, исследованных в рамках работы, имеют площадь до 1 км², что относит их к категории малых водоемов. Единственный крупный (1251 км²) водоем – Выгозеро (Выгозерское водохранилище), которое является третьим по величине в Карелии. По происхождению почти все озера ледниковые, реже тектоно-ледниковые и термокарстовые. Последний тип озер установлен в тундровой зоне в районе г. Норильска. Вблизи Челябинска два озера относятся к солончатым водоемам, остальные водоемы диссертационного исследования – пресные и даже ультрапресные.

Городскими озерами или озерами урбанизированных территорий в работе именуется водоемы, расположенные в пределах урбанизированной среды, как в официальных административных границах города или городского округа, так и вне его, но испытывающие влияние техногенеза, то есть *находящиеся в импактной зоне урбанизированной территории*. По аналогии в зарубежной литературе выделяется понятие *urban critical zone*, под которым понимается территория Земли, на которую распространяется влияние города, его инфраструктуры, промышленных предприятий, транспорта и других компонентов (Yu et al., 2024). К фоновым озерам относятся водоемы, вблизи которых нет явных источников антропогенного влияния, то есть промышленных предприятий или оживленных и загруженных транспортных путей. Преимущественный ландшафт таких озер соответствует природной зоне региона исследования (тайга, тундра, в том числе горная тундра, лесотундра, лесостепь, арктическая пустыня).

Глава 3 «Методы исследования». В этой главе дается подробное описание методов отбора проб воды, ДО и органического материала, методов подготовки и анализа проб, а также методов и подходов статистического описания данных и их экологической интерпретации.

Сбор основного фактического материала выполнялся на территории Мурманской области, Республики Карелии, Архангельской, Ленинградской и Челябинской областях (рис. 2). С разной степенью детализации изучены озера в следующих городах или вблизи них: Кировск, Мурманск, Мончегорск, Никель (Мурманская область), Петрозаводск, Медвежьегорск, Суоярви, Сортавала, Сегежа (Карелия), Архангельск (Архангельская область), Челябинск (Челябинская область), Норильск и Дудинка (Красноярский край). Также были исследованы

фоновые районы Севера и Арктики на примере Карелии, Мурманской и Архангельской областей и полуострова Файлдс (остров Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика).

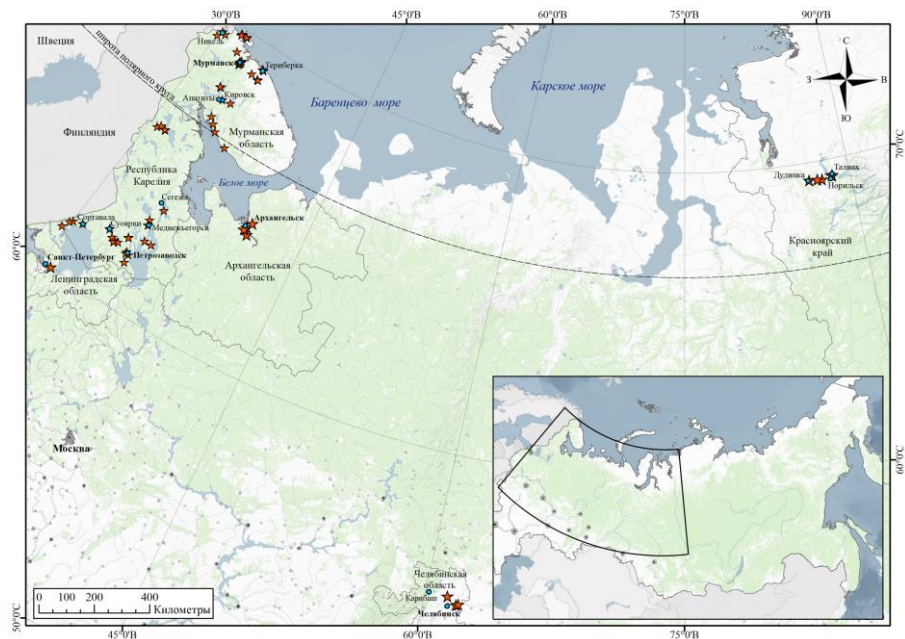


Рисунок 2. Карта расположения изученных озер России (автор М.А. Шестаков)

Полевые работы проводились на озерах, как в период открытой воды, так и со льда. Водные пробы отбирались 2-х литровым пластиковым батометром либо сразу в пластиковые бутылки объемом 1 л. Пробы ДО отбирались при помощи дночерпателей для получения нестратифицированных проб, а также с использованием пробоотборников гравитационного типа: системы Скогхейма и системы Limnos. Последние два прибора позволяют получать стратифицированные ненарушенные колонки (керны) ДО, которые можно разделять на слои от 0.5 см в зависимости от вида дальнейших работ. Чаще всего колонки делились на слои 1-2 см.

После отбора пробы воды и ДО хранились в сумке-холодильнике в полевых условиях и/или в лабораторном холодильнике. Аналитические работы проводились в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (Апатиты) и в Институте геологии Карельского научного центра

РАН (Петрозаводск). Перед анализом пробы отложений просушивались и измельчались. Гранулометрический анализ проводился на многофункциональном анализаторе частиц.

Общий химический состав воды определялся согласно известным методам (Standard method..., 1999; Моисеенко и др., 2002). В пробах воды определялись pH, электропроводность, щелочность, концентрации Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn, Si, N, P, HCO_3^- , SO_4^{2-} и Cl^- и др. параметры. Концентрации микроэлементов (Li, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Lu, Hf, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) определялись при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой на приборе XSeries-2 ICP-MS. На этом же приборе определялись микроэлементы в ДО. Для оценки их валового содержания разложение образцов отложений проводилось путем кислотного вскрытия в открытой системе. Также в ДО определялись содержания главных (породообразующих) элементов при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X и потери при прокаливании (ППП или LOI), характеризующие содержание органического вещества в ДО. В некоторых пробах отложений исследовались формы и состав минеральных частиц при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350. Для определения различных форм нахождения микроэлементов, включая ТМ, использовалась модифицированная методика последовательного экстрагирования форм элементов (Tessier et al., 1979), включающая в себя определение водорастворимых форм, подвижных (обменных) форм, форм, связанных с гидроксидами железа и марганца, форм, связанных с органическим веществом, кислоторастворимых форм и минеральных форм.

В работе также использованы данные по исследованию живых организмов или их останков в озерах Карелии и Мурманской области, полученные в ходе совместных работ с сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (Апатиты), Института геологии КарНЦ РАН и Института биологии КарНЦ РАН (оба – Петрозаводск). Были получены данные по диатомовой флоре, бентосным организмам и ихтиофауне озер урбанизированных территорий Карелии и Мурманской области.

Статистическая обработка данных выполнена при помощи программы Microsoft Excel 2007 и StatPlus Pro. Использован факторный анализ (метод главных компонент). Перед проведением факторного анализа данные для него были преобразованы к нормальному виду по методу Бокса-Кокса. Для графической иллюстрации результатов использованы программы Easy Capture 1.2.0, Inkscape 0.48.4 и другие. Для экологической оценки результатов геохимических исследований рассчитывались следующие индексы: коэффициент концентрации K_c , индекс геоаккумуляции I_{geo} , индекс антропогенной нагрузки PLI, коэффициент биодоступности, или коэффициент подвижности элемента $K_{подв.}$, а также интегральный индекс потенциального экологического риска RI.

Глава 4 «Геохимические особенности современных отложений озер, находящихся под влиянием городской среды». В этом разделе детальное описание геохимии современных отложений озер, расположенных на урбанизированных территориях и в промышленно развитых районах или вблизи них в разных регионах страны, приводится типизация озерных отложений в зависимости от доминирующих антропогенных и природных факторов, определяющих состав микроэлементов в них, анализируется скорость седиментации в озерах городских районов на основе геохимических маркеров. Здесь раскрываются 1 и 2 защищаемые положения.

Анализ содержания главных и микроэлементов в верхних слоях (0-10 см) ДО озер урбанизированных территорий Республики Карелии, Мурманской, Архангельской и Челябинской областей, а также Красноярского края показал (рис. 3), что они имеют схожие геохимические особенности. В первую очередь это касается повышенного уровня по сравнению с кларком, за который принят средний состав верхней части земной коры (Wedepohl, 1995), концентраций Fe (K_c до 2.1), P (K_c до 36.5), V (K_c до 5.8), Ni (K_c до 66.7), Cu (K_c до 148), Zn (K_c до 10), Mo (K_c до 9.5), Cd (K_c до 27.1), Sb (K_c до 23), РЗЭ – (K_c до 8.5), W (K_c до 36), Tl (K_c до 2.7), Pb (K_c до 7.3), Bi (K_c до 21.5) и U (K_c до 55). Таким образом, в осадках городских озер сформированы специфические геохимические аномалии, где ключевую роль играют элементы из группы ТМ (выделены красным пунктиром). Это говорит о существенной роли антропогенного фактора при формировании геохимического облика ДО озер.

Обширный анализ показал, что основными источниками поступления ТМ в отложения исследованных городских озер являются **металлургические предприятия** (Ni, Cu, Co, Cd, Zn), **машиностроительные заводы** (Zn, Cu, Mo, Cr), **мазутные котельные и ТЭЦ** (V, Ni), **угольные ТЭЦ** (Sb, Pb, Cd), **угольный порт** (Sb, Pb, Cd, Ni) и **автомобильный транспорт** (Pb). Важно отметить, что повышенный уровень ТМ и сопутствующих им элементов в ДО озер урбанизированных территорий является отражением аналогичного поведения химических элементов в воде. Обобщенные данные по химическому составу воды в озерах и реках городов Карелии показали (Слуковский и др., 2016), что содержание многих элементов, включая ТМ, превышает их фоновый уровень для региона, а также средние значения элементов в пресных речных водах мира (Томилина и др., 2004; Gaillardet et al., 2013). Анализ химического состава вод озер г. Мурманска позволил установить, что он значительно отличается от химического состава озер фоновых территорий региона (Аннотированный..., 2010). В исследованных озерах наблюдается превышения значений pH, минерализации, концентраций биогенных элементов и ТМ (Слуковский и др., 2023; Postevaya et al., 2023). Существенную роль в миграции элементов в ДО озер играет климат, а точнее ветровой режим: подверженными загрязнению оказываются не только

озера непосредственной городской среды, но и водоемы вблизи урбанизированной территории (это хорошо видно по анализу ТМ в ДО озер в зоне влияния Архангельска, Челябинска и Норильска).

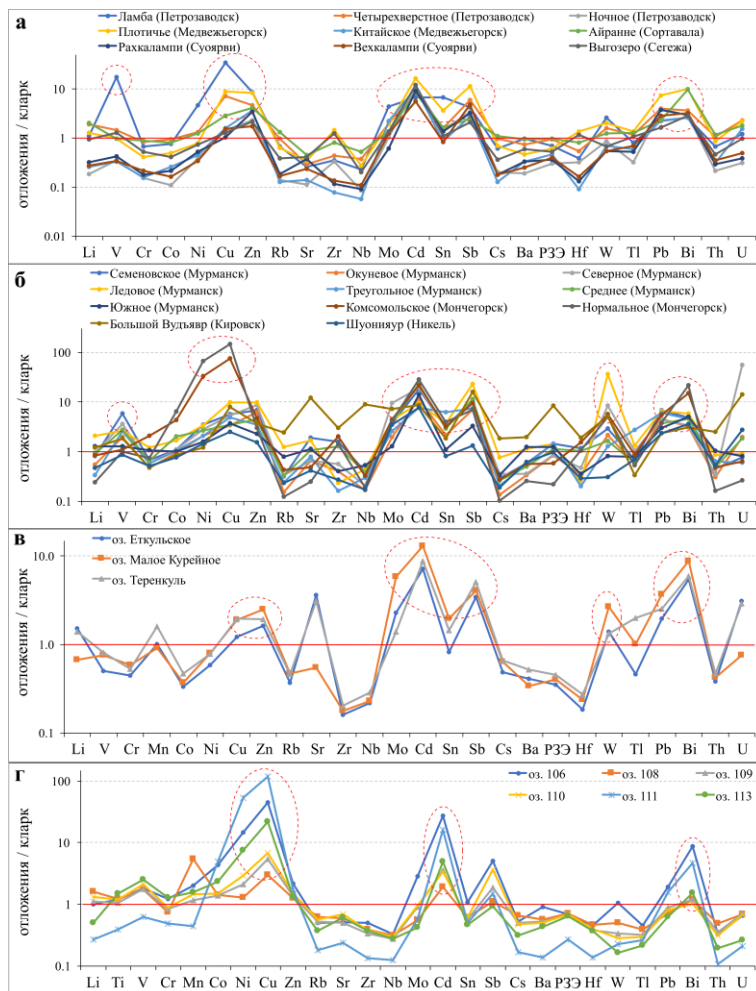


Рисунок 3. Нормированные по кларку содержания элементов в верхних слоях ДО озер городов Карелии (а), Мурманской обл. (б), вблизи г. Челябинска (в) и г. Норильска (г)

На основе данных о фоновых концентрациях элементов в изученных ДО регионов России, также рассчитаны коэффициенты концентрации (табл. 1). Они дают аналогичное представление о загрязнении изученных городских озер.

