

Постева Марина Алексеевна

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОЗЕР УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ
ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА МУРМАНСКА)**

1.6.21. Геоэкология (географические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики № 23 Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН).

**Научный
руководитель:**

Даувальтер Владимир Андреевич

Доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геоэкологии и рационального природопользования Арктики Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»

**Официальные
оппоненты:**

Опекунов Анатолий Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Галахина Наталья Евгеньевна

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и гидрогеологии Института водных проблем Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»

Защита состоится «20» июня 2025 г. в 11-00 часов на заседании Совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 33.3.018.02, созданного на базе Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, по адресу:

191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 12, ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена по адресу: 191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп. 5 и на сайте университета по адресу: https://disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000001121.html

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сазонова Ирина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема состояния водных объектов в условиях урбанизированной среды в настоящее время набирает все большую актуальность. Формирование химического состава озерных вод обуславливается совокупностью физических, химических и биологических процессов, протекающих в водоеме и на его водосборе (Osadchyy et al., 2016). Состав природных вод формируется под влиянием таких физико-географических условий, как рельеф, климат, процессы выветривания горных пород, состав и структура почвенного покрова и др. Помимо этого, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия внутри водоема определяют растворимость минералов и скорость миграции элементов, а также форму их нахождения в природных водах (Даувальтер, Кашулин, 2014; Osadchyy et al., 2016). При определенных условиях среды донные отложения могут выступать как источником вторичного поступления биогенных элементов и тяжелых металлов в водную среду, так и снижать их токсическое воздействие посредством образования устойчивых комплексных соединений с гумусовыми кислотами, входящими в состав донных отложений (Algül, Beyhan, 2020).

Урбанизированные ландшафты обуславливают специфические особенности формирования озерных вод, в значительной степени отличающиеся от естественных условий. Данные территории испытывают высокое антропогенное и техногенное воздействие со стороны транспорта, промышленных предприятий, жилищно-коммунального хозяйства и т.д. (Саеи и др., 1990). При этом городские застройки, асфальтные и другие водонепроницаемые покрытия способствуют «запечатыванию» почвенного покрова. В таких экранированных («запечатанных») почвах происходит нарушение водного и теплового балансов, снижение биологической продуктивности, а также способности к самоочищению почв (Кошелева, 2019). Как следствие, происходит увеличение доли поверхностного стока с повышенным уровнем загрязняющих веществ в водные объекты (Черногаева и др., 2019). В дальнейшем это может привести к трансформации природных вод, а именно эвтрофикации, антропогенному закислению или защелачиванию, и обогащению токсичными микроэлементами водных экосистем (Никаноров, 2001).

Характерной особенностью северных широт является избыточное увлажнение территорий, низкие температуры, маломощный почвенный покров и, как следствие, замедленные процессы химического выветривания элементов, а также минерализации органического вещества. В результате в условиях Арктики формируются ультрапресные и олиготрофные воды, чутко реагирующие на все изменения, происходящие на их водосборах (Moiseenko, 2018). Гумидный тип климата обуславливает низкое содержание основных катионов в почвенном покрове, и вместе с тем, особую чувствительность пресноводных экосистем к кислотному воздействию (Моисеенко и др., 2015). Смещение pH природных вод в сторону кислых значений способствует увеличению растворимости, миграционной способности и токсичности тяжелых металлов, содержащихся в воде (Skjelkvåle et al., 2006; Yevtushenko et al., 2021). Биота северных регионов характеризуется низким видовым разнообразием,

уязвимость которой от кислотного и токсического воздействия возрастает после полярной ночи (Skjelkvåle et al., 2006). Как уже отмечалось ранее, для северных широт характерен олиготрофный тип озер. Однако, увеличение содержания питательных веществ, вызванное глобальным изменением климата или антропогенной деятельностью, способствует цветению воды и гибели рыб даже в Арктических регионах (Ayala-Borda et al, 2021; Kashulin et al., 2021; Moiseenko et al., 2022).

Согласно данным ежегодных докладов Минприроды «О состоянии окружающей среды Мурманской области» систематический анализ состояния водных объектов на территории города Мурманска, за исключением реки Роста и ручья Варничный, не проводится. Однако озера постоянно находятся под воздействием антропогенной нагрузки различной интенсивности. В северных широтах водные экосистемы наиболее уязвимы к различного рода антропогенной нагрузке в силу низкого потенциала к самоочищению (Сандимиров, 1999). Отсюда возникает необходимость изучения состояния озер города Мурманска и определение факторов, влияющих на их химический состав.

Степень изученности темы.

Исследование базируется на разработках ведущих отечественных и зарубежных ученых в области геоэкологии, гидрохимии и оценки качества поверхностных вод Алекина О.А., Никонорова А.М., Полынова Б.Б., Перельмана А.И., Лозовика П.А., Моисеенко Т.И., Oliver B.G., Henriksen A., Skjelkvåle B.L., Carlson R.E., Kratzer C.R., Brezonik P.L., Dunalska J., Vollenweider R.A., Kerekes J., Brown R.M. и др. Основные закономерности формирования химического состава природных вод были изучены еще в 20-м столетии (Алекин, 1970; Никаноров, Посохов, 1985). Значительный вклад в изучение закономерностей формирования химического состава поверхностных вод Кольского Севера в зависимости от уровня аэротехногенного загрязнения, природно-климатических зон, ландшафтных и геохимических особенностей водосборов внесли работы (Сандимиров, 1999; Моисеенко и др., 2002; Гашкина, 2014; Даувальтер, Кашулин, 2014; Моисеенко и др., 2015; Базова, 2016; и др.). Исследования химического состава и качества вод городских озер в Российской Федерации, особенно северных и арктических территорий, практически не проводятся. Исключение составляют наблюдения качества вод по ограниченному числу гидрохимических показателей в урбанизированных озерах, расположенных в районах различных отраслей промышленности (горнодобывающая, металлургическая, нефтегазовая, энергетическая и др.) (Литвиненко, Регеранд, 2013; Руфова, Ксенофонтова, 2015; Седельникова, Макаров, 2016; Базова, Кошевой, 2017; Красненко и др., 2018; Колесников и др., 2021; Еделев и др., 2021; Носова и др., 2021; Легостаева, Руфова, 2022; и др.) Отрицательное влияние антропогенных факторов на экологическое состояние г. Мурманска подтверждается исследованиями атмосферного воздуха (Доклад о состоянии..., 1997–2022), атмосферных осадков (Свистов и др., 2016; Першина и др., 2021), почвенного покрова (Вихман и др., 2009; Тарасова, Абакумов, 2016) и водотоков (Доклад о состоянии..., 1997–2022; Мелентьев и др., 2009).

Цель работы – выявление закономерностей формирования химического состава воды и оценка экологического состояния озер г. Мурманска, находящихся под влиянием антропогенной нагрузки различной интенсивности.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ и выявить основные факторы, определяющие химический состав вод озер г. Мурманска;
2. Проанализировать химический состав и определить приоритетные загрязнители озерных вод г. Мурманска;
3. Выявить вертикальную изменчивость и сезонную динамику гидрохимических показателей озер г. Мурманска;
4. Оценить качество и экологическое состояние озер г. Мурманска по результатам гидрохимических исследований.

Объектом исследования являются озера г. Мурманска.

Предмет исследования – химический состав вод и экологическое состояние озер г. Мурманска.

Научная новизна работы. Впервые проведен комплексный анализ гидрохимического состава озер г. Мурманска по содержанию главных ионов минерализации, биогенных элементов и более чем 30 микроэлементов. Выявлены закономерности формирования и факторы, определяющие химический состав озерных вод урбанизированных территорий Арктической зоны РФ с применением методов статистического анализа. Описана вертикальная по горизонтам и сезонная изменчивость гидрохимических показателей для исследуемых озер. Определено качество вод озер г. Мурманска, а также степень их закисления, эвтрофирования и загрязнения. Установлены приоритетные загрязнители, а также источники их поступления в поверхностные воды на исследуемых урбанизированных территориях. Выявлены особенности водной миграции химических элементов в условиях городской среды. Полученные результаты в данной работе отличаются от имеющихся аналогичных исследований тем, что исследуемые озера не подвергаются непосредственным сбросам сточных вод от городских предприятий. Это позволяет оценить факторы, определяющие особенности формирования химического состава вод, а также выявить особенности их трансформации в условиях урбанизации, особенно на территории Крайнего Севера. Учитывая уникальные экологические условия и климатические факторы региона, наше исследование позволяет выявить специфические механизмы влияния урбанизации на экосистемы малых водоемов, что способствует более глубокому пониманию их устойчивости и адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные данные отражают современное состояние гидрохимического режима озер г. Мурманска и позволяют выделить приоритетные виды загрязнителей озерных вод на исследуемых территориях. В дальнейшем полученные данные могут быть использованы для анализа, мониторинга и прогнозирования экологического состояния городских озер под влиянием как природных, так и антропогенных

факторов. Помимо этого, результаты исследования могут быть использованы для разработки региональной программы снижения загрязнения окружающей среды г. Мурманска, а также в учебном процессе для студентов географического и экологического направлений.

Методология и методы научного исследования. Диссертационная работа основана на данных, полученных в ходе выполнения проекта по гранту РНФ № 19-77-10007 «Экологическая оценка и прогноз устойчивого функционирования водных экосистем урбанизированных территорий в Арктической зоне» и темы НИР FMEZ-2021-0043 ИППЭС ФИЦ КНЦ РАН «Мониторинг природных объектов в условиях антропогенной нагрузки и изменений климата и разработка технологий для восстановления наземных и водных экосистем в условиях урбанизации и промышленного освоения Арктики». Полевые исследования проводились в 2018–2022 гг. в летний и осенне-зимний период. Сезонная изменчивость химического состава в озерных водах города Мурманска рассматривалась на примере оз. Семеновское, в связи с его расположением в центральной части города, а также высоким рекреационным значением для местных жителей. Химический анализ проб воды выполнялся по единым общепринятым методикам в соответствии с рекомендациями (Clescerl et al., 1999; Моисеенко и др., 2002) в центре коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, а также в аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН. Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программ Microsoft Excel 2019 и Statistica 10. За условно-фоновые значения гидрохимических показателей были приняты данные химического состава озер северо-восточной части водосбора Баренцева моря (Мурманский район) (Bazova, 2017) и восточной части Мурманской области (Кашулин и др... 2010).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Химический состав озерных вод г. Мурманск обусловлен физикогеографическими (подстилающие геологические формации, почвы водосборных территорий, климат, морские аэрозоли) и антропогенными (деятельность предприятий г. Мурманска, автотранспорт, работы по благоустройству урбанизированной среды, эвтрофикация) факторами.

2. Щелочные и щелочноземельные металлы, поступающие с городских территорий в озерные воды, предохраняют их от закисления, обуславливают нейтральные значения реакции среды, высокие значения щелочности и кислотонейтрализующей способности вод (ANC).

3. Повышенные концентрации минеральных веществ в озерах г. Мурманска способствуют повышению фотосинтетической активности фитопланктона (по концентрации хлорофилла «а»). Угнетающего действия тяжелых металлов не выявлено. Трофический статус озер по индексу Карлсона олиготрофный. С ростом трофности вод лимитирующий биогенный фосфор меняется на азот, доля автохтонной органики растет относительно аллохтонной.

4. Антропогенная нагрузка на озера г. Мурманска находит отражение в снижении качества природных вод, а также в повышенном поступлении таких элементов, как V, Ni, Cu, Zn, Al, Mn, Fe, Sr, Li, Rb, Ba, В. Установлено также, что комплексное влияние городской среды выступает не только как

источник повышенного поступления элементов и их соединений в водные экосистемы, но и может способствовать ускорению миграционных процессов химических элементов в результате антропогенной деятельности человека

Степень достоверности полученных результатов и апробация диссертационной работы.

Система отбора и хранения проб, использование современных методов и приборов аналитических измерений в соответствии с аттестованными методиками, жесткий внутрилабораторный контроль качества измерений по единой системе стандартных растворов, международная верификация методов и результатов аналитических исследований, а также статистический анализ данных с применением современного математического и программного обеспечения определяют достоверность полученных результатов. Материалы диссертационного исследования были представлены на VI Международной конференции молодых ученых «Водные ресурсы: изучение и управление» (Лимнологическая школа-практика) (Петрозаводск, 2020); Международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, 2021); Международной научно-практической конференции LXXVI Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, 2023); LXXVII Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, 2024); Всероссийской конференции с международным участием «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики» (Архангельск, 2020); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Арктические экосистемы: сохранение и устойчивое развитие» (Мурманск, 2021).

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 1.6.21 Геоэкология (географические науки):

1. Изучение состава, строения, свойств, процессов, физических и геохимических полей геосфер Земли как среды обитания человека и других организмов.

5. Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования, анализе отечественной и зарубежной литературы, непосредственном участии в полевых работах по сбору материала, химико-аналитических работах, статистической и графической обработке полученных результатов с последующей интерпретацией, формулировании основных положений и выводов, подготовке публикаций и выступлении на конференциях по выполненной диссертационной работе.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 14 научных работ, в том числе 2 в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus, 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 монография, 7 работ в рецензируемых журналах и сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений. Она изложена на 213 страницах, включает 19 таблиц, 26 рисунков. Список литературы составляет 371 источник, из них 156 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, профессору, д.г.н. В.А. Даувальтеру, к.б.н. З.И. Слуковскому, к.б.н. Д.Б. Денисову, А.А. Черепанову за всестороннюю помощь в организации и проведении экспедиционных работ, ценные советы и поддержку при написании диссертационного исследования; сотрудникам центра коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН и аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН за проведение химико-аналитических работ.

Основное содержание работы

Глава 1. Факторы формирования химического состава вод района исследования

В первой главе дано подробное описание природных условий района исследования и их влияние на химический состав озерных вод. Охарактеризованы основные источники антропогенного загрязнения озер г. Мурманска.

Общая характеристика региона. Город Мурманск расположен на восточном берегу Кольского залива южного колена в зоне сочленения Мурманского и Центрально-Кольского геоблоков северо-восточной части Балтийского щита, представляющего собой выступ кристаллического фундамента Русской платформы. В геологическом строении территории принимают участие породы архея, протерозоя и четвертичные отложения. Для Мурманска свойственен арктически-умеренный климат, частая смена погоды и ветровой режим муссонного характера, большое количество осадков, воздействие низких температур и, как следствие, замедленные процессы испарения воды. Город Мурманск находится на границе лесной и тундровой зон, в зоне распространения элювиальных и массивно-кристаллических почвообразующих пород, многолетнемерзлые породы отсутствуют. В пределах г. Мурманска почвы существенно трансформированы. На песчано-супесчаных щебнистых породах формируются подбуры, на менее щебенистых почвеннообразующих породах – торфяно-подбуры и глееземы.

Антропогенная нагрузка района исследования. Согласно данным ежегодных докладов Минприроды «О состоянии окружающей среды Мурманской области», к основным источникам загрязнения атмосферного воздуха г. Мурманска относятся предприятия теплоэнергетики, работающие на мазутном топливе, и автомобильный транспорт. При сжигании мазута совместно с дымовыми газами в атмосферу выбрасываются: оксиды серы, углерода, диоксид азота, бенз(а)пирен, мазутная зола и продукты механического недожога топлива. Мазутная зола представляет собой сложную смесь, состоящая в основном из оксидов металлов (Ca, Mg, Fe, Na, Si, S, V, Ni) (Новоселов, 1983). Соединения ванадия и никеля являются элементами-индикаторами деятельности мазутных ТЭЦ (Zoller et al., 1973; Agrawal et al., 2008; Peltier et al., 2010). Еще одним поставщиком вредных загрязняющих веществ в атмосферу города является завод по термической обработке бытовых отходов

(ОАО «Завод ТО ТБО»). В зависимости от технологии и состава сжигаемых отходов в атмосферный воздух совместно с дымовыми газами поступают следующие загрязняющие вещества: твердые взвешенные вещества (зольный остаток или шлак), кислоты и газообразные вещества (HCl , HF , HBr , HI , SO_x , NO_x , CO , CO_2 , N_2O , NH_3 , и др.), тяжелые металлы (Pb , Cu , Cd , Cr , Ni , V , Hg , As , Sb , Se , Zn , Fe , Co , Cr и др.) и др. (Quina et al., 2011; Tian et al., 2012). В результате эксплуатации автомобильного транспорта в окружающую среду поступают оксиды углерода, оксиды азота, диоксид серы, формальдегид, бензапирен, а также ряд тяжелых металлов (Pb , Cu , Zn , V , Ni , Cr , Cd и др.). в условиях городской среды увеличиваются объемы поступления органических веществ, биогенных элементов, тяжелых металлов и других загрязняющих веществ, что приводит к изменению гидрохимического, гидробиологического состояния водных экосистем и изменению трофического статуса водного объекта. Увеличение содержания главных катионов щелочных и щелочноземельных металлов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+), а также главных анионов (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), а также тяжелых металлов, может быть связано с разрушением элементов городских зданий и сооружений, а также с использованием реагентов для противогололедной обработки городских дорог (Даувальтер и др., 2022а).