Таблица 1 – Геохимические ассоциации ТМ в ДО озер урбанизированной среды разных регионов РФ (значения в скобках – величины Кс для отдельно взятого элемента). Со-
кращения: Пгз – Петрозаводск, Мдв – Медвежьегорск, Суо – Суоярви, Сор – Сортавала,
Мур – Мурманск, Мнч – Мончегорск, Кир – Кировск

Название озера	Формула геохимической ассоциации ДО	
	$K_{\Sigma} \geq 10$	$10 > K_{\Sigma} \geq 5$
Республика Карелия		
Ламба (Пгз)	V(52)-Sn(28)-Cu(26)-Ni(11)	Sb(8)-W,Pb(7)-Zn(6)-Cr(5)
Четырехверстное (Пгз)	Pb(13)-Sb(11)	Sn,Cr(6)-Cu(5)
Ночное (Пгз)	Pb(12)	Sb,Sn(6)
Плотичье (Мдв)	Pb(24)-Sb(21)-Sn(15)-Bi(12)	Cu(7)-Zn,W(6)-Tl(5)
Китайское (Мдв)	-	Pb(7)-Sb(5)
Рахкалаппи (Суо)	Pb(12)	Sb,Sn(6)
Вехкалаппи (Суо)	-	Pb,Sb(9)
Айранне (Сор)	Bi(11)	Pb,Sn(7)-Cr(6)-Tl(5)
Выгозеро (Сор)	-	Pb(6)-Sn(5)
Мурманская область		
Семеновское (Мур)	Sb(34)-Pb(12)-V(11)-W,Ni(10)	Sn,Cd(7)-Zn,Bi,Cu(6)-Co(5)
Окуновое (Мур)	Sb(22)	Pb(8)-W(7)-Zn,Ni(6)-Sn(5)
Северное (Мур)	Sb(30)-W(29)	Pb,Zn,Ni,Sn(8)-Cd,V(7)-Cu(6)-Co(5)
Ледовое (Мур)	W(123)-Sb(73)-Pb(12)-Cu(10)	Zn,Ni,Sn(9)-Co(8)-Bi(7)-V(5)
Среднее (Мур)	Sb(36)	Co,Cd(9)-Ni,Pb,Sn(7)-Bi,W(6)-V(5)
Южное (Мур)	Sb(10)	Bi(6)-Cd,Pb(5)
Треугольное (Мур)	Sb(24)-Sn(15)-Pb(11)	Tl(7)-Bi,Ni(6)-Cu,V,Co(5)-W(4)
Комсомольское (Мнч)	Ni(90)-Cu(79)-Sb(31)-Co(20)- Bi(19)-W(19)-Pb(10)	Cd,Cr(8)-Sn(7)
Нормальное (Мнч)	Ni(184)-Cu(155)-Co(29)-Bi(27)- W(17)-Cd(11)	Sn(9)-Pb(7)
Большой Вудъявр (Кир)	Sb(51)-W(18)	Cu(8)
Район г. Архангельска		
Бутыгино	-	W(8)-Sb(7)-Pb(5)
Сорожье	Pb(13)-Sb(10)	-
Опогра	-	Pb,Sb(5)
Район г. Челябинска		
Еткульское	-	Sb(6)
Малое Курейное	-	Pb,W(8)-Sb(7)-Cd,Sn,Bi(6)
Теренкуль	-	Sb(9)-Tl(6)-Pb(5)
Района г. Норильска		
оз. № 106	Bi(17)-Cu,Cd(16)-Ni(11)	Mo(6)-Sb(5)
оз. № 111	Cu(43)-Ni(40)-Cd(10)	Bi(9)
оз. № 113	-	Cu(8)-Ni(6)

Анализ полученных геохимических ассоциаций ТМ (табл. 1) позволил выявить приоритетные загрязнители окружающей среды для исследованных водных объектов. Так V, Pb, Sb, Sn, Bi с $K_c \geq 10$ являются приоритетными загрязнителями озер городов Республики Карелии, Sb, Pb, V, W, Ni, Pb, Cu ($K_c \geq 10$) – озер городов Мурманской области, Pb и Sb с $K_c \geq 5-10$ – озер г. Архангельска, Sb, Pb, Pb, Bi ($K_c \geq 5$) – озер г. Челябинска, а Cu, Ni, Bi, Cd ($K_c \geq 10$) – озер импактной зоны Норильского промышленного района (г. Норильск) (табл. 1). Таким образом, несмотря на разность климатических, геологических и гидрологических условий, в которых образовались и существуют исследованные озера и их ДО, указанные элементы имеют общий тренд накапливаться в осадках под влиянием антропогенных факторов, имеющих близкую специфику.

О влиянии антропогенных факторов на озера урбанизированных районов можно судить по характеру вертикального распределения ТМ в колонках современных ДО (палеолимнологический подход). В исследованных городских водоемах отмечается увеличение концентраций химических элементов, в том числе загрязнителей окружающей среды, от нижних слоев, сформированных в доиндустриальное время, к верхним, сформировавшимся под влиянием антропогенных факторов, описанных выше. Например, подробный анализ колонки ДО оз. Ламба (Петрозаводск), расположенного вблизи ТЭЦ, выявил тенденцию к увеличению концентраций ТМ, включая Pb (до 137 мг/кг, при фоне – 4), Cd (1.2, 0.2), Ni (607, 22), V (4785, 17), Cr (179, 10), Cu (1189, 45), Zn (963, 136) и др. В Мурманской области, в колонке современных ДО оз. Комсомольского зафиксирована динамика повышения концентраций в верхних слоях ДО по сравнению с нижними Ni (до 2140 мг/кг, при фоне – 20), Cu (2607, 24), Cr (335, 33), Co (129, 5), V (140, 51), Pb (100, 8), Cd (2.5, 0.3), Sb (до 3.3, 0.1) и др. Аналогичные закономерности установлены и для других урбанизированных территорий России, что хорошо видно на рис. 4 на примере оз. Семеновского (Мурманск), оз. б/н № 111 (Норильск) и оз. Еткульского (Челябинск). При этом на всех исследованных городских территориях отмечается, что максимальные концентрации ТМ в почве ниже, чем аналогичные значения для ДО озер, что является следствием обогащения ДО озер загрязнителями за счет миграции их в системе «источник-почва-вода-ДО» (Li et al., 2012).

Геохимические маркерные элементы (V, Ni, Cu), связанные с локальными выбросами определенных предприятий – от мазутных котельных и ТЭЦ или металлургических заводов, время работы которых хорошо известно, а также в ряде случаев удельные активности ^{210}Pb и ^{137}Cs , позволили при анализе колонок ДО озер урбанизированных территорий определить скорости седиментации в изучаемых озерах. Установлено, что средняя скорость седиментации в озерах городов Карелии варьирует от ~2 до ~5 мм/год, в озерах городов Мурманской области – от ~1.5 до ~3.8 мм/год, а в озерах в импактной зоне г. Архангельска – до ~5 мм/год. Полученные данные в 5 раз и более превышает среднюю скорость седиментации (до 1 мм/год) на территории Северо-Запада России (Rognerud et

al., 2000; Субетто, 2009; Даувальтер, 2012; Slukovskii et al., 2025). Явление ускоренного седиментогенеза, связанного с антропогенной деятельностью, ранее отмечалось на примере исследования озер Татарстана и Южного Урала, а также рек и каналов Санкт-Петербурга (Иванов и др., 2011; Spiro et al., 2013; Опекунов и др., 2017).

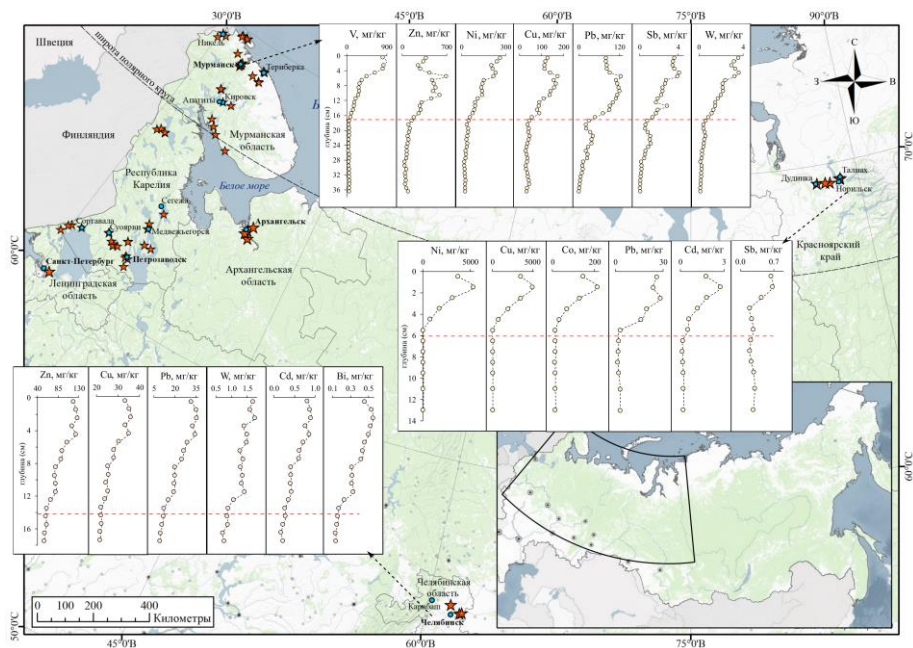


Рисунок 4. Карта района исследования с графиками вертикального распределения концентраций ТМ в современных ДО озер некоторых городских территорий РФ

Более высокие скорости седиментации в озерах урбанизированной среды по сравнению с фоновыми районами связаны с высоким уровнем эрозийных процессов на водосборе городских озер и, как следствие интенсификацией поступления терригенного материала, а также со значительным вкладом техногенной пылевой нагрузки (Масленникова и др., 2014). Геохимическими индикаторами этих процессов является поведение главных (породообразующих) элементов и литофильных микроэлементов, чьи концентрации увеличиваются в верхних слоях ДО озер урбанизированных территорий аналогично с ТМ. В частности, отмечается тенденция роста содержаний РЗЭ в современных осадках озер Мурманска, Мончегорска, Петрозаводска, Суоярви и Медвежьегорска (рис. 5). При этом на фоновых территориях такой закономерности накопления РЗЭ и других литофильных элементов не отмечено (Slukovskii et al., 2022). В то же время, на

территориях городов обнаружена хорошая корреляция между ключевыми загрязнителями ДО озер и содержанием РЗЭ. Например, в ДО озер г. Мурманска РЗЭ коррелируют с V (0.70), Cr (0.75), Co (0.71), Cu (0.72), Zn (0.72), Pb (0.69) и рядом других ТМ. Таким образом, РЗЭ и другие литофильные элементы могут быть маркерами антропогенного влияния на озера городской среды.

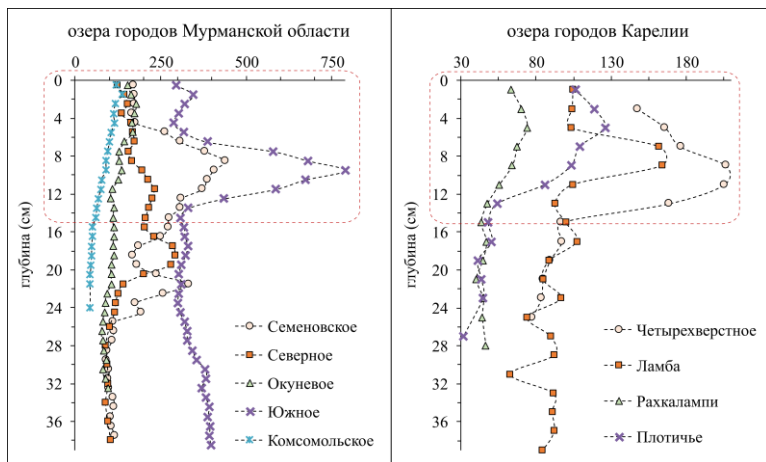


Рисунок 5. Вертикальное распределение концентраций (в мг/кг) РЗЭ в ДО городских озер Мурманской области и Республики Карелии

Эколого-геохимические исследования поведения РЗЭ в окружающей среде показывают, что главный агент-носитель их поступления в объекты окружающей среды городов – это пыль, которая образуется в результате активного освоения территорий в результате строительства сооружений и дорог, а также разрушения пород и почвенного покрова (Faruque, Hawa, 2007; Liu et al., 2019). Косвенным свидетельством существенной роли городской пыли на геохимию изучаемых современных отложений является рост значений pH, отмечаемый в колонках ДО озер на территории городов Карелии и Мурманской области. Отмечается, что городские антропогенные отложения дорог и дворовых территорий зачастую имеют слабощелочную реакцию, а также повышенное содержание микроэлементов (Селезнев и др., 2017).

Анализ факторных моделей, построенных на основе данных по микроэлементам в колонках современных ДО исследованных озер урбанизированных территорий, позволил установить наиболее значимые факторы, влияющие на формирование их геохимического облика. Например, для крупнейших городов Мурманской области и Республики Карелии с наиболее значимым фактором 1 (66.7% и 56.5% от вклада всех факторов модели) тесно связан большой спектр элементов, включающий, как ТМ (V, Cr, Ni, Cu и др.), так и РЗЭ, щелочные и

щелочноземельные металлы, Zr, Nb, U и Th (рис. 6). Здесь также отмечается отрицательная корреляция фактора 1 с глубиной слоев залегания отложений. Таким образом, фактор 1 (основной фактор) – это фактор времени образования отложений или палеолимнологический фактор. Элементы, которые связаны с ним, накапливались в современное время развития озер по единому принципу (механическое оседание), несмотря на зачастую различные источники их поступления в водную среду.