Глава 2. Объект и методы исследования

Во второй главе представлена характеристика исследуемых озер г. Мурманска, а также изложены методы исследования.

Объектами исследований послужили озера г. Мурманска (Семеновское, Ледовое, Северное, Окуновое, Среднее, Южное, Треугольное, Большое), имеющие естественное происхождение и различную степень антропогенного воздействия на их водосборные территории.

Химические анализы проб воды

выполняли по единым общепринятым методикам в соответствии с рекомендациями (Clescerl et al., 1999; Моисеенко и др., 2002) в центре коллективного пользования Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, а также в аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН. Аналитическая программа включала в себя измерения pH, минерализации, щелочности, цветности, перманганатной окисляемости, общего органического углерода, главных ионов, азотной и фосфатной групп и т.д. Измерение концентраций Al , Fe , Sr осуществлялось на атомно-абсорбционном спектрофотометре AAnalyst – 800. Определение содержания микроэлементов (V , Cr , Co , Ni , Cu , Zn , Mo , Cd , Sn , Sb , W , Ti , Pb , Bi , Mn , Li , Sc , Rb , Y , Zr , Cs , Ba , La , Ce , Pr , Nd , Sm , Gd , B , U , Ti , Be) проводилось на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICP-MS ELAN 9000. Содержания

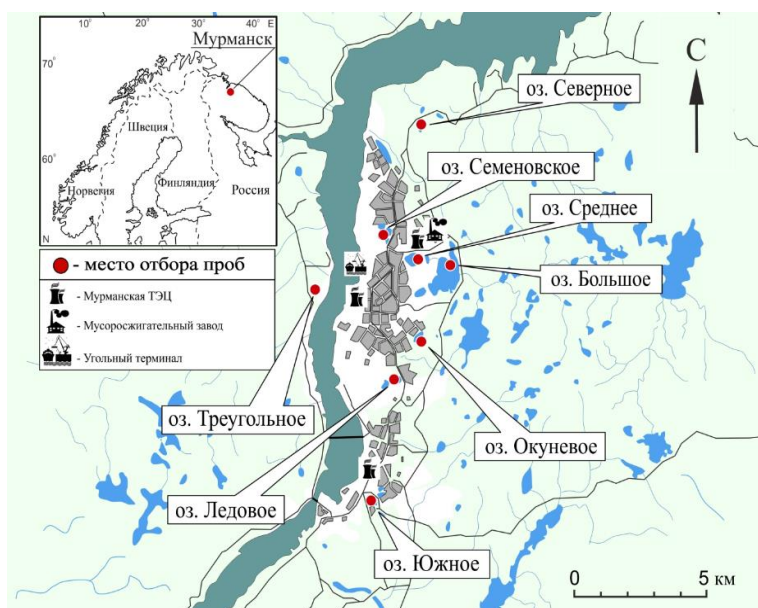


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования.

Chl «а» осуществлялось путем экстракции фотосинтетических пигментов раствором ацетона (90%, ЧДА) и дальнейшим определением оптической плотности экстрактов на спектрофотометре Hitachi UV-VIS 181.

Морфометрические параметры озер, характеризующие подводную (коэффициенты емкости, открытости, глубинности) и надводную (коэффициенты удлиненности, изрезанности) формы котловин, а также значения средней ширины озера и показатель удельного водосбора определены автором расчетным методом в соответствии с работами С.В. Григорьева, П.С. Лопух и О.Ф. Якушко (Григорьев, 1959; Лопух, Якушко, 2011).

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программ Microsoft Excel 2019, Statistica 10. Для выявления связи между концентрациями макро- и микроэлементов и факторов, определяющих химический состав вод исследуемых озер, был проведен корреляционный (коэффициент корреляции Пирсона) и факторный (метод главных компонент) анализы.

Глава 3. Современное состояние озер города Мурманска

В третьей главе представлены результаты исследования гидрохимического состава вод исследуемых озер – макроэлементный состав и общая минерализация, содержание биогенных элементов и органических соединений, а также тяжелых металлов и других микроэлементов. Проведен анализ сезонной динамики гидрохимических показателей в поверхностных и придонных слоях воды на примере оз. Семеновское. Определены приоритетные загрязнители озерных вод г. Мурманска.

Мурманск расположен на берегу Кольского залива Баренцево моря, что в значительной степени определяет формирование катионно-анионного состава исследуемых озер. Согласно классификации, О. А. Алекина (1970) исследуемые озера в основном относятся к хлоридному классу и натриевой группе, а также к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу групп натрия и кальция, что отличается от распределения главных ионов в озерах Мурманской области, в которых, как правило, воды относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы (Алекин, 1970).

По сравнению с условно-фоновыми значениями озера г. Мурманска характеризуются повышенным уровнем содержания основных катионов и анионов, а также значений рН и минерализации. Общая минерализация воды в озерах г. Мурманска превышает условно-фоновый уровень в 1,5–43 раза (Bazova, 2017). В результате урбанизации водосборов в городские водные объекты в значительном количестве поступают главные анионы и катионы щелочных и щелочноземельных металлов при выщелачивании фундаментов зданий и сооружений подземными водами, приобретающими агрессивность на урбанизированных территориях, при разрушении городских дорог, зданий и сооружений, в результате работы автотранспорта (дорожная пыль, выхлопные газы) и т.д. (Даувальтер и др., 2021).

Превышение концентраций общего азота (до 222 раз) и фосфора (до 75 раз) над условно-фоновыми значениями зафиксировано в большинстве озер г. Мурманска. Максимальные

концентрации общего фосфора (451 мкгР/л), равно как и азота (3550 мкгN/л), характерны для вод оз. Ледовое. Столь высокое превышение уровня содержания соединений азотной и фосфатной групп может быть связано с их поступлением в составе поверхностного стока с урбанизированных водосборных территорий, а также в результате вторичного поступления из донных отложений при разложении органического вещества и нефтепродуктов (Ball et al., 1951; Батуева и др., 1984; Котеков и др., 2013; Jermakka, 2014; Хохряков, 2016; Кремлева, Паничева, 2018).

Содержание органического вещества в исследованных озерах, как правило, меньше, чем средние показатели в озерах восточной части Мурманской области (Кашулин и др., 2010). Водные массы озер г. Мурманска формируются за счет поверхностного стока с городских территорий, в меньшей степени покрытых почвенно-растительным слоем, что приводит к снижению поступления аллохтонного органического материала. Исключение составляют озера Большое, Окуневое и Треугольное, расположенные в лесных зонах, наименее подверженных загрязнению.

Исследуемые озера в значительной степени подвержены антропогенному воздействию (предприятия энергетики, порты, здания, сооружения, дороги) со стороны городской среды, что, несомненно, сказывается на микроэлементном составе озерных вод. Наибольшее превышение условного фона в Мурманских озерах обнаружено для V, Ni, Cu, Zn, Al, Mn, Fe, Sr, Li, Rb, Ba, B. К наиболее загрязненному среди исследуемых озер относится оз. Ледовое, в котором зафиксированы максимальные концентрации большинства вышеперечисленных микроэлементов. К наименее подверженному антропогенному влиянию относится озеро Большое, являющимся одним из источников водоснабжения г. Мурманска.

Глава 4. Оценка степени загрязнения, закисления и эвтрофирования

В четвертой главе содержатся результаты оценки качества и экологического состояния исследуемых объектов в условиях антропогенного воздействия. Дана оценка устойчивости озер к закислению, определен трофический статус и степень загрязнения вод исследуемых озер. Рассмотрены межгодовые и межсезонные изменения, что позволяет более глубоко понять динамику экосистем в ответ на внешние факторы.

Устойчивость озер г. Мурманска к закислению. Атмосферные выбросы от промышленных предприятий и автомобильного транспорта оказывают негативное влияние на качественный состав атмосферных осадков и способствуют поступлению кислотных соединений (в особенности соединений серы) в водоемы и на их водосборные территории (Moiseenko et al., 2015; Chang et al., 2022). Проблема антропогенного закисления вод особенно актуальна для территорий Кольского Севера в связи с преобладающим атмосферным типом питания водоемов и кислоточувствительным геологическим строением водосборных территорий (Moiseenko et al., 2019). В северных районах водосборные бассейны сложены кислыми гранито-гнейсовыми породами с низкой скоростью выветривания и низким содержанием катионных оснований (Henriksen et al., 1997). К основным источникам, загрязняющим атмосферный воздух г. Мурманска, относятся предприятия

теплоэнергетики (ОАО "Мурманская ТЭЦ"; ГОУТП "ТЭКОС"; ОАО "Мурманский морской рыбный порт"), мусоросжигательный завод (ОАО "Завод ТО ТБО"), автомобильный транспорт. Анализ состава атмосферных осадков г. Мурманска за 2011-2020 гг. показал, что преобладающими ионами в их составе являются сульфаты и хлориды. При этом, доля сульфатов морского происхождения преобладала над сульфатами техногенного происхождения. По показателю pH атмосферные осадки носят слабокислый характер, медианные значения составляют 5,7 (Свистов и др., 2016; Першина и др., 2021). Согласно соотношениям основных катионов и анионов угроза закисления природных вод со стороны атмосферных осадков отсутствует (Томбер и др., 2016).

Критерии оценки закисления вод исследуемых озер. Оценка устойчивости исследуемых озер к закислению осуществлялась на основе следующих критериев: pH, щелочность (Alk), соотношение молярных концентраций ($\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$), кислотнейтрализующая способность вод (ANC).

На первом этапе закисления поверхностных вод значения pH не подвержены значительным изменениям в следствие того, что гидрокарбонат-ионы способны полностью нейтрализовать протоны водорода. В результате нарушения баланса между концентрациями катионов и гидрокарбонат-ионов происходит снижение буферной способности вод, что приводит к смещению показателя pH в сторону кислых значений.

По показателю pH воды в большинстве исследуемых озер относятся к нейтральным. Озера Треугольное и Южное характеризуются как водоемы со слабокислыми и слабощелочными водами соответственно. Озеро Большое находится в пограничном положении между слабокислым и нейтральным типом. Медианные значения Alk в исследуемых озерах варьировали в пределах от 69 (оз. Большое) до 3130 мкг-экв/л (оз. Ледовое). В уязвимых к закислению поверхностных водах снижение щелочности менее 50 мкг-экв/л представляет риск закисления (Nenonen, 1991).

Таблица 1

Значения основных критериев закисления озерных вод г. Мурманска за период 2018 – 2022 гг.

Озера	pH	Цв, Pt°	Hum, ед.	TDS, мг/л	SO_4^{2-} , мкг- экв/л	NO_3^- , мкг- экв/л	Alk, мкг- экв/л	Na^{+*} , мкг- экв/л	$\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$	ANC, мкг- экв/л
Северное, n = 9	6,95	25	13,8	381	612	13,5	430	-184	0,82	328
Семеновское, n = 26	6,66	12,5	7,8	71	219	1,48	312	18	1,39	306
Среднее, n = 11	7,26	7	5,1	141	637	1,94	687	159	1,06	670
Большое, n = 3	6,48	30	13,3	42	137	0	69	30	0,52	113
Окуновое, n = 7	6,93	53	23,3	61	298	0,07	329	57	1,03	350
Ледовое, n = 11	7,30	24	13,3	584	733	0,21	3130	581	4,09	3263
Треугольное, n = 6	6,19	48	22	19	69	0,21	98	45	1,47	156
Южное, n = 7	8,02	12	8,5	377	444	0	2506	290	4,45	2568

Соотношение молярных концентраций гидрокарбонатов по отношению к сумме сульфатов и нитратов ($\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) ниже 1 свидетельствует о риске закисления природных вод и отражает как увеличение нагрузки сульфатов, так и снижение буферной емкости поверхностных вод (Гашкина, 2014). В водах исследуемых озер г. Мурманска соотношение молярных концентраций ($\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) меньше единицы отмечалось только в оз. Северное (0,82) и оз. Большое (0,52), что может свидетельствовать о возможном вытеснении гидрокарбонатов более сильными кислотами антропогенного происхождения (Гашкина, 2014). Однако, уровень pH в данных озерах все еще находится в нейтральных значениях.

Помимо влияния аэротехногенной нагрузки, низкие значения pH озерных вод могут определяться высоким содержанием в них гумусовых кислот, косвенным показателем которых выступают величины цветности и гумусности (Hum) (Моисеенко и др., 2011; Лозовик, 2006). Наибольшие значения данных показателей приурочены к озерам Треугольное (pH 6,19; Цветность 48°Pt; Hum 22,3 ед.) и Окуновое (pH 6,93; Цветность 53°Pt; Hum 23,31 ед.). Данные озера расположены в лесных зонах, с повышенным поступлением аллохтонного органического вещества с водосборных территорий. Выявлена достаточно низкая корреляционная зависимость между значениями pH и цветности ($r = -0,37$ при $r_{\text{кр}} = 0,36$, $p = 0,001$, $n = 80$). Значимой корреляции между pH и показателем Hum не установлено. Столь низкие значения pH вод оз. Треугольное обусловлены низкими концентрациями щелочности и минерализации.

Трансформация морских аэрозолей также может являться фактором закисления поверхностных вод (Evans et al., 2011). На водосборах с низкой насыщенностью основаниями могут происходить ионообменные преобразования в почвенном покрове. Основные катионы морского происхождения, в особенности Na^+ замещаются в почве на протоны H^+ . Замещенные протоны, поступая в поверхностные воды, вызывают их закисление. Степень поглощения ионов Na^+ определяется по его концентрациям в водоемах с корректировкой на морские аэрозоли (Na^{+*}). Отрицательные значения ионов Na^{+*} отражают степень их поглощения на водосборе и высвобождение протонов водорода (Moiseenko, Gashkina, 2011). Из всех исследованных озер только в оз. Северное ($\text{Na}^{+*} - 184$ мкг-экв/л) отмечалось стабильное влияние данного эффекта.

В мировой практике для оценки закисления вод наиболее широкое распространение приобрел показатель кислотонейтрализующей способности (ANC), который отражает буферную способность вод к нейтрализации сильных кислот (Henriksen et al., 1992). Оценка кислотонейтрализующей способности озер г. Мурманска осуществлялась методом ионного баланса основных катионов и анионов минерализации без поправки на морские аэрозоли: $\text{ANC} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{NH}_4^+] - [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{NO}_3^-] - [\text{Cl}^-]$ (Базова, 2016).

В водах исследуемых озер показатель ANC варьировал в довольно широких пределах от 113 (оз. Большое) до 3263 мкг-экв/л (оз. Ледовое), что характеризует их как воды способные противостоять закислению ($\text{ANC} > 100$ мкг-экв/л) (Kremleva et al., 2013). Показатель ANC находится в прямой

зависимости от содержания гидрокарбонат-ионов ($r = 0,93$), а также насыщения вод обменными основаниями, такими как Ca, Mg, K, Na ($r = 0,66 - 0,83$). Высокие значения показателя ANC определяются влиянием городской среды.