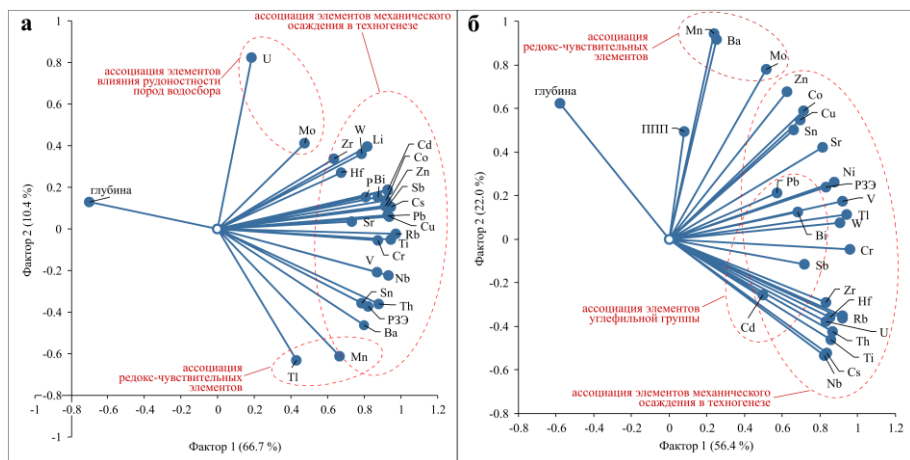


Рисунок 6. Факторная модель (представлены наиболее значимые факторы) накопления микроэлементов в современных ДО озер городов Мурманска (а) и Петрозаводска (б)

Среди других существенных факторов, под воздействием которых формируется химический состав отложений озер урбанизированных территорий следует отметить фактор специфических геохимических связей в отложениях, в том числе фактор редокса, в первую очередь из-за Mn, который известен своей чувствительностью к изменениям окислительно-восстановительных условий в водной среде (Даувальтер, Ильяшук, 2007; Юдович, Кетрис, 2011). Вместе с Mn чувствительными к изменению редокса в исследованных озерах являются Tl, Mo, U, PЗЭ, что отмечается тесными корреляционными связями между элементами. Описанные тенденции установлены и для озер городских территорий Северо-Запада России (рис. 6), и для озер в импактной зоне г. Челябинска (рис. 7). В озерах обоих районов отмечена также связь между Mn и Ba. Второй элемент хоть и не является редокс-чувствительным (Юдович, Кетрис, 2011), но его часто отмечают в составе железомарганцевых образований ДО водоемов разных уровней (Велизер и др., 2012; Астахова, 2019). В частности, в ДО пресноводных водоемов Ba может встречаться в форме минерала голландита $MnBaMn_6O_{14}$, куда входит и Mn (Мартынова, 2012).

Специфическое поведение в озерах городских районов Севера России и Южного Урала наблюдается для U, Mo и V, которые в ряде случаев поступают в водоемы и их отложения от пород водосбора, имеющих рудную минерализацию по указанным металлам. Например, самый высокий уровень накопления U был отмечен в оз. Северном, расположенном в импактной зоне г. Мурманска: содержание U колеблется от 77 до 204 мг/кг, что превышает кларк в 59-157 раз (Слуковский и др., 2020). Источником U в отложениях озера являются породы водосборной площади.

Кроме того, к западу от Мурманска разведаны месторождения и рудопроявления Лицевского урановорудного района (Каулина и др., 2021).

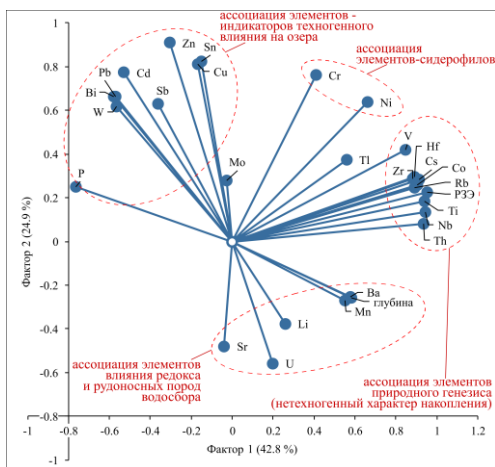


Рисунок 7. Факторная модель (представлены два наиболее значимых фактора) накопления микроэлементов в современных ДО озера импактной зоны г. Челябинска

Глава 5 «Техногенез на фоновых территориях». Проводится анализ поведения микроэлементов в озерах фоновых районов Севера и Арктики России на примере водоемов Республики Карелии и Мурманской области, приводятся примеры аномальных концентраций ТМ в верхних слоях отложений озера, связанных с влиянием техногенного фактора, а также влияния горных пород водосборных площадей озера. Также в этой главе описывается процесс расчета фоновых концентраций микроэлементов в ДО озера всех выбранных для исследования регионов и раскрывается 2 и 3 защищаемые положения.

На фоновых территориях, удаленных от прямых источников загрязнения и крупных транспортных узлов, в современных слоях ДО озера наблюдается единая тенденция накопления Pb, Cd, Sb, Bi, Tl, Sn (рис. 8), а также по всей территории Мурманской области и севера Карелии – Ni и Cu, что вызвано процессом дальнего атмосферного переноса загрязнителей. При этом большинство ТМ, участвующих в дальнем переносе через атмосферу обезличены – невозможно установить конкретный источник, особенно если речь идет о длительном историческом процессе сжигания угля (Pb, Cd, Sb, Bi, Tl, Sn), охватывающем два-три века. Исключением является накопление Ni и Cu, агентов влияния металлургических предприятий на территории Кольского севера. Между всеми уг-

лефильными элементами, агентами дальнего атмосферного переноса, отмечается тесная корреляционная связь. Наиболее тесная связь ($r > 0.70$) отмечается между концентрациями Pb и Sb в современных отложениях озер фоновых территорий Карелии и Мурманской области. Также высокая степень связи установлена в парах Sb-Bi, Bi-Sn, Pb-Bi и Cd-Pb.

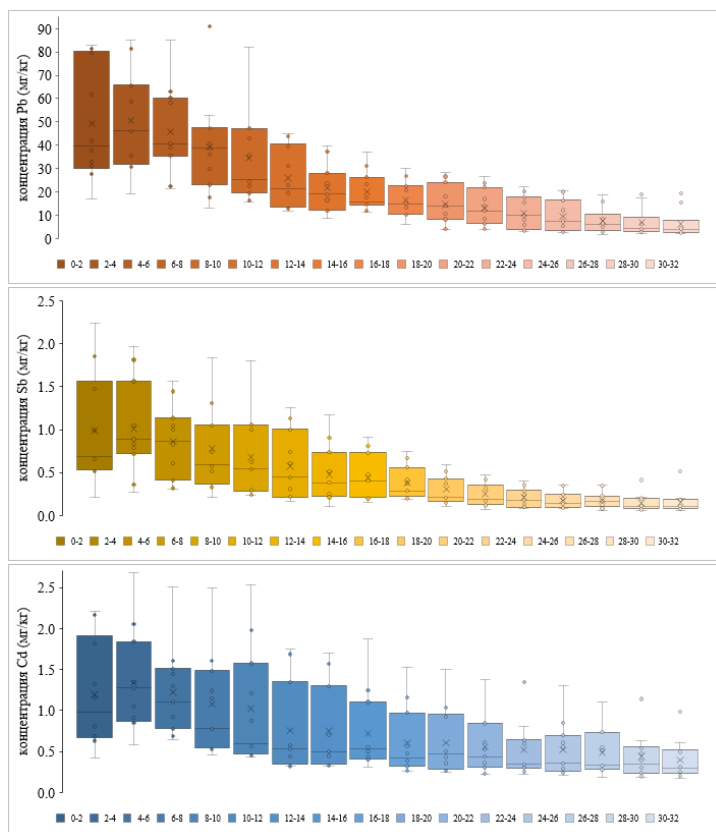


Рисунок 8. Содержания Pb, Sb и Cd в колонках ДО озер фоновых районов Карелии. Показан разброс значений, включая экстремумы, по каждому слою от 0 до 32 см (слева направо), а также средние значения (x) и медианы (—)

Все указанные выше элементы являются приоритетными загрязнителями также для озер урбанизированных территорий (табл. 1). Это доказывает, что процесс дальнего атмосферного переноса сказывается и на городских водоемах, что хорошо видно по единым трендам накопления Pb и Sb в изученных современ-

менных ДО озер с разным уровнем антропогенной нагрузки (рис. 9). Выбывающие области, куда попали наиболее загрязненные слои ДО озер урбанизированных территорий Карелии (рис. 9а) и Мурманской области (рис. 9б), объясняются тем, что на городских территориях присутствует сильный второй фактор повышенных значений Pb (выбросы автотранспорта), а также тем, что в городах выше поток веществ в озеро в целом. Следует также отметить слабую связь между Pb и Sb в отложениях озер г. Норильска. Это следствие слабого влияния дальнего атмосферного переноса веществ на озеро в сибирской части Арктической зоны РФ (Удачин и др., 2013). Также в Мурманской области выявлены повышенные концентрации Sb при средних содержаниях Pb в современных ДО оз. Большой Вудъявр, расположенном вблизи угольной ТЭЦ (Dauvalter et al., 2022). Аналогичное явление характерно для геохимии каменных углей и продуктов из сгорания (Юдович, Кетрис, 2005)

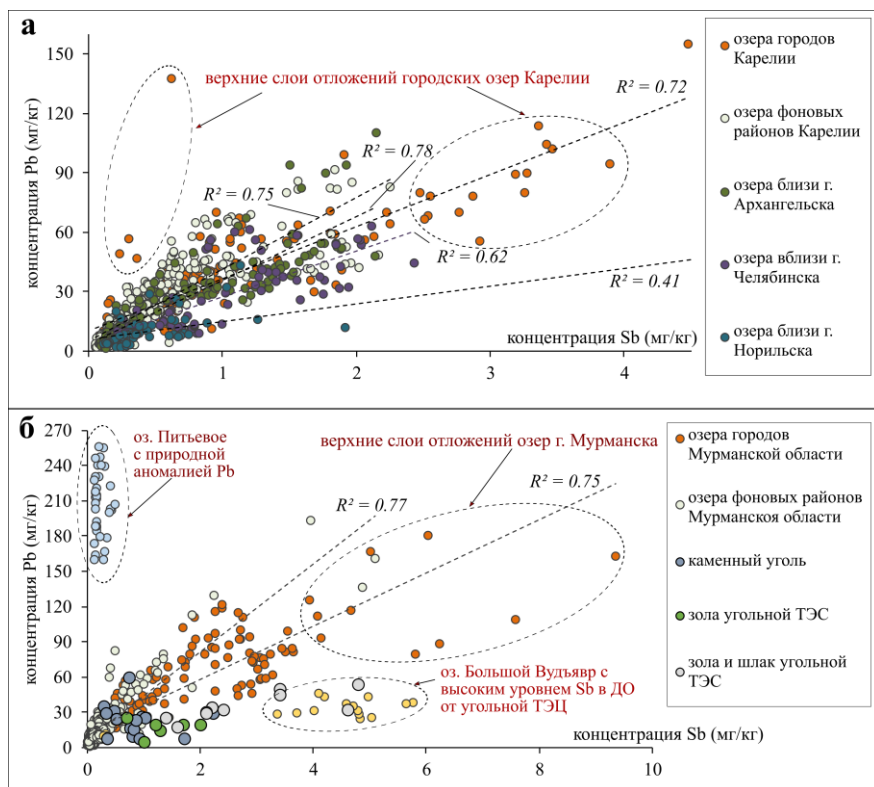


Рисунок 9. Соотношение концентраций Pb и Sb в ДО озер урбанизированных территорий в сравнении с данными по фоновым районам

Дальний атмосферный перенос также не проявляется по Pb при природных аномалиях этого металла, что было установлено в ДО оз. Питьевого на севере Мурманской области (Slukovskii et al., 2024) (рис. 96). При этом, накопление Sb, Bi, Tl и других агентов дальнего переноса загрязнителей установлено в водоеме в соответствии с общим трендом для большинства озер фоновых территорий (рис. 8). По описанным тенденциям увеличения концентраций углефилльных элементов в современных ДО озер (рис. 10), были выделены слои осадков для расчета геохимического фона по каждому региону. Исследования показали, что фоновые концентрации большинства элементов по всем регионам оказались ниже кларковых значений. Исключения составили концентрации Cd, так как этот металл хорошо накапливается в ДО озер в отличие от первоначальных пород (Страховенко, 2011), а также по отдельным водоемам и районам исследования – U, Mo, V, Cu, Ni, Nb, Zr, РЗЭ и другие элементы, связанные с доминирующим влиянием рудоносных пород водосборной площади. При этом, указанный процесс одинаково хорошо проявляется и на фоновых территориях, и в зонах интенсивной техногенной нагрузки, включая урбанизированные территории.