По сравнению с условно-фоновыми значениями озера г. Мурманска характеризуются повышенным уровнем содержания основных катионов и анионов, а также значений pH и минерализации. Общая минерализация воды в озерах г. Мурманска превышает условно-фоновый уровень в 1,5–43 раза (Bazova, 2017). В результате урбанизации водосборов в городские водные объекты в значительном количестве поступают главные анионы и катионы при выщелачивании фундаментов зданий и сооружений подземными водами, приобретающими агрессивность на урбанизированных территориях, при разрушении городских дорог, зданий и сооружений, в результате работы автотранспорта (дорожная пыль, выхлопные газы) и т.д. (Даувальтер и др., 2021).

Трофический статус и лимитирующие факторы трофности озёр г. Мурманска. Эвтрофированием называют процесс обогащения вод биогенными веществами, прежде всего азотом и фосфором, которые стимулируют первичную продукцию и ярко проявляются в цветении водорослей и увеличении развития макрофитов (Vollenweider, 1992). При этом происходит накопление первичного (фотосинтезируемого) органического вещества вследствие преобладания скорости образования органических веществ (продукции) над скоростью их разложения (деструкции) (Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020).

В северных широтах в наибольшей степени распространены олиготрофные озера, что обусловлено физико-географическими условиями данных территорий. Обедненный питательными веществами маломощный почвенный покров, низкие температуры и короткий вегетационный период ограничивают скорость минерализации органического вещества и продуктивность водных экосистем в условиях субарктики (Brunberg et al., 2002; Dranga et al., 2018). Однако, анализ литературных источников показал, что встречаются случаи цветения и повышения уровня трофности природных вод в северных регионах в результате воздействия как природных, так и антропогенных факторов (Tammi et al., 1999; Терентьева и др., 2017; Dranga et al., 2018; Ayala-Borda et al., 2021; Kashulin et al., 2021).

Для оценки трофического состояния озера г. Мурманска в данном исследовании использовались следующие показатели: концентрация хлорофилла «а», общего фосфора, общего азота и общего органического углерода. Оценка осуществлялась исходя из стандартной международной классификации OECD (1982), классификации трофического статуса по содержанию хлорофилла «а» по С.П. Китаеву (2007), а также по индексам трофического состояния, разработанных Р.Э. Карлсоном, Ч.Р. Кратцером и П.Л. Брезоником, Ю.А. Дунальской (Carlson, 1977; Kratzer, Brezonik, 1981; Dunalska, 2011). По шкале Р. Карлсона олиготрофному состоянию водоема соответствует величина TSI <40, мезотрофному TSI = 40–50, эвтрофному – от 50 до 70, а гипертрофному > 70.

Трофический статус озер г. Мурманска по классификации OECD не был столь однозначен и в одном и том же водоеме варьировал от олиготрофного до эвтрофного в зависимости от выбранного показателя трофическое состояние вод (таблица 3).

Таблица 2

Медианные и максимальные значения содержания хлорофилла «а» (Chl «а»), медианные концентрации общего фосфора (TP), общего азота (TN), общего органического углерода (TOC), величин соотношения TN/TP и TOC/N_{орг} в озерах г. Мурманска

Озера	Chl«а», мг/л		TP, мкгP/л	TN, мкгN/л	TOC, мг/л	TN/TP	TOC/N _{орг}
	Mean	Max.					
Северное	2,05	11,35	14,0	374	6,1	26	25
Семеновское	8,01	24,69	25,5	501,5	5,2	18	19
Среднее	2,75	5,38	11,0	301	4,3	28	24
Большое	1,96	1,96	8,0	150	6,1	19	42
Окуновое	1,50	7,42	15,0	289	9,1	20	37
Ледовое	26,84	45,3	451	3550	8,1	8	14
Треугольное	2,01	2,56	16,5	295	9,1	17	38
Южное	1,84	2,10	19,0	277	6,1	15	25
Фон (Bazova, 2017)	–	–	6	160	4,2	27	30
Фон (Кашулин и др., 2010)	–	–	8	248	8,02	31	34

В свою очередь, по классификации С.П. Китаева (2007) (Chl «а»: <1,5 мг/л – ультраолиготрофный тип; 1,5–3 мг/л – олиготрофный; 3–6 мг/л – α-мезотрофный; 6–12 мг/л – β-мезотрофный; 12–24 мг/л – α-эвтрофный; 24 – 48 мг/л – β-эвтрофный; > 48 мг/л – политрофный) озера Северное, Среднее, Большое, Окуновое, Треугольное, Южное оцениваются как олиготрофные. Медианные концентрации Chl «а» в вышеперечисленных озерах не превышали 3 мг/л. Озера Семеновское (Chl «а» 8,01 мг/л) и Ледовое (Chl «а» 26,84 мг/л) относятся к β-мезотрофному и β-эвтрофный типам соответственно.

Согласно значениям общего индекса TSI, все исследуемые озера относятся к водоемам олиготрофного типа. Кроме оз. Ледовое, для которого медианное значение индекса TSI равно 46, что соответствует статусу мезотрофное (таблица 4).

Таблица 3

Индекс трофического состояния озер г. Мурманска за период 2018 – 2022 гг.

Озера	TSI (Chl «а»)	TSI (TP)	TSI (TN)	TSI (TOC)	TSI	*Трофический статус
Северное, n = 9	34	21	48	33	34	Олиготрофный
Семеновское, n = 26	39	24	50	32	36	Олиготрофный
Среднее, n = 11	35	19	47	30	33	Олиготрофный
Большое, n = 3	34	17	43	30	33	Олиготрофный
Окуновое, n = 7	32	21	47	36	34	Олиготрофный
Ледовое, n = 11	45	42	62	35	46	Мезотрофный
Треугольное, n = 6	34	22	47	36	35	Олиготрофный
Южное, n = 7	33	23	46	33	34	Олиготрофный

Примечание: * – трофический статус озер определен по значениям общего индекса TSI

Из всех исследуемых озер в водах оз. Ледовое зафиксированы наибольшие концентрации соединений азотной и фосфатной групп. Среди олиготрофных озер наибольшие значения индекса TSI характерны для оз. Семеновское, что возможно связано с высокой рекреационной нагрузкой на водоем, близостью автомобильных дорог, а также с поступлением сточных вод местного океанариума, расположенного на берегу озера.

В результате повышенного содержания элементов минерального питания фитопланктона в озерах г. Мурманска выявлено превышение значений уровня содержания хлорофилла «а» (в 7,5 – 134 раза) по сравнению с принятыми фоновыми значениями для озер Кольского полуострова, что подтверждается достоверными корреляционными зависимостями между концентрациями Chl «а» и содержанием TP ($r=0,87$), PO_4^{3-} ($r=0,70$), NH_4^+ ($r=0,75$), TN ($r=0,66$) (при $p=0,001$ и $n=40$) в водах исследуемых озер. Содержание токсичных тяжелых металлов (например, Co, Pb, Cr, Cd) в городских озерах способно оказывать угнетающее воздействие на фотосинтетическую активность фитопланктона, однако в исследуемых озерах подобной зависимости не выявлено.

Согласно значениям TN/TP (TN/TP <10 лимитирует азот, при TN/TP >17 – фосфор) в большинстве исследуемых озер лимитирующим фактором развития фитопланктона является фосфор (Smith, 1982). Оз. Треугольное и Южное характеризуются оптимальными условиями для развития фитопланктона. В оз. Ледовое первичная продукция ограничивается азотом. При этом, отношение TN/TP может зависеть от природы преобладающего органического вещества в водоемах, показателем которого выступает соотношения органического углерода к органическому азоту (при $TOC/N_{org} = 12$ преобладает автохтонное органическое вещество, при $TOC/N_{org} > 47$ – аллохтонное) (Паничева и др., 2015). Выявлено, что в озерах с высоким содержанием хлорофилла «а» (оз. Ледовое, Семеновское), за счет повышенной продуктивности фитопланктона происходит накопление автохтонного органического вещества, обогащенного азотом (Gashkina, 2011). В озерах, расположенных в естественных лесных зонах г. Мурманска (оз. Большое, оз. Окуновое, оз. Треугольное), также как и на фоновых территориях, содержание аллохтонного вещества выше за счет его поступления в составе поверхностного стока с водосборных территорий.

Оценка степени загрязненности озерных вод г. Мурманска. Водные объекты в условиях урбанизации подвержены разностороннему антропогенному воздействию. В результате деятельности промышленных предприятий и эксплуатации автотранспорта, а также поступления ливневых стоков с городских территорий в поверхностные воды в повышенных количествах поступают различные загрязняющие вещества, такие как щелочные и щелочноземельные металлы, биогенные элементы, тяжелые металлы и др. Как следствие, в водоемах происходит изменение химического состава природных вод, что, несомненно, сказывается на их качестве и пригодности их использования для различных видов водопользования (Саэт и др., 1990; Никаноров, 2001; Даувальтер и др., 2021).

Для оценки качества вод озер г. Мурманска были использованы индексы, основанные на значениях pH, главных ионов минерализации и биогенных элементов (метод взвешенного арифметического индекса качества воды (WAWQI)) (Brown et al., 1970), а также концентрациях тяжелых металлов (ТМ): загрязнения тяжелыми металлами (HMPI) (Mohan et al., 1996), оценки тяжелых металлов (HMEI) (Haque et al., 2019; Karaouzas et al., 2021), токсичности тяжелых металлов (HMTL) (Saha, Paul, 2018; Яковлев и др., 2022) (табл. 1). В качестве стандартных допустимых значений использовались значения предельно допустимые концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{хп/кб}) и предельно допустимые концентрации в воде водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}). Кроме того, был использован региональный индекс загрязненности воды (ИЗВ_{рег}), определяемый на основе расчетных значений региональных ПДК, учитывающий как токсичность элементов по их ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, так и их геохимический фон (Лозовик и др., 2017).

Согласно полученным результатам (таблица 5), медианные значения индекса WAWQI вод исследуемых озер, рассчитанные на основе ПДК_{хп/кб} и ПДК_{рх} назначения варьировали в пределах от 1,3 до 25 и от 2,1 до 51,6 соответственно. Таким образом, качество вод озер г. Мурманска по значениям индекса экологического состояния, рассчитанного на основе pH, главных ионов минерализации и биогенных элементов, оцениваются как отличное. За исключением оз. Ледовое, воды которого по назначению рыбохозяйственного водопользования классифицируется как воды плохого качества. К основным параметрам качества вод, оказывающих наибольшее влияние на значения индекса WAWQI, относятся pH, NH₄⁺ и PO₄³⁻.

Таблица 4

Медианные значения индексов загрязненности озерных вод г. Мурманска за период 2018 – 2022 гг.

Озеро	WAWQI _{хп/кб}	WAWQI _{рх}	HMPI _{хп/кб}	HMPI _{рх}	HMEI	HMTL	ИЗВ _{рег}
Северное, n = 9	2,8	6,0	10,7	125	11,4	36,1	2,5
Семеновское, n = 26	5,4	7,2	3,6	103	10,3	36,5	2,4
Среднее, n = 11	3,7	2,6	4,7	103	7,0	17,6	2,1
Большое, n = 3	4,2	7,6	1,7	99	7,8	23,7	2,0
Окуновое, n = 7	1,3	2,1	3,9	125	12,8	26,9	2,5
Ледовое, n = 11	25,0	51,6	7,9	292	62,1	304	8,0
Треугольное, n = 6	6,2	1,6	3,5	96,9	19,1	33,8	4,9
Южное, n = 7	10,2	3,0	2,1	67,7	5,4	16,3	2,1

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, соответствующие низкому качеству вод, согласно принятым критериям.

Несмотря на отсутствие непосредственных сбросов сточных вод от предприятий города Мурманска, качество вод исследуемых озер по отношению к содержанию ТМ для рыбохозяйственного водопользования в большинстве случаев не соответствует категории «чистая». Медианные значения индекса токсичности HMTL озерных вод г. Мурманска изменялись от 16,3 (оз. Южное) до 304 (оз. Ледовое), что отвечает низкой и высокой степени токсичности вод. Степень токсичности вод исследуемых озер в целом определяется влиянием концентраций Mn (49%), Zn (18%), Ni (17%), V (6%) и Cu (5,5%). При этом, в водах оз. Ледовое, для которого характерны максимальные значения

индекса НМТЛ, доля Мп от общего значения индекса достигала 92%. Согласно расчетам значений регионального индекса загрязнения воды, качество вод в исследуемых озерах соответствует категориям от «загрязненная» до «очень грязная». К показателям, вносящим основной вклад в значения индекса ИЗВ_{рег} вод озер г. Мурманска, относятся Мп, Fe, V, Ni, Sr, Zn и Al. Таким образом, значения примененных индексов загрязненности отражают влияние городской среды на состояние исследуемых озер г. Мурманска.

Подводя итоги важно отметить, что сравнительный анализ значений индексов WAWQI и NMPI, рассчитанных на основе значений ПДК для вод водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового и рыбохозяйственного назначения показал значительные различия в степени загрязненности озерных вод г. Мурманска. Установлено, что по значениям вышеперечисленных индексов воды большинства исследуемых озер характеризуются как воды отличного качества и по выбранным параметрам качества вод соответствуют требованиям, предъявляемым к водоемам хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения. С другой стороны, исследуемые воды большинства озер оцениваются как воды ненадлежащего качества для использования в рыбохозяйственных целях. В тоже время, ПДК_{рх} имеют более высокие значения по сравнению с региональными ПДК, учитывающими не только токсичность элементов по ПДК_{рх}, но и их геохимический фон. В свою очередь, применение значений РПДК, позволяет учитывать региональные особенности условий формирования качественного состава природных вод, что более объективно отражает степень загрязненности водных объектов.

Глава 5. Факторы, влияющие на химический состав озерных вод

В пятой главе представлены результаты выявления основных факторов, определяющих химический состав вод исследуемых озер на основе статистического анализа данных. Определено сопряженное поступление макро- и микроэлементов в озерные воды, также рассмотрены особенности их водной миграции.

Для выявления основных факторов, определяющих химический состав вод исследуемых озер был проведен факторный анализ методом главных компонент, выявивший 4 значимых фактора, объясняющих 82% общей дисперсии.

Таблица 5

Факторные нагрузки, собственные значения и процент объясняемой дисперсии выявленных факторов

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
F	-0,605	-0,669	0,219	0,004
F _{бас}	0,144	-0,155	0,625	0,170
K _{гл}	0,573	0,350	-0,036	0,209
K _{октр}	-0,709	-0,602	0,155	-0,125
Δ F	0,669	0,424	0,226	0,057
pH	0,793	-0,316	-0,044	-0,176
TDS	0,977	-0,064	0,141	0,039
NH ₄	0,171	0,101	0,700	-0,124

	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Ca	0,961	-0,085	0,179	0,043
Mg	0,982	-0,091	0,100	-0,039
Na	0,952	-0,073	0,126	0,041
K	0,945	-0,207	0,196	0,003
HCO ₃	0,905	-0,146	0,308	-0,053
SO ₄	0,843	-0,282	-0,188	0,221
Cl	0,931	-0,093	0,135	0,046
TN	0,361	0,159	0,653	0,282
TP _{н/ф}	0,231	0,256	0,801	0,090
Цветность	-0,106	0,949	0,024	-0,016
Hum	-0,060	0,960	0,020	-0,082
TOC	0,018	0,928	0,029	-0,174
Si	0,175	0,833	0,300	0,197
ANC	0,896	-0,094	0,309	-0,073
A	0,018	0,928	0,029	-0,174
Al	-0,024	0,753	0,076	0,325
Fe	-0,183	0,761	0,509	0,085
Li	0,954	0,118	0,143	-0,001
V	-0,006	0,216	0,161	0,772
Cr	0,491	0,327	0,079	0,290
Co	0,501	0,472	0,451	0,191
Ni	0,445	0,097	0,256	0,761
Cu	0,055	0,236	-0,218	0,424
Zn	0,017	0,499	0,125	0,660
Rb	0,923	-0,081	0,131	0,163
Sr	0,964	-0,083	0,195	0,049
Y	0,032	0,942	0,068	0,259
Mo	0,846	-0,017	-0,187	0,213
Ba	0,900	0,110	0,222	-0,016
La	-0,181	0,812	0,101	0,239
Pr	-0,106	0,909	0,093	0,305
Nd	-0,069	0,925	0,109	0,247
Sm	-0,078	0,929	0,068	0,259
Gd	-0,036	0,932	0,077	0,231
U	0,879	0,362	-0,179	0,056
Mn	0,009	0,326	0,715	-0,035
Собственные значения	17,0	13,4	3,2	2,2
% объясняемой дисперсии	38,7	30,4	7,9	4,9

Примечание: Жирным шрифтом выделены факторные нагрузки > 0,5; F – площадь озера; F_{бас.} – площадь водосборного бассейна; K_{гл} – коэффициент глубинности; K_{откр} – коэффициент открытости; Δ F – показатель удельного водосбора; TDS – общая минерализация; Hum – гумусность вод; TOC – общий органический углерод; ANC – кислотнейтрализующая способность вод.