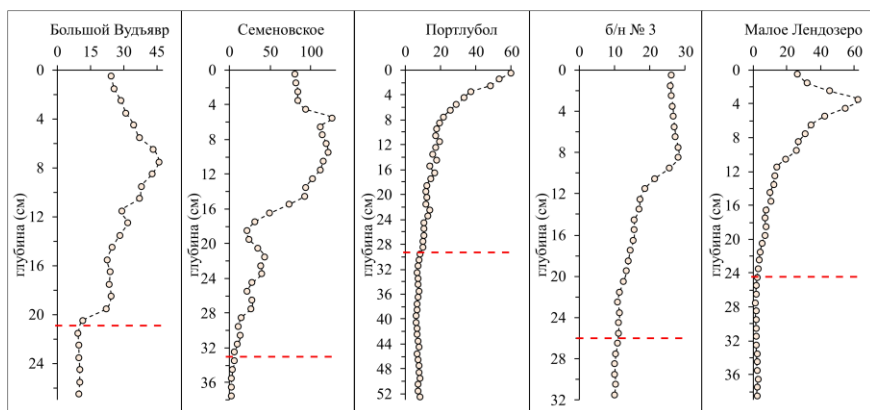


Рисунок 10. Примеры вертикального распределения концентраций Pb в колонках ДО озер Мурманской области. Красная линия – граница фон-антропогенное влияние

Отложения озер фоновых районов в большей степени, чем городские озера, наследуют влияние местной геологии. Это особенно хорошо проявляется в закрытых геосистемах, к которой относится район о-ва Кинг-Джордж (Антарктика), где антропогенное влияние сведено к минимуму, а ДО озер полностью наследуют специфику петрофона (Слуковский, Гузева, 2024). В отложениях изученных ДО озер и пород Кинг-Джорджа отмечены единые тренды накопления РЗЭ, а также схожие геохимические аномалии, например, по V, который

активно накапливается в основных магматических породах (габбро и базальтах), распространенных на острове (Скляр и др., 2001).

На примере исследования отложений озер разных районов Мурманской области выделяется тренд снижения концентраций микроэлементов на примере РЗЭ в ДО озер от тундровых водоемов к озерам, расположенным в зоне лесотундры и тайги (рис. 11). Таким образом, демонстрируется существенное влияние климатических и ландшафтных факторов на накопление литофильных элементов в отложениях озер, к которым относятся Sc, Y и лантаноиды. Во многом показанная тенденция обусловлена высоким содержанием органического вещества в озерах, расположенных в тайге. В лесных зонах обычно встречаются органические или органоминеральные осадки. Эти типы ДО, как правило, имеют более низкие концентрации редкоземельных элементов по сравнению с осадками минерального типа, которые характерны для территорий с бедной растительностью (Страховенко, 2011). Рис. 11 также иллюстрирует, что озера городских территорий (на примере озер Мурманска) имеют широкий диапазон колебаний концентраций РЗЭ, а их максимальные значения и медиана находятся на уровне медианных концентраций РЗЭ в отложениях тундровых озер, хотя Мурманск находится в зоне лесотундры.

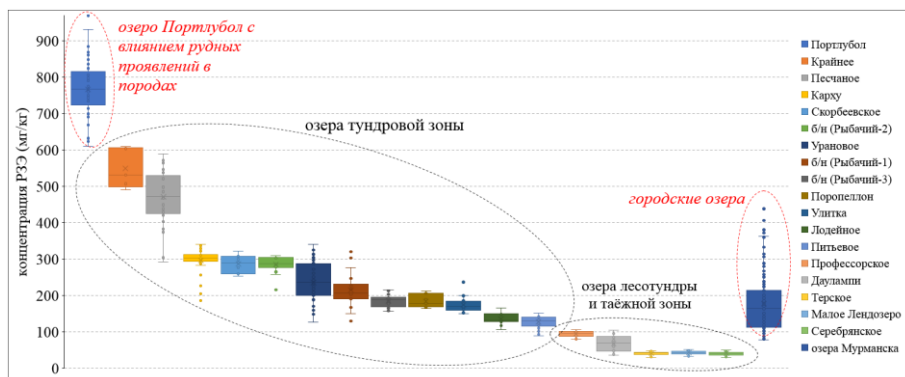


Рисунок 11. Вертикальное распределение концентраций (в мг/кг) редкоземельных элементов в отложениях городских озер Мурманской области и Республики Карелии

Исключениями из показанной выше тенденции по накоплению РЗЭ выступают не только загрязненные ДО озер урбанизированных территорий, но и отложения водоемов, расположенных в зоне влияния рудных проявлений в породах водосбора. Это хорошо показано на примере оз. Портлубол (рис. 11), концентрации РЗЭ в ДО которого существенно превышают кларк и фоновый уровень для региона из-за того, что водоем находится в пределах Лицевского ура-

новорудного района, где кроме повышенных содержаний U в породах установлены аномалии Mo и PЗЭ (Slukovskii et al., 2025). Аналогичное явление природной аномалии PЗЭ в следствие рудоносности пород водосборной площади отмечено также на севере Карелии (Slukovskii et al., 2025). Кроме PЗЭ, в исследованных ДО озер также были установлены необычные аномально высокие концентрации Ti, V, Cr, Co и Th, что несвойственно озерам фоновых территорий Северо-Запада России (рис. 13). Анализ геологии района исследований показал, что водоемы находятся в зоне распространения архейской тоналит-трондьемит-гранодиоритовая ассоциации, породы которой обогащены различными элементами, включая Cr, Ni, Rb, PЗЭ и другие (Чекулаев и др., 2021). При этом в вертикальном разрезе осадочной толщи PЗЭ, несмотря на аномальный уровень накопления, имеют тенденцию к увеличению к более глубоким слоям, то есть ранее образованным, что подчеркивает их природное происхождение. ТМ в этих же колонках отложений, наоборот, накапливаются более интенсивно в современных слоях, согласуясь с антропогенным влиянием на озера фоновых районов в результате дальнего переноса загрязнителей.

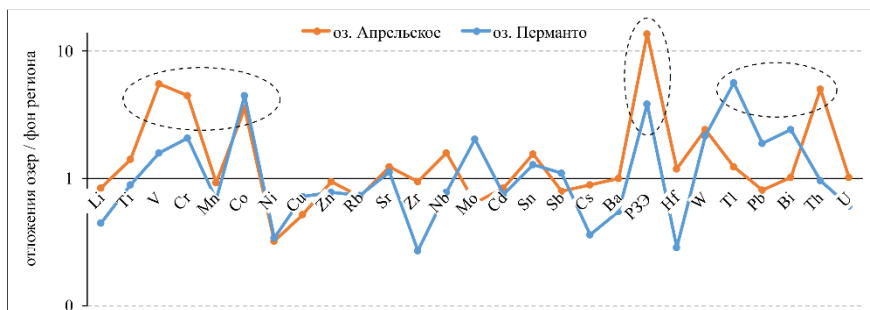


Рисунок 12. Нормализация концентраций элементов в изученных ДО по геохимическому фону для Карелии. Все значения представлены в логарифмической шкале

Глава 6 «Оценка доминирующего типа влияния на озера урбанизированных территорий и фоновых районов». В разделе представлено обобщение геохимических исследований по разного рода влиянию на озера урбанизированных и фоновых территорий. Здесь проводится дополнительное пояснение по 2 и 3 защищаемым положениям.

На основе проведенных исследований предложено обобщенное классифицирование ключевых геохимических индикаторов природного и техногенного влияния на ДО озер (табл. 2). Выделены две большие группы: локального и дальнего воздействия на озера и образования геохимических аномалий в отложениях. Локальное антропогенное влияние связано с загрязнением озер урбанизированных территорий от заводов, ТЭЦ и котельных, порта и других источников, расположенных в непосредственной близости к водоемам. Кроме того, к этому

типу воздействия относится пылевая нагрузка, вызванная ускоренными эрозийными процессами в городах. Локальное природное влияние иллюстрируется доминирующей ролью рудоносных пород водосбора на геохимию ДО озер разных районов и типов.

Таблица 2 – Классификация элементов, индикаторов природного и техногенного влияния на озера урбанизированных и фоновых районов

Тип	Подтип	Основные индикаторы	Статус озер
Локальное антропогенное влияние	Влияние промышленных объектов и транспорта	V, Ni, Cu, Co, Cd, Zn, W, Pb	Городской Городской (импактная зона урбанизированной территории)
	Влияние ускоренных эрозийных процессов (пылевая нагрузка)	PЗЭ, Li, Rb, Cs, Nb, Zr, Hf, U	
Локальное природное влияние	Влияние рудоносных пород	U, Mo, V, PЗЭ, Th, Zr, Nb, Pb, Zn, Cd	Городской Городской (импактная зона урбанизированной территории) Фоновый
Дальнее техногенное влияние	Трансграничный (неидентифицируемый) перенос	Pb, Sb, Cd, Bi, Sn, Tl	Городской Городской (импактная зона урбанизированной территории) Фоновый
	Дальний перенос локального (идентифицируемого) характера	Ni, Cu	
Дальнее природное влияние	Эоловый перенос	PЗЭ, Li, Rb, Cs, Sr, Zr, Th	Фоновый

Другая группа индикаторов – это дальнее (преимущественно атмосферное) техногенное и природное воздействие на озера с образованием в современных ДО геохимических аномалий. В первом случае, речь идет об эффекте дальнего переноса загрязнителей от антропогенных источников, причем часто эти источники неидентифицируемы, кроме случаев влияния местных металлургических заводов. Во втором случае подразумевается эоловый перенос, способный влиять на повышенный уровень ряда элементов в современных ДО озер фоновых территорий.

Далее предложена новая схема типизации современных ДО озер разных районов на основе анализа соотношения сумм концентраций элементов-индикаторов трех основных типов влияния на озера урбанизированной среды (рис. 13):

- загрязнители локального антропогенного влияния (подтип влияния промышленных объектов и транспорта) – V, Ni и/или Cu;
- загрязнители локального антропогенного влияния (подтип влияния ускоренных эрозийных процессов) – PЗЭ и щелочные металлы;

- загрязнители дальнего техногенного влияния (подтип трансграничного переноса (угольная группа)) – Pb, Cd, Sb.

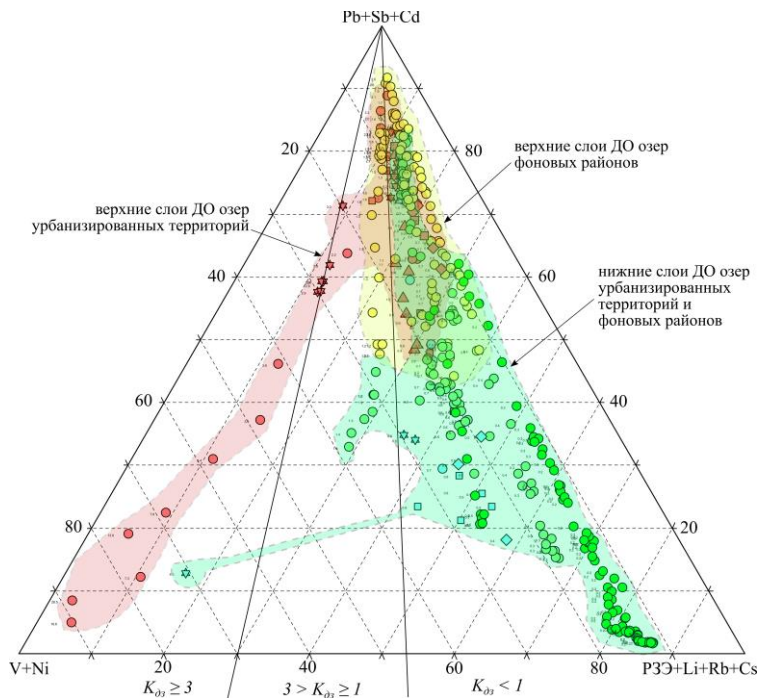


Рисунок 13. Треугольная диаграмма соотношения концентраций V+Ni, Pb+Sb+Cd (увеличено в 10 раз) и P3Э+Li+Rb+Cs в ДО озер Карелии

В дополнение к схеме типизации предложен также специальный коэффициент доминирующих загрязнителей, рассчитываемый по формуле: $K_{дз} = \frac{\sum C_{тм}}{\sum C_{лэ}}$, где $C_{тм}$ – это сумма концентраций элементов, тяжелых металлов (тм), индикаторов антропогенного локального (подтип промышленных объектов и транспорта) и дальнего влияния на озеро, а $C_{лэ}$ – сумма концентраций элементов-литофилов, индикаторов локального антропогенного (подтип влияния ускоренных эрозионных процессов).

По графику видно, что доминирующую роль в формировании геохимического облика ДО озер урбанизированных территорий Карелии играют локальные загрязнители в виде мазутных ТЭЦ, а также дальний атмосферный перенос загрязнителей. Преимущественно для ДО городских озер зафиксировано значение $K_{дз}$

≥ 3 и/или 1 до 3. Для озер фоновых территорий $K_{дз} < 1$. На территории Мурманской области локальные источники загрязнения из-за влияния металлургических предприятий играют чуть большую роль, чем это проявлено в Карелии (рис. 14). Для ДО озер урбанизированных территорий тут свойственна тройственная природа антропогенной нагрузки – значительными являются в разной степени все типы нагрузки на водоемы. Значения индекса $K_{дз} \geq 3$ также преимущественно характерно для озер урбанизированных территорий с доминирующей ролью локального техногенного влияния. При этом значение $K_{дз} < 1$ может относиться в Мурманской области и к фоновым озерам, и к озерам городских территорий, где накопление РЗЭ связано не только с пылевой нагрузкой на водоемы, но и с выбросами местных промышленных предприятий (оз. Большой Вудъявр). Чуть более прощще иллюстрируется поведение разных элементов в озерах фоновых районов Мурманской области, где преимущественно на формирование геохимического облика ДО сказываются процессы дальнего атмосферного переноса (техногенные факторы) и влияние особенностей геологии района.