В первый фактор (38,7% объяснимой дисперсии) вошли такие параметры, как pH, TDS, ANC, а также концентрации главных ионов и следующих микроэлементов: Sr, Li, Rb, Ba, U, Mo. Кроме того, в первый фактор вошли такие морфометрические показатели озер, как площадь водного зеркала, показатель удельного водосбора, коэффициенты открытости и глубинности. Данный фактор отражает связь химического состава озерных вод с поступлением вышеперечисленных элементов с водосборных территорий. Поскольку исследуемые озера располагаются на урбанизированных

территориях, данный фактор отражает как природные (геологическое строение района исследования, морские аэрозоли Баренцева моря), так и антропогенные источники поступления главных ионов, а также щелочных и щелочноземельных металлов (разрушения инфраструктуры, поступления ливневых вод, повышенной эрозии городских почв, применения противогололедных реагентов и т.д.). Второй фактор (30,4% объяснимой дисперсии) обуславливает влияние почвенного покрова и коренных горных пород на химический состав озерных вод и определяет совместное поступление Si, Al, Fe и редкоземельных элементов (Y, La, Pr, Nd, Sm, Gd) в составе аллохтонного органического вещества в исследуемые озера. Третий фактор (7,9% объяснимой дисперсии) объединил в себе факторные нагрузки по следующим показателям: площадь водосборного бассейна и концентрации NH_4^+ , TN, TP, Fe, Mn в озерных водах. Вероятно, в качестве третьего фактора выступает процесс эвтрофикации озер, а также окислительно-восстановительные условия внутри водоемов. Четвертый фактор (4,9% объяснимой дисперсии) демонстрирует локальную антропогенную нагрузку (сжигание мазутного топлива, деятельность автомобильного транспорта) на водоемы и объединяет в себе микроэлементы техногенного происхождения (Ni, V, Zn).

Трансформация химического состава вод и особенности водной миграции элементов в условиях городской среды. Для оценки степени трансформации химического состава вод исследуемых озер под влиянием антропогенной нагрузки, а также выявления особенностей водной миграции химических элементов в условиях городской среды были использованы коэффициент водной миграции (K_x), коэффициент контрастности водной миграции (K_k), а также коэффициент концентрации химических элементов относительно условно-фоновых величин (K_c).

Коэффициент водной миграции отражает отношение содержания химического элемента в минеральном остатке воды водоема к его содержанию в горных породах или почвах, слагающих водосборный бассейн: $K_x = \frac{m_x \times 100}{a \times n_x}$, где m_x – содержание элемента в воде, мг/л; a – сумма минеральных веществ, растворенных в воде (минерализация вод), мг/л; n_x – содержание элемента в породах, % (Сагет и др., 1990). За содержание элемента в породах были приняты значения концентраций химических элементов, входящих в состав горных пород (граниты, диориты, лейкограниты) северо-восточной части водосбора Баренцева моря (Мурманский ландшафтно-геохимический район) (Базова, 2016). В свою очередь, коэффициент K_k определяется как отношение значений коэффициента водной миграции одного и того же элемента в условиях разных ландшафтов и позволяет количественно выразить степень изменчивости миграционной способности химических элементов из пород в условиях урбанизированной среды относительно природный условий.

Установлено, что сильной миграционной способностью в водах исследуемых озер обладают Zn, Na, Mg, Ca, Cs, K; средней – Mn, Ni, V, Sr, B, Li, Cu, Rb, Fe; слабой – Ba, La, Pb, Si, Ce, Nd, Cr, Ti, Y, Al, Zr. Воды озер г. Мурманска отличаются меньшими значениями водной миграции большинства

исследованных элементов (Cs, La, Na, B, Ce, Rb, Pb, Sr, Li, Nd, K, Y, Cr, Si, Cu, Zr) по сравнению с величинами условного фона, за исключением Ca, Mg, Zn, Mn, V, Ni, Cu, Ti.

Кальций, магний и цинк в гумидных районах (особенно в слабокислых и кислых условиях среды) активно мигрируют из состава почв и горных пород благодаря своей широкой распространенности и высокой растворимости соединений (Перельман, Касимов, 1999). Однако, контрастность миграции Ca и Mg отмечается также в водах озер для которых характерны нейтральные значения pH, что вероятно обусловлено процессом благоустройства городских территорий (изменения рельефа, физико-химических свойств горных пород и почвенного покрова, гидрологических условий) (Комарова, 2015; Knox et al., 2000; Селезнев и др., 2023). Восстановительная обстановка в придонных слоях исследуемых озер способствует увеличению интенсивности миграции Fe и Mn. Для вод озер Треугольное (pH = 6,19), Окуновое (pH = 6,9), Большое (pH = 6,48), характерна наибольшая контрастность для Fe, Zn, Mn, V, Cu, Ni, Ti, что обусловлено более низкими значениями pH вод и как повышенной подвижностью Zn, Cu, Ni. А образующиеся в процессе биохимического выветривания горных пород и почвообразования коллоиды также способствуют миграции Fe, Al, Ti, Mn, V, Ni, Cu в составе комплексных соединений (Перельман, Касимов, 1999).

Согласно значениям коэффициентов концентрации для вод озер г. Мурманска элементы Si, Ti, Co, Mo, Pb, W, U, Sb, Sc, Nd, Y, La, Zr, Cs, Ce, Cd, Sn, Gd, Pr, Sm, Be, Bi, B, Tl характеризуется низкой концентрирующей способностью ($K_c < 1$ - не превышает условно-фоновых значений). При этом отмечен значительный уровень превышения над фоном для главных ионов минерализации Ca (K_c 19), Cl (K_c 14), Na (K_c 13), HCO_3^- (K_c 12), SO_4^{2+} (K_c 10), K (K_c 9), Mg (K_c 6,6), а также таких элементов как Mn (K_c 27), Sr (K_c 18), Fe (K_c 9,4), Ba (K_c 7,2), Ni (K_c 5,4), V (K_c 4,6), Rb (K_c 4), Zn (K_c 4). Превышение условно-фоновых концентраций для различного рода химических элементов, в особенности тяжелых металлов, является характерной чертой для водных объектов, располагающихся в условиях городской среды. Сопоставление значений коэффициентов концентрации вод озер г. Мурманска с величинами K_c вод реки Лососинка (г. Петрозаводск), рассчитанных по данным Д.С. Рыбакова (2024) показало, что на вышеперечисленных урбанизированных территориях отмечается превышение условного фона по схожим химическим элементам (Mn, Cu, Co, V, Ni, U, Zn, Cr, Ba, Fe, K, Li, Mg, Sr, Na, Ca). Однако, уровень превышения по каждому химическому элементу в различной степени может варьировать как в большую, так и в меньшую сторону. Отличительной чертой вод реки Лососинка являются значительное превышение над фоном для Ag, Pb, Sb, Cd, As, Mo, Th, что не характерно для вод озер г. Мурманска. Таким образом, урбанизированная среда выступает не только как источник поступления различных видов поллютантов в водные экосистемы, но и может способствовать ускорению миграционных процессов химических элементов в результате антропогенной деятельности человека.