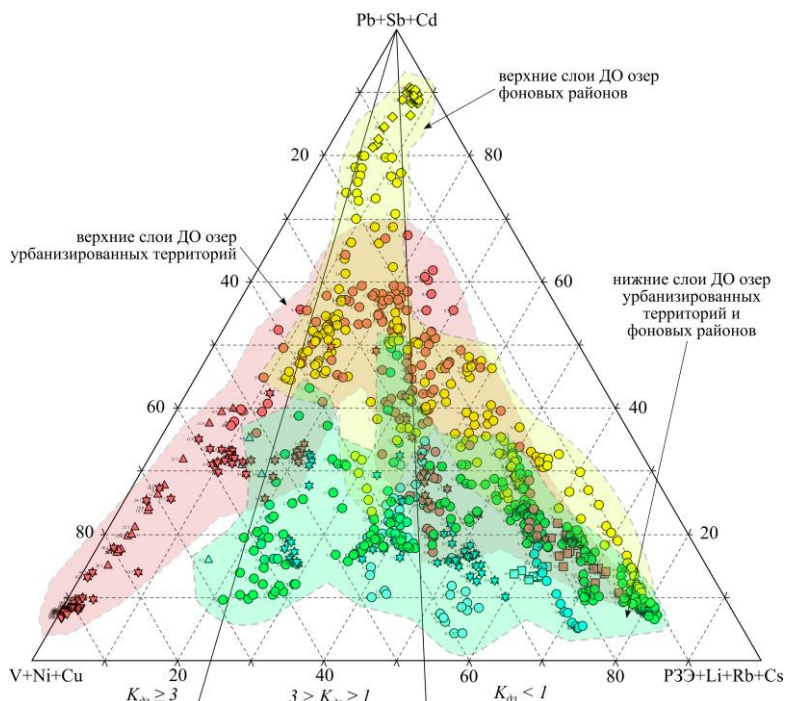


Рисунок 14. Треугольная диаграмма соотношения концентраций V+Ni, Pb+Sb+Cd (увеличено в 10 раз) и PЗЭ+Li+Rb+Cs в ДО озер Карелии

Глава 7 «Экологическая интерпретация геохимических данных при исследовании озер урбанизированных территорий». Здесь представлены результаты экологической интерпретации геохимических данных об озерах на основе расчета экологических индексов по 14 элементам (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Tl, Pb и Bi), входящих в группу ТМ, учитывая их уровень токсичности для биоты и востребованности анализа их концентраций при эколого-геохимических работах, в том числе интегральных индексов PLI и RI , приводится анализ поведения диатомовых водорослей и бентосных организмов в загрязненных городских озерах и их связь с антропогенным воздействием на водоемы. В этом разделе раскрывается 4 защищаемое положение.

В результате анализа данных по расчету индекса I_{geo} по разным озерам разных регионов можно проследить эволюцию эколого-геохимических особенностей ДО озер (рис. 15).

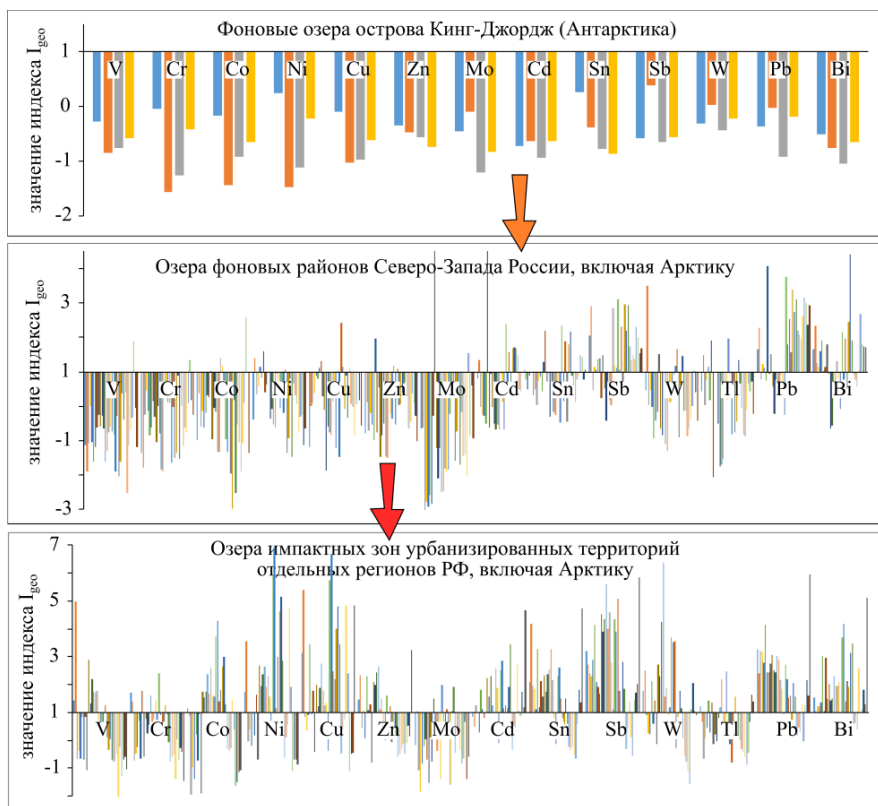


Рисунок 15. Тенденция эколого-геохимической эволюции ДО озер разных районов на примере изменений значений индексов I_{geo} верхних слоев осадков изученных водоемов

Фоновые озера Антарктики характеризуются существенной чистотой (рис. 15), что связано с отсутствием прямых источников загрязнения, удаленностью от сильного влияния процесса дальнего переноса и слабой техногенной историей южного полушария Земли (Lin et al., 2021). Озера фоновых районов Северо-Запада РФ также расположены на отдалении от прямых источников загрязнения, но эти водоемы более уязвимы для влияния процесса дальнего переноса, учитывая длинную индустриальную историю Северного полушария планеты (Расуна, Расуна, 2001; Niu et al., 2020). Поэтому здесь отмечаются повышенные значения индексов I_{geo} по преимущественно элементам угольной группы. Более специфичная картина по значениям индекса I_{geo} отмечается в ДО озер урбанизированных территорий. Осадки этих озер имеют сильный уровень загрязнения не только по элементам угольной группы, но и по V, Cr, Co, Ni, Cu, W, которые маркируют влияние локальных источников антропогенной нагрузки на озера. Только доиндустриальные слои ДО этих озер характеризуются отсутствием загрязнения, верхние – приняли на себя отпечаток техногенного наследия последних двух-трех столетий истории планеты.

Анализ данных, полученных при расчете интегрального индекса PLI, показал, что во многих исследованных озерах урбанизированных территорий ДО имеют высокий и экстремально высокий уровень загрязнения ($PLI > 2$). Самыми загрязненными озерами являются озера импактных зон городов Карелии, Мурманской области и Норильска (рис. 16).

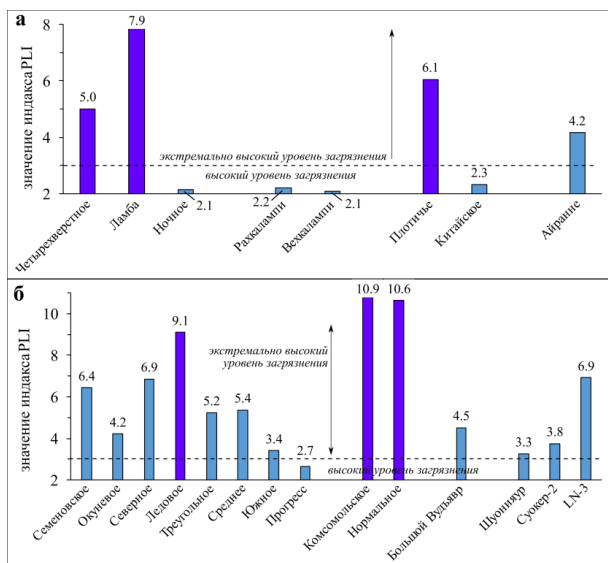


Рисунок 16. Значения индексов PLI для верхних слоев (0-10 см) современных ДО озер урбанизированных территорий Республики Карелии (а) и Мурманской области (б)

Исследования также выявили, что данные, полученные по индексу потенциального экологического риска RI, хорошо коррелируют со значениями индекса PLI для всех районов городского влияния на озера (рис. 17). Таким образом, более загрязненные слои ДО озер урбанизированных территорий имеют и больший потенциал для экологического риска, то есть негативного воздействия на биоту (Förstner, 1976; Kong et al., 2015). Например, в оз. Ламба (Петрозаводск) за счет исторического влияния мазутной ТЭЦ уровень экологического риска по RI превышает 600, что считается экстремальным уровнем. Также аномально высокие значения индекса RI (от 600 до ~1500) отмечены в самых верхних (0-3 см) слоях изученных ДО озер Норильского промышленного района. При этом во всех случаях озер урбанизированных территорий нижние (доиндустриальные) слои ДО имеют низкий уровень экологического риска ($RI < 150$).

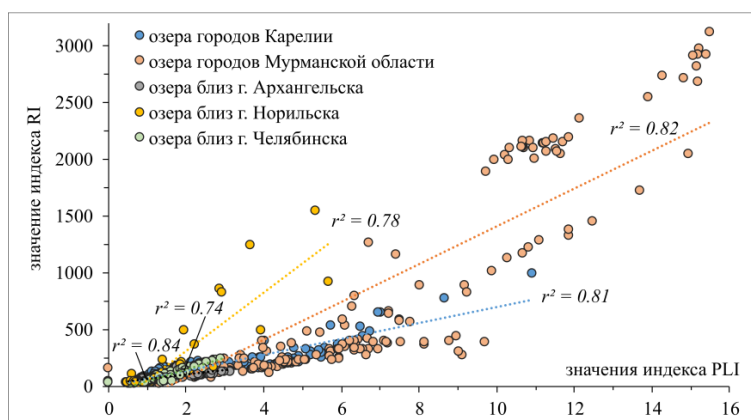


Рисунок 17. Корреляция между значениями индексов PLI и RI, рассчитанных для разных слоев ДО озер урбанизированных территорий разных районов России

Исследования диатомовых комплексов и бентосных организмов озер городов Карелии и Мурманской области показали, что общий уровень загрязнения, маркируемый по геохимии современных отложений, сказывается на гидробионтах. В частности, воздействие ТМ и других загрязнителей на экосистемы городских озер приводит к полной перестройке структуры диатомового комплекса водоема (рис. 18). В частности, в нижних слоях колонок ДО озер установлено значительное присутствие видов-галофобов, характерных для северных олиготрофных водоемов, при этом виды, предпочитающие повышенную минерализацию, не превышают 10%, что может свидетельствовать о естественных условиях развития водоема (Шелехова и др., 2015). Наоборот, в верхних слоях отложений, где зафиксированы повышенные концентрации ТМ и высокий уровень антропогенной нагрузки, резко сокращается (до 1-2%) доля видов

диатомовых, не переносящих повышение содержания солей и установлено господствующее положение индифферентных видов, что говорит о техногенном влиянии на озера (Шелехова, Крутских, 2013; Слуковский и др., 2018). В наиболее загрязненных слоях отложений озер Северо-Запада России были обнаружены тератологические изменения штриховки и формы створок диатомовых водорослей, то есть уродства (рис. 19). Отмечается, что это также может быть следствием антропогенного воздействия на водный объект (Lavoie et al., 2012).

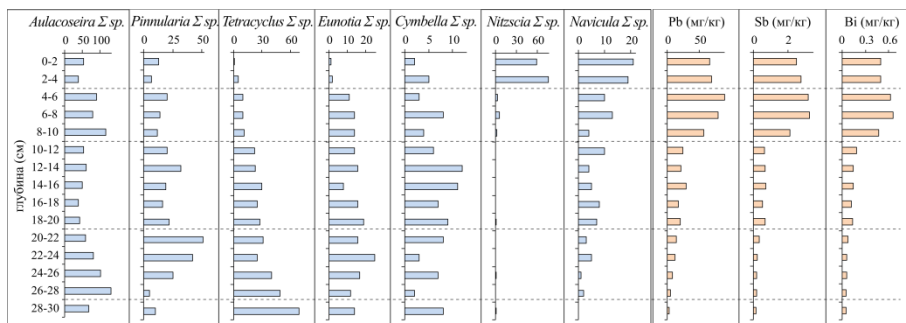


Рисунок 18. Диатомовые комплексы (в %) ДО оз. Плотичье (Медвежьегорск, Карелия) и вертикальное распределение концентраций ТМ (Шелехова, Слуковский, 2019)

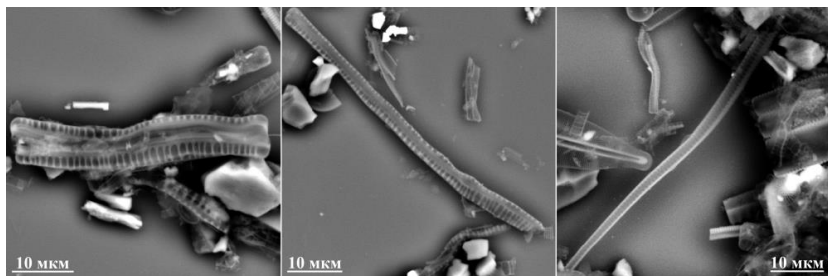


Рисунок 19. Электронные изображения створок диатомовых водорослей ДО оз. Семеновского (Мурманск) с морфологическими нарушениями панциря

Глава 8 «Формы нахождения элементов в донных отложениях озер урбанизированных территорий». Приводится описание форм нахождения ТМ и сопутствующих им химических элементов в ДО озер городских территорий, оценка биодоступности загрязнителей, дается анализ техногенных минеральных образований в ДО озер, расположенных вблизи металлургических предприятий, приводится классификация техногенных минеральных образований по форме, химическому составу и источникам поступления в озера.

Отложения озер, обогащенные веществами техногенного происхождения, могут служить источниками вторичного загрязнения водной среды и могут

быть вовлечены в миграцию загрязнителей по цепям питания (Моисеенко и др., 1997; Ларина и др., 2015). В этой связи исследование форм элементов в ДО озер – важный этап эколого-геохимической оценки состояния водоема.

Исследования показали, что в современных слоях ДО городов Северо-Запада России элементы в значительной мере тяготеют к минеральной фазе (рис. 20). Так в озерах г. Петрозаводска наибольшую связь с этой фазой имеют Sn (до 99 %), W (95), Cu (91), Tl (89), Sb (78), Sr (до 87 %) (Слуковский, 2020). В озерах г. Мурманска сильнее всего с минеральной формой связывания элементов соотносятся Cr, Th, Tl и Sn, слабее всего – Zn, Sb, U и Pb (Guzeva et al., 2022). В этом отношении ДО озер обоих городов имеют явное сходство, что можно сказать и про другие урбанизированные территории и фоновые районы Карелии и Мурманской области (Slukovskii et al., 2020). Например, анализ форм ТМ в отложениях озера на юго-востоке Карелии, показывает, что в ДО водоема почти все металлы находятся в основном в минеральной фазе, что особенно характерно для Sn (до 99% от общего содержания), Bi (89–97) и Tl (81–89).

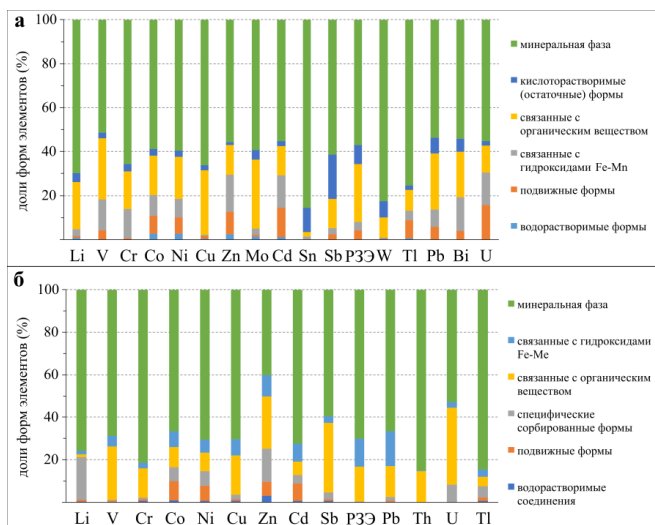


Рисунок 20. Усредненные доли различных форм элементов из ДО озер Петрозаводска (а) и Мурманска (б)

В озерах урбанизированных и фоновых районов второй по значимости формой нахождения элементов, включая загрязнители, является органическая форма (рис. 20). К примеру, среди ТМ в современных ДО озер г. Петрозаводска с органикой наиболее тесно связано накопление Cu (62 %), Mo (48), Co (34), Pb (52), V (42), Bi (39), Ni (26) и Sb (26) (Слуковский, 2020). При этом для всех исследованных озер отмечается тенденция к увеличению доли концентраций

металлов, связанных с органическим веществом, при увеличении общего содержания органического вещества в слоях озерных отложений. Аналогичные тенденции выявлены в осадках озер крупнейшего города Мурманской области: лучше всего с органикой, судя по графикам (рис. 21), связываются Zn, V, Sb, U и Cu. Наблюдаемые закономерности, как в городских, так и фоновых озерах Карелии, согласуются с результатами других исследований осадков пресноводных озер (Belzile et. al. 1997; Förstner et al., 2004; Li et al., 2001; López et al., 2010). В этих и других работах подчеркивается ключевая роль органического вещества в накоплении ТМ в водных средах, подверженных антропогенному воздействию. Известно также о существенной роли гидроксидов Fe, которые обычно тесно связывают Pb, Zn и ряд других элементов (Li et al., 2001; Долотов, Гапеева, 2009). Согласно проведенным исследованиям в ДО озер урбанизированных территорий Северо-Запада России наиболее тесные связи с гидроксидами Fe и Mn установлены для Zn, Cd, Pb, Bi, V, Cr (рис. 20).

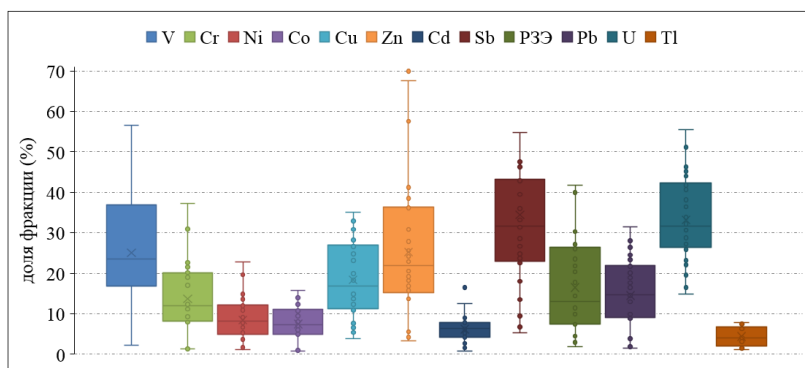


Рисунок 21. Диапазон долей концентраций элементов из отложений озер г. Мурманска, связанных с органическим веществом осадков

Также, согласно графикам на рисунке 21, выделяется наибольшая среди всех ТМ связь с подвижной формой отложений для Cd. Это отмечается, как для озер Карелии, так и озер Мурманской области (Слуковский, 2020; Guzeva et al., 2022). Высокая подвижность Cd в ДО водных объектов, подвергшихся антропогенной нагрузке, известна из публикаций (Петрова, 2006; Опекунов и др., 2024).

Кроме Cd, относительно высокой подвижностью в отложениях исследованных озер урбанизированных территорий характеризуются Zn, Sr, Tl, V, Ni, Co, Sb и U. Данные, полученные на основе расчета коэффициентов подвижности (или биодоступности) $K_{\text{подв}}$ по отдельным элементам, схожи с результатами химической оценки подвижности изученных веществ (рис. 22). В частности, в озерах г. Петрозаводска коэффициенты биодоступности выше 10 установлены

для Ni, Cd, U, Zn в верхних слоях отложений, а в ДО озер г. Мурманска наибольшей подвижностью характеризуются Co, Zn, Cd, Ni, для которых коэффициенты биодоступности варьируют от 0.3 до 17 % (рис. 22).

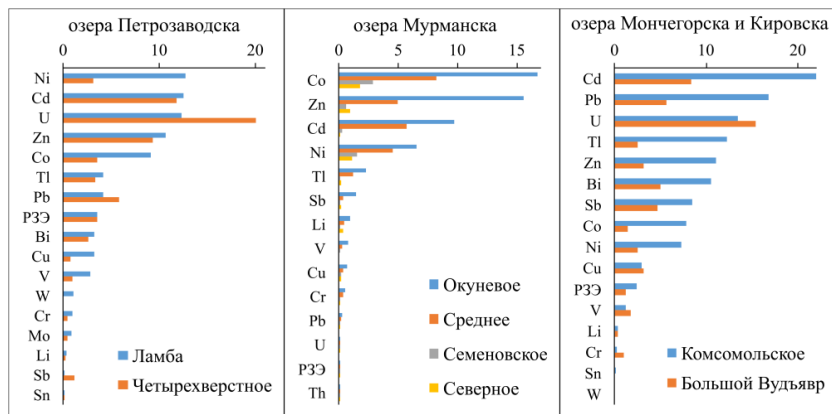


Рисунок 22. Уровень биодоступности (в %) элементов из верхних (0-10 см) ДО озер урбанизированных территорий Карелии и Мурманской области



Рисунок 23. Вертикальное распределение Ni в мг/кг в разных формах в колонке ДО оз. Комсомольского (Мончегорск, Мурманская область)

Анализ форм нахождения ТМ в современных отложениях озер урбанизированных территорий выявил общую для всех водоемов тенденцию: концентрации элементов-загрязнителей в разных формах повторяют динамику их накопления в валовой форме. Это хорошо видно на примере накопления Ni в отложениях оз. Комсомольского (г. Мончегорск): наибольшие концентрации элемента и других ТМ во всех формах отмечаются в слое до 5 см (рис. 23), что согласуется с тем, как ведут себя загрязнители озера в валовых концентрациях (Slukovskii et al., 2020). Такие же тенденции отмечены в ДО озер других городов Мурманской области и Карелии.

Изучение ДО озер урбанизированных территорий Мурманской области, где действуют металлургические

предприятия, выявило в них наличие техногенных частиц размером от первых микрометров до ~200 мкм (рис. 24), представляющих из себя оксиды Fe с примесью Si, Al, S, Ni, Cu, Co, Pb, Cd, а также сульфиды Ni, Cu и Fe (Слуковский, Даувальтер, 2019; Слуковский и др., 2019; Slukovskii et al., 2020).

По морфологии техногенные частицы в основном выделяются частицы округлой или почти округлой формы, связанные с процессами обжига или плавления руды, угловатые частицы, чье происхождение связано с процессом дробления руды, а также частицы невыраженной (кляксообразной) формы (рис. 24), но имеющие округлые очертания, чей генезис связан с процессами обжига или плавления. Кляксообразные частицы – это преимущественно частицы шлака, побочного продукта металлургического производства (Удачин и др., 2014; Касиков, Арешина, 2019). Аналогичные частицы ранее были обнаружены в снеге района исследования, то есть вблизи выбросов Кольской ГМК (Gregurek et al., 1998, 1999), что говорит о миграции найденных образований из одной депонирующей среды (снег) в другую (ДО).

С химических позиций минеральные частицы в ДО озер вблизи металлургических предприятий – это оксиды Fe с примесью Si, Al, S, Ni, Cu, Co, Pb, Cd, а также сульфиды Ni, Cu и Fe (Слуковский, Даувальтер, 2019; Slukovskii et al., 2020). Частицы, обогащенные Ni, S и Fe наиболее распространены в изученных осадках озер г. Мончегорска. Например, в 100% изученных техногенных частицах из отложений оз. Нюдъявр, принимающего прямые стоки с металлургического завода, было установлено присутствие Ni от 1.5 до 93% и Fe от 1 до 70%, а в 70% частиц – присутствие S в концентрациях от 0.5 до 40% (Слуковский, Даувальтер, 2019).

Во всех изученных отложениях отмечается низкий процент содержания техногенных частиц, обогащенных Cu. Аналогичную ситуацию отмечали при изучении снега вблизи металлургических предприятий. Это связывается с большей растворимостью соединений Cu по сравнению с соединениями Ni (Gregurek et al., 1998). В отложениях озер г. Мончегорска Cu хорошо связывается с органикой. Вероятно, во многом это связано с растворимостью соединений Cu и переходом в более устойчивые для этого металла фазы. Также важно отметить, что

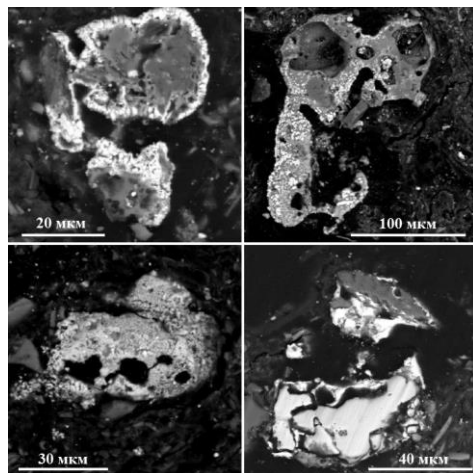


Рисунок 24. Шлаковые частицы неправильной формы из ДО озер г. Мончегорска, Мурманская область

большинство изученных техногенных минеральных образований из отложений гетерофазны: внешние оболочки часто окислены из-за контакта с водой, что может способствовать высвобождению ТМ и включения в процессы вторичного загрязнения озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на примере урбанизированных территорий нескольких регионов России, а также фоновых территориях Северо-Запада России **показали,** что современные отложения озер городских территорий и территорий вблизи них обогащаются различными элементами, включая ТМ, относительно средних концентраций элементов в верхней части земной коры, и региональных фоновых значений. Наибольшие коэффициенты концентрации установлены для V, Ni, Cu, Mo, Cd, Sb, W, Pb и Bi. Эти элементы относятся к приоритетным загрязнителям окружающей среды урбанизированных территорий исследованных регионов. Ключевая роль в образовании геохимических аномалий этих элементов в верхних слоях отложений озер урбанизированных территорий принадлежит выбросам промышленных предприятий (мазутные и угольные ТЭЦ и котельные, металлургические и машиностроительные заводы), транспорта и другим антропогенным источникам.