Основные выводы диссертационного исследования:

1. Формирование химического состава озерных вод г. Мурманска обусловлено комплексным воздействием природных и антропогенных факторов. К основным факторам, определяющим поступление и распределение химических элементов в исследуемых озерах относятся: физико-географические особенности района исследования, в частности климат, поступление морских аэрозолей, геологическое строение водосборных территорий, состав почвенного покрова; процессы протекающие внутри водоема (эвтрофикация, геохимическая обстановка, характеризующаяся такими показателями, как pH, окислительно-восстановительный потенциал); антропогенная нагрузка (поступление загрязняющих веществ в результате деятельности предприятий г. Мурманска и автотранспорта, а также работ по благоустройству урбанизированной среды).

2. Установлено, что по содержанию главных ионов исследуемые озера в основном относятся к хлоридному классу и натриевой группе, а также к смешанному гидрокарбонатно-хлоридному классу групп натрия и кальция, что отличается от распределения главных ионов в озерах Мурманской области, в которых, как правило, воды относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. Формирование катионно-анионного состава озер г. Мурманска в значительной степени определяется влиянием физико-географических особенностей района исследования и поступлением растворимых и взвешенных веществ с урбанизированных территорий.

3. Выявлено, что под воздействием урбанизированной среды химический состав вод исследуемых озер значительно трансформирован по сравнению со значениями условно-фоновых озер северо-восточной части Мурманской области, что выражается в увеличении показателей pH, минерализации, концентраций главных ионов, биогенных элементов и микроэлементов (V, Ni, Cu, Zn, Al, Mn, Fe, Sr, Li, Rb, Ba, B). Кроме того, исследуемые озера характеризуются более низким уровнем содержания органического вещества по сравнению с природными условиями, что обусловлено уменьшением поступления аллохтонного органического вещества в составе поверхностного стока с городских территорий, в меньшей степени покрытых почвенно-растительным слоем.

4. Химический состав вод исследуемых озер подвержен значительным сезонным колебаниям и изменению вертикального распределения гидрохимических показателей, что обусловлено сменой преобладающих типов питания водоемов, осенним перемешиванием озерных вод и биолого-химическими процессами, протекающими внутри водоемов (процессами продукции и деструкции органического вещества), а также возникновением стратификации окислительно-восстановительных условий в водной толще озер. В зимне-весенний период в придонных слоях озер выявлено увеличение минерализации и концентрации гидрокарбонатов. Максимальные значения pH, биогенных элементов и микроэлементов характерны для весеннего периода. В поверхностных горизонтах отмечаются повышенные концентрации V, Ni, Zn, Mo, в придонных - биогенных элементов, Fe, Mn, Al, Co, Ba, Sr, Rb.

5. Анализ качества озерных вод г. Мурманска показал, что по показателю pH исследуемые озера в основном оцениваются как нейтральные, а по значениям щелочности и кислотонейтрализующей способности способны противостоять закислению. Показатель ANC находится в прямой зависимости от содержания гидрокарбонат-ионов, а также насыщения вод обменными основаниями. Показатели pH и щелочности демонстрируют выраженную сезонную динамику, увеличиваясь в летне-осенний период и снижаясь зимой и весной. Эти изменения связаны с процессами продукции и разложения органического вещества в самих водоемах. В межгодовой динамике устойчивости исследуемых озер к закислению отмечается тенденция к снижению значений показателя ANC.

6. По индексу трофического состояния Карлсона трофический статус озер г. Мурманска оценивается как олиготрофный, за исключением оз. Ледовое – мезотрофный. Для исследуемых озер не характерна ярко выраженная межгодовая и межсезонная динамика индекса трофического состояния. При этом, в озерах г. Мурманска выявлено превышение значений уровня содержания хлорофилла «а» (в 7,5 – 134 раза) по сравнению с принятыми фоновыми значениями для озер Кольского полуострова, что обусловлено повышенными концентрациями элементов минерального питания фитопланктона. Лимитирующим биогенным элементом развития фитопланктона в большинстве исследуемых озер является фосфор. С увеличением трофности биологическая продуктивность фитопланктона в большей степени ограничивается содержанием общего азота, а также повышается доля автохтонного органического вещества. Накопление аллохтонного органического вещества больше в водоемах, расположенных в естественных лесных зонах г. Мурманска. Угнетающее воздействие токсичных ТМ на фотосинтетическую активность фитопланктона в водах исследуемых озер не выявлено.

7. Проведена оценка экологического состояния озер г. Мурманска на основе интегральных индексов загрязненности вод для различных типов водопользования. Согласно значениям индекса загрязненности вод, определенных по рассчитанным региональным предельно допустимым концентрациям, качество вод в исследуемых озерах соответствует категориям от «загрязненная» до «очень грязная». Несмотря на отсутствие непосредственных сбросов сточных вод от предприятий города Мурманска, качество вод исследуемых озер по отношению к содержанию ТМ в большинстве случаев не соответствует категории «чистая». Наибольший вклад в значения индексов загрязненности вод внесли следующие показатели качества природных вод: pH, минерализация, концентрации NH_4^+ , PO_4^{3-} , Mn, Fe, V, Ni, Cu, Zn, Sr и Al. Значения индексов загрязнения подвержены сезонной и вертикальной изменчивости. В годовой динамике для ряда озер отмечается тенденция к ухудшению качества природных вод в связи с увеличением концентраций ТМ.

8. Анализ коэффициентов водной миграции в озерах города Мурманска показал, что Zn, Na, Mg, Ca, Cs, K обладают сильной миграционной способностью. Такие элементы, как Mn, Ni, V, Sr, B, Li, Cu, Rb проявляют среднюю миграцию, а Ba, La, Pb, Si, Ce, Nd, Cr, Ti, Y, Al и Zr характеризуются как слабые водные мигранты. В исследуемых озерах выявлена повышенная миграция Ca, Mg, Zn, Mn,

V, Ni, Cu, Ti по сравнению с озерами северо-восточной части водосбора Баренцева моря. При этом, для озерных вод г. Мурманска характерен значительный уровень превышения над условным фоном для главных ионов минерализации, также таких элементов как Mn, Sr, Fe, Ba, Ni, V, Rb, Zn. На основе гидрохимического состава вод исследуемых озер, а также значений водной миграции элементов выявлено, что урбанизированная среда выступает не только как источник поступления различных видов поллютантов в водные экосистемы, но и может способствовать ускорению миграционных процессов химических элементов в результате антропогенной деятельности человека.

Список работ по теме диссертационного исследования:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ:

1. **Постевая, М.А.** Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер / М.А. Постевая, З.И. Слуковский // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2021. – Т. 24. – №2. – С. 190-201. (1,3 п.л./ 1,0 п.л.) (GeoRef)

2. **Постевая, М.А.** Оценка устойчивости городских озер к закислению в условиях Арктики / М.А. Постевая, З.И. Слуковский, В.А. Даувальтер // Экология урбанизированных территорий. – 2024. – № 4. – С. 32-39. (0,9 п.л./ 0,7 п.л.)

3. **Постевая, М.А.**, Закономерности формирования химического состава озерных вод урбанизированной среды в Арктике (на примере озер города Мурманска) / М.А. Постевая, В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Серия Лимнология и океанология. – 2025. – №2. – С. 33-50. (2,1 п.л./ 1,6 п.л.)

4. **Постевая, М.А.** Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска) / М.А. Постевая, В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский // Российский журнал прикладной экологии. – 2025. – Т. 24. – №1. – С. 10-18. (1,1 п.л./ 0,8 п.л.)

Статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных:

5. **Postevaya, M.A.** 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, D.S. Bernadskaya // Water. – 2021. – Vol. 13. – №. 22. – P. 3267. (0,8 п.л./ 0,5 п.л.) (Scopus, WoS)

6. **Postevaya, M.** Chemical composition and trophic status of urban lakes of the Arctic zone of the Russian Federation (Murmansk) / M. Postevaya, V. Dauvalter, Z. Slukovskii, L. Kudryavtseva // Ecohydrology. – 2023. – Vol. 16. – №2. – P. e2505. (0,7 п.л./ 0,4 п.л.) (Scopus, WoS)

Прочие публикации:

7. **Постевая, М.А.** Сезонная динамика химических показателей воды озера Семеновского (город Мурманск) в 2019 г / М.А. Постевая, З.И. Слуковский, В.А. Даувальтер // Водные ресурсы: изучение и управление (школа-практика): материалы VI Международной конференции молодых

ученых, Петрозаводск, 1-