Палеолимнологические реконструкции выявили историческую динамику накопления химических элементов в ДО озер урбанизированных территорий. В пределах городов озерные осадки показывают единую динамику увеличения концентраций большого спектра микроэлементов от нижних (фоновых) слоев к верхним (современным). Это относится, как к ТМ, так и к литофильным элементам, включая порообразующие элементы, РЗЭ и щелочные металлы. Во втором случае это происходит в результате интенсивных эрозионных процессов на антропогенно нарушенных территориях, разрушения дорожных покрытий и строений. Таким образом, индикация антропогенного воздействия на городские озера может осуществляться при помощи анализа вертикального распределения в колонках ДО классических загрязнителей, в том числе из числа ТМ и литофильных элементов.

Практически на всех урбанизированных территориях Северо-Запада России был установлен геохимический след влияния ТЭЦ и котельных, которые работали и/или работают в городах, используя в качестве топлива мазут. Индикаторами этого вида загрязнения урбанизированной среды являются V и Ni, чьи концентрации и динамика накопления в отложениях озер указывают на историческое влияние предприятий энергоблока. Самые экстремальные концентрации V достигают 135-кратного превышения фона. Установлено, что за пределами городских территорий (более 20 км) влияние мазутных ТЭЦ и котельных не наблюдается. На фоновых территориях V и Ni в пресноводных осадках связаны, главным образом, с природными факторами. Аномально высокие концентрации

V в некоторых городских озерах связываются также с влиянием рудоносности горных пород водосборной площади. Также в пределах урбанизированных территорий некоторых регионов отмечаются аномальные концентрации U, Mo, Cu, связанные с влиянием геологии.

На фоновых и условно-фоновых территориях накопление микроэлементов преимущественно подчиняется естественным закономерностям. В частности, для РЗЭ отмечается влияние климатического и ландшафтного фактора, что выражается в больших медианных концентрациях РЗЭ в озерах в ряду тундра-лесотундра-тайга. В замкнутых геологических системах, например на острове Кинг-Джордж (Антарктика) озерные отложения практически полностью повторяют закономерности накопления микроэлементов, включая РЗЭ, ранее отмечавшиеся в вулканических и осадочных породах водосборной площади.

Техногенное влияние в отложениях озер фоновых территорий в основном связано с эффектом дальнего атмосферного переноса загрязнителей, в который из ТМ вовлечены Pb, Cd, Sb, Bi, Tl, Sn в Северном полушарии Земли и Pb с Sb – в Южном. На территории Мурманской области и северной части Карелии в верхних слоях ДО (до 5-7 см) малых фоновых озер формируются также повышенные концентрации Ni и Cu, что связано с деятельностью металлургических предприятий в Арктике, которые могут располагаться на расстоянии до ~250 км от изучаемых водных объектов.

В пределах урбанизированных территорий суммарный эффект накопления большого спектра ТМ в верхних слоях ДО выражается в установлении экстремально высокого и высокого уровней загрязнения при расчете индекса антропогенной нагрузки PLI (значения от 2 до 11 в зависимости от озера). Самый большой уровень загрязнения отмечается в озерах городов Петрозаводск, Медвежьегорск, Мурманск, Мончегорск, а также в озерах импактных зон пгт Никель и г. Норильска, где действуют металлургические предприятия. Озера фоновых районов Северо-Запада России преимущественно характеризуются слабым или умеренным уровнем антропогенной нагрузки: значения индекса PLI от 1 до 2. Установлено, что наиболее загрязненные ДО городских озер обоих регионов имеют больший потенциал для экологического риска, рассчитанного по индексу RI, и наоборот.

Полученные эколого-геохимические данные и расчеты хорошо соотносятся с результатами анализа поведения биоты (планктона и бентоса) некоторых озер урбанизированных территорий. Отмечается, что диатомовые водоросли, исследованные на примере озер городов Карелии и Мурманской области, кардинально меняют свою структуру в ходе современных, связанных с техногенных воздействием, этапов развития городских озер. В колонках современных ДО озер выделяются разные диатомовые зоны, что соответствует разным типам доминирующего антропогенного воздействия на озера, маркируемым по уровню накопления загрязнителей городской среды. Аналогичные закономерности наблюдаются также на примере исследования макрозообентоса из отложений

городских озер. Установлено доминирование представителей подсемейств Chironominae (хируномид) в современных отложениях, то есть видов толерантных к неблагоприятным условиям среды. Также на примере озер г. Мурманска отмечается накопление химических элементов, включая ТМ, в телах зообентосных организмов. Причем отмечаются аномальные концентрации тех элементов (V, U, Pb), которые имеют повышенный уровень аккумуляции в основной матрице ДО.

Доминирующей формой нахождения микроэлементов в ДО озер урбанизированных территорий городов Северо-Запада России является труднорастворимая минеральная форма, связанная с первичными минералами из материнских пород, подвергшихся выветриванию и попавших затем в озера, а также с минералами или глинистыми частицами, которые хорошо сорбируют ТМ. Второй по значимости формой нахождения элементов является – органическая, лучше всего с ней связываются такие элементы-загрязнители, как V, Sb, Cu, Mo, U и РЗЭ. С подвижными и потенциально доступными формами в основном связаны Cd (практически во всех изученных озерах), Ni, Zn, Co, Pb и U. Медианный уровень биодоступности некоторых из этих металлов может достигать 22%, что создает предпосылки для миграции ТМ по трофическим цепям.

В загрязненных ТМ слоях ДО озер вблизи деятельности металлургических предприятий (Мончегорск, Никель) установлено наличие техногенных минеральных образований (частиц) размером до ~200 мкм, состоящих из оксидов и сульфидов Fe, Ni и реже Cu с примесью других элементов, включая ТМ. Данные образования – результат металлургических процессов (дробление, обжиг и плавление). В нижних (фоновых) слоях ДО озер вблизи заводов такие частицы не обнаруживаются, что позволяет использовать их в качестве эколого-минералогического индикатора по оценке влияния техногенеза на озера промышленных зон и урбанизированных территорий.

По результатам проведенных эколого-геохимических исследований в качестве **практических рекомендаций** можно выделить следующие:

1. Использовать фоновые концентрации микроэлементов, включая ТМ, рассчитанные для современных ДО озер территорий регионов Республики Карелии и Мурманской области в качестве реперных при проведении экологического мониторинга, государственной экспертизы и научных исследований, а также начать процедуру по их официальной регистрации на региональном уровне в виду отсутствия ПДК/ОДК ТМ в ДО озер.

2. Включить в программу ежегодной оценки состояния окружающей среды Республики Карелии, Мурманской области, Архангельской области, Челябинской области и Красноярского края, публикуемой в виде государственных докладов, эколого-геохимические исследования озер урбанизированных территорий, включая водные объекты, расположенные непосредственно в городской черте. Химический состав ДО городских озер следует использовать в качестве

интегрального показателя качества окружающей среды урбанизированных территорий.

3. Обновить информацию в нормативном документе «ГОСТ Р 54000–2010. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия», дополнив ее сведениями о допустимых концентрациях V, Sb, W, Tl и Bi для 1 и 2 классов пригодности сапропеля, учитывая отсутствие этих элементов в перечне ТМ в названном документе, а также потенциальную опасность для озер, особенно расположенных вблизи урбанизированных территорий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ по специальности 1.6.21. Геоэкология и по смежным специальностям:

1. **Слуковский З.И.** Вертикальное распределение микроэлементов в донных отложениях малого озера в условиях урбанизированной среды / **З.И. Слуковский**, А.С. Медведев // Вода: химия и экология. – 2015. – № 3. С. 77-82. (0.6/0.4 п.л.)

2. **Слуковский З.И.** Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) / **З.И. Слуковский**, Н.В. Ильмаст, И.В. Суховская, Е.В. Борвинская, М.А. Гоголев // Труды Карельского научного центра РАН. – 2017. – № 10. – С. 45-63. (2.1/1.0 п.л.)

3. **Слуковский З.И.** Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды Республики Карелии / **З.И. Слуковский** // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 6. – С. 70-82. (1.4 п.л.)

4. **Слуковский З.И.** Накопление и вертикальное распределение тяжелых металлов в сапропеле озера Грязное (Медвежьегорский район, Республика Карелия) / **З.И. Слуковский**, А.С. Медведев, Т.П. Бубнова, Е.В. Сыроежко // Вестник МГТУ. – 2017. – Том 20. – № 1/2. – С. 177-188. (1.3/0.9 п.л.)

5. **Slukovskii Z.I.** Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia / **Z.I. Slukovskii** // Вестник МГТУ. – 2020. – № 23(1). – С. 80-92. (1.4 п.л.)

6. **Слуковский З.И.** Палеолимнологическая реконструкция техногенного воздействия на экосистему оз. Большой Вудъявр (Кировск, Мурманская область, Арктика): новые геохимические данные / **З.И. Слуковский**, А.В. Гузева, В.А. Григорьев [и др.] // Экология урбанизированных территорий. – 2020. – № 4. – С. 96-107. (1.3/0.7 п.л.)

7. **Слуковский З.И.** Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озер юга Карелии / **З.И. Слуковский**, В.А. Даувальтер // Труды Карельского научного центра РАН. – № 4. – 2020. – С. 75-94. (2.2/1.4 п.л.)

8. **Слуковский З.И.** Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер / М.А. Постева, **З.И. Слуковский** // Вестник МГТУ. – 2021. – Том 24. – № 2. – С. 190-201. (1.3/0.7 п.л.)

9. **Слуковский З.И.** Геохимическая характеристика гуминовых кислот, выделенных из отложений тундровых озер Мурманской области / А.В. Гузева, **З.И. Слуковский** // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2023. – № 1. – С. 78-92. (1.6/0.4 п.л.)

10. **Слуковский З.И.** Оценка устойчивости городских озер к закислению в условиях Арктики / М.А. Постева, В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский** // Экология урбанизированных территорий. – 2024. – № 4. – С. 32-39. (0.8/0.2 п.л.)

11. **Слуковский З.И.** Закономерности формирования химического состава озерных вод урбанизированной среды в Арктике (на примере г. Мурманска) / М.А. Постева, В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский** // Труды Карельского научного центра РАН. – 2025. – № 2. – С. 33-50. (2.0/0.7 п.л.)

12. **Слуковский З.И.** Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска) / М.А. Постева, В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский** // Российский журнал прикладной экологии. – 2025. – № 1. – С. 10-18. (0.9/0.3 п.л.)

13. **Слуковский З.И.** Литолого-геохимические особенности современных отложений озер полуостровов Рыбачий и Средний (Мурманская область, Арктическая зона РФ) / П.Н. Адамская, **З.И. Слуковский**, В.А. Даувальтер [и др.] // Труды Карельского научного центра РАН. – 2026. – № 4 – С. 33-48. (1.7/0.7 п.л.)

*Основные публикации в рецензируемых изданиях,
индексируемых в базах Scopus и WoS:*

14. **Slukovskii Z.I.** Geoeological assessment of small rivers in the big industrial city based on the data on heavy metal content in bottom sediments / **Z.I. Slukovskii** // Russian Meteorology and Hydrology. – 2015. №40. – P. 420-426. (0.7 п.л.)

15. **Слуковский З.И.** Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия) / **З.И. Слуковский** // Химия в интересах устойчивого развития. – 2015. – Том 23. – № 4. С. 397-408. (1.3 п.л.)

16. **Slukovskii Z.I.** Geochemical indicators of technogenic pollution of bottom sediments of small rivers in an urbanized environment / **Z.I. Slukovskii**, S.A. Svetov // Geography and Natural Resources. – 2016. № 37. – P. 32-38. (0.7/0.5 п.л.)

17. **Слуковский З.И.** Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии / **З.И. Слуковский**, Т.С. Шелехова, Е.В. Сыроежко // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2018. – Том 63. – Вып. 1. – С. 103-123. (2.3/1.1 п.л.)

18. **Слуковский З.И.** Морфология и состав техногенных частиц донных отложений оз. Нюдъявр, Мурманская область / **З.И. Слуковский**, В.А. Дауальтер // Записки Российского минералогического общества. – 2019. – № 3. – С. 102–117. (1.7/1.1 п.л.)
19. **Слуковский З.И.** Уровень аккумуляции и формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях малых озер урбанизированной среды (Карелия) / **З.И. Слуковский** // Вестник Санкт–Петербургского университета. Науки о Земле. – 2020. – № 65 (1). – С. 171–192. (2.4 п.л.)
20. **Slukovskii Z.I.** Geochemistry features of sediments of small urban arctic Lake Komsomolskoye, Murmansk region / **Z.I. Slukovskii**, V. A. Dauvalter, D. B. Denisov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 467. – № 012004. (0.7/0.4 п.л.)
21. **Slukovskii Z.I.** Diatom analysis of the Euro–Arctic urban lakes sediments / D.B. Denisov, A. L. Kosova, **Z.I. Slukovskii** [et al.] // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. № 4. – P. 509–510. (0.2/0.1 п.л.)
22. **Slukovskii Z.I.** Vanadium as an indicator of the impact of fuel oiled thermal power plants on the environment: paleolimnological reconstructions / **Z.I. Slukovskii**, A. V. Guzeva, V.A. Dauvalter // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – № 4. – P. 513–514. (0.2/0.1 п.л.)
23. **Slukovskii Z.** The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia / **Z. Slukovskii**, V. Dauvalter, A. Guzeva [et al.] // Water. – 2020. Vol. 12. – № 1130. (1.4/0.9 п.л.)
24. **Slukovskii Z.** Long–range transport of heavy metals as a factor of the formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia / **Z. Slukovskii**, M. Medvedev, E. Siroezhko // Journal of Elementology. – 2020. – Vol. 25 (1). – P. 125–137. (1.4/0.9 п.л.)
25. **Slukovskii Z.I.** The environmental geochemistry of recent sediment in small lakes in the Southwest of Karelia, Russia/ **Z.I. Slukovskii**, M.A. Medvedev, E.V. Siroezhko // Environmental Engineering and Management Journal. – 2020. – Vol. 19. – №. 6. – P. 1043–1055. (1.3/0.9 п.л.)
26. **Slukovskii Z.I.** Uranium Anomalies in Recent Sediments of Lakes from the Northern Part of the Murmansk Region, Arctic / **Z.I. Slukovskii**, A.V. Guzeva, V.A. Dauvalter [et al.] // Geochemistry International. – 2020. – Vol. 58. P. 1374–1378. (0.7/0.4 п.л.)
27. **Slukovskii Z.I.** Geochemical features of lakes located in an urbanised area of the Russian Arctic (Murmansk region) / A.V. Guzeva, **Z.I. Slukovskii**, V.A. Myazin // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. № 4. – P. 511–512. (0.2/0.1 п.л.)
28. **Slukovskii Z.I.** Estimation of heavy metal concentrations in the water of urban lakes in the Russian Arctic (Murmansk) / M.A. Postevaya, **Z.I. Slukovskii**, V.A. Dauvalter [et al.] // Water. – 2021. Vol. 13 (3267). (1.3/0.7 п.л.)

29. **Slukovskii Z.I.** Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia / A.V. Guzeva, **Z.I. Slukovskii**, V.A. Dauvalter [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2021. – Vol. 193 (378). (1.4/0.5 п.л.)
30. **Слуковский З.И.** Особенности химического состава воды городских озер Мурманска / В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский**, Д.Б. Денисов [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2021. – № 66 (2). – С. 252-266. (1.4/0.6 п.л.)
31. **Slukovskii Z.** Recent sediments of arctic small lakes (Russia): geochemistry features and age / **Z. Slukovskii**, M. Medvedev, A. Mitsukov [et al.] // Environment Earth Science. – 2021. – Vol. 80 (302). (1.9/1.1 п.л.)
32. **Slukovskii Z.I.** Assessment of contamination of recent sediments of a large reservoir in the North of Europe, Russia / **Z.I. Slukovskii**, N.A. Belkina, M.S. Potakhin // Polish Polar Research. – 2021. – Vol. 42. – № 1. – P. 25-44. (2.2/1.1 п.л.)
33. **Slukovskii Z.** Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk) / M. Postevaya, V. Dauvalter, **Z. Slukovskii** [et al.] // Ecohydrology. – 2022. – Vol. 15 (7). (1.3/0.7 п.л.)
34. **Slukovskii Z.I.** Rare earth elements in surface lake sediments of Russian arctic: Natural and potential anthropogenic impact to their accumulation / **Z.I. Slukovskii**, A.V. Guzeva, V.A. Dauvalter // Applied Geochemistry. – 2022. – Vol. 142 (105325). (1.2/0.7 п.л.)
35. **Slukovskii Z.I.** Impact of Wastewaters from Apatite–Nepheline Production on the Biogeochemical Processes in an Arctic Mountain Lake / V.A. Dauvalter, D.B. Denisov, **Z.I. Slukovskii** // Geochemistry International. – 2022. – Vol. 60. – №. 10. – P. 1014-1028. (1.6/0.7 п.л.)
36. **Slukovskii Z.** Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution / V. Dauvalter, **Z. Slukovskii**, D. Denisov [et al.] // Water. – 2022. – Vol. 14 (4044). (3.2/1.2 п.л.)
37. **Slukovskii Z.I.** Uranium in lake sediments of humid zone: a case study in the Southeast Fennoscandia (Karelia, Russia) / **Z.I. Slukovskii** // Water. – 2023. – Vol. 15 (1360). (1.9 п.л.)
38. **Slukovskii Z.I.** Geochemical indicators for paleolimnological studies of the anthropogenic influence on the environment of the Russian Federation: A review / **Z.I. Slukovskii** // Water. – 2023. – Vol. 15 (420). (3.4 п.л.)
39. **Slukovskii Z.** Vanadium in modern sediments of urban lakes in the North of Russia: natural and anthropogenic sources / **Z.I. Slukovskii** // Marine Pollution Bulletin. – 2023. – Vol. 197. – 115754. (1.6 п.л.)
40. **Slukovskii Z.I.** Trace Elements in the Sediment Cores of Lakes on King George Island, Antarctica / **Z.I. Slukovskii**, A. V. Guzeva // Doklady Earth Sciences. – 2024. – Vol. 516. – P. 803-810. (0.8/0.4 п.л.)
41. **Slukovskii Z.I.** Sediment geochemistry of Lake Portlulob (Murmansk region): natural anomalies and reconstruction of anthropogenic events in the catchment

/ **Z.I. Slukovskii**, V.A. Dauvalter // Limnology and Freshwater Biology. – 2024. – № 4. – P. 659-664. (0.6/0.4 п.л.)

42. **Slukovskii Z.I.** Anomalous Concentrations of Molybdenum in Modern Sediments of the Background Lake in the Arctic (Murmansk Region) / **Z.I. Slukovskii**, V.A. Dauvalter, N.I. Mescheryakov [et al.] // Doklady Earth Sciences. – 2025. – Vol. 520 (31). (0.8/0.4 п.л.)

43. **Slukovskii Z.I.** Biogeochemical and environmental characteristics of sediment humic acids in lakes of European taiga zone / A.V. Guzeva, **Z.I. Slukovskii** // Aquatic Geochemistry. – 2025. – Vol. 31 (2). (2.3/1.2 п.л.)

44. **Slukovskii Z.** Anomalies of rare earth elements and heavy metals/metalloids in modern sediments of small lakes in the north of Karelia (Arctic): geology and technogenesis influence / **Z. Slukovskii**, V. Dauvalter, T. Shelekhova T. // Environmental Earth Sciences. – 2025. – Vol. 84 (68). (1.6/1.0 п.л.)

45. **Slukovskii Z.** Chemical composition of sediment and macrozoobenthos of small urban lakes, the Republic of Karelia, Russia / E. Savosin, **Z. Slukovskii** // International Journal of Sediment Research. – 2025. – Vol. 40 (1). – P. 119-128. (1.0/0.5 п.л.)

46. **Slukovskii Z.** Hydrochemical evolution of groundwater as a result of 10-year development of apatite-nepheline ore deposit in the southeastern part of the Khibiny alkaline massif / V.A. Dauvalter, M.V. Dauvalter, **Z.I. Slukovskii** // Journal of Mining Institute. – 2025. – Vol. 276 (1). – P. 172-186. (1.6/0.5 п.л.)

47. **Slukovskii Z.** Lake Kitezh (Antarctica): the first data on the sedimentation rate for the last 150 years / **Z. Slukovskii**, N. Kuzmenkova, A. Guzeva // Journal of Sedimentary Environments. – 2026. – Vol. 11(2). (1.4/0.8 п.л.)

48. **Slukovskii Z.I.** Background concentrations of trace elements in recent lake sediments of the Murmansk Region / **Z.I. Slukovskii**, V.A. Dauvalter, D.B. Denisov [et al.] // Doklady Earth Science. – 2026. – Vol. 526(35). (1.0/0.5 п.л.)

Публикации в журналах из базы данных РИНЦ:

49. **Слуковский З.И.** Содержание тяжелых металлов и мышьяка в донных отложениях озер Четырехверстного и Ламбы (г. Петрозаводск, Республика Карелия) / **З.И. Слуковский**, А.С. Медведев // Экологическая химия. – 2015. – № 1. – С. 56-62. (0.7/0.5 п.л.)

50. **Слуковский З.И.** Первые данные геохимических исследований колонки донных отложений озер Плотичьего (г. Медвежьегорск, Республика Карелия) / А.С. Медведев, **З.И. Слуковский**, Д. Г. Новицкий, Е.В. Сыроежко, Е. М. Макарова // Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2016. – № 18. С. 119-123. (0.5/0.3 п.л.)

51. **Слуковский З.И.** Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия / М.С. Потахин, Н.А. Белкина, **З.И. Слуковский** [и др.] // Общество. Среда. Развитие. – 2018. – №3(48). – С. 107-117. (1.2/0.4 п.л.)

52. **Слуковский З.И.** Геохимическая спецификация донных отложений малых озер урбанизированных районов республики Карелии / **З.И. Слуковский** // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – № 15. – С. 501-504. (0.4 п.л.)
53. **Слуковский З.И.** Содержание Ni и Cu в минеральных образованиях природного и техногенного генезиса в донных отложениях озера Нюдъявр (Мурманская область) / **З.И. Слуковский**, В.А. Даувальтер // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – № 15. – С. 498-500. (0.2/0.1 п.л.)
54. **Слуковский З.И.** Исследования сообществ зоопланктона в озерах города Мурманска / А.А. Черепанов, Д.Б. Денисов, **З.И. Слуковский** [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – Том 10. № 4. – С. 83-93. (1.2/0.3 п.л.)
55. **Слуковский З.И.** Тяжелые металлы и формы их нахождения в донных отложениях сапропелепродуктивных озер Республики Карелия / **З.И. Слуковский** // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – Том 10. – № 6. – С. 227-232. (0.6 п.л.)
56. **Слуковский З.И.** Поиск техногенных частиц в снеге города Мурманска (первые данные) / **З.И. Слуковский**, А.В. Гузева // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – Том 10. – № 6. – С. 222–226. (0.5/0.3 п.л.)
57. **Слуковский З.И.** Подвижные формы тяжелых металлов в донных осадках озер города Мурманска / А. В. Гузева, **З.И. Слуковский**, Д. Б. Денисов, А.А. [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2019. – Том 10. – № 6. – С. 70-77. (0.8/0.3 п.л.)
58. **Слуковский З.И.** Природные и техногенные факторы в формировании геохимии современных донных отложений малых озер г. Мурманска (Арктическая зона РФ) / **З.И. Слуковский**, В.А. Даувальтер, А.В. Гузева [и др.] // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 510-514. (0.5/0.3 п.л.)
59. **Слуковский З.И.** Особенности химического состава воды городских озер Мурманска / В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский**, Д.Б. Денисов [и др.] // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 153-157. (0.5/0.2 п.л.)
60. **Слуковский З.И.** Геохимия арктического горного озера в условиях загрязнения стоками апатит-нефелинового производства / В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский**, Д.Б. Денисов [и др.] // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2021. – № 18. – С. 140-144. (0.5/0.1 п.л.)
61. **Слуковский З.И.** Геохимия редких элементов в донных отложениях озера Большой Вудъявр / В.А. Даувальтер, **З.И. Слуковский**, Д.Б. Денисов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2022. – № 19. – С. 86-91. (0.6/0.2 п.л.)

Монографии:

62. **Слуковский З.И.** Методы исследования донных отложений озер Карелии / Т. С. Шелехова, **З.И. Слуковский**, Н. Б. Лаврова. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. – 111 с. (13/6 п.л.)

63. **Слуковский З.И.** Озера города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности: монография / **З.И. Слуковский**, Д.Б. Денисов, В.А. Даувальтер [и др.]. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. – 174 с. (20/2 п.л.)

Прочие публикации:

64. **Слуковский З.И.** Сантиметры истории, или как тяжелые металлы маркируют события промышленного века в отдельно взятом водоеме / **З.И. Слуковский** // Природа. – 2018. – № 7. – С. 23-29. (0.7 п.л.)

65. **Слуковский З.И.** Биогеохимические аспекты загрязнения водоемов урбанизированных территорий в Республике Карелия на примере окуня (*Perca fluviatilis*) / Д.Г. Новицкий, Н.В. Ильмаст, **З.И. Слуковский**, И.В. Суховская // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2018. – № 3. – С. 42-51. (1.1/0.5 п.л.)

66. **Слуковский З.И.** Греть, дымить и загрязнять: история мазута в России / **З.И. Слуковский** // Природа. – 2020. – № 6. – С. 3-11. (0.9 п.л.)

67. **Slukovskii Z.** Geochemical Assessment of the Modern Sediments of a Lake in the North of Russia / **Z. Slukovskii**, T. Shelekhova // Advances in Environmental and Engineering Research. – 2023. – Vol. 4(3), – № 038. (1.7/1.2 п.л.)

Слуковский Захар Иванович

**СОВРЕМЕННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ОЗЕР УРБАНИЗИРОВАННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ: ГЕОХИМИЯ, ПАЛЕОРЕКОСТРУКЦИИ,
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ**

1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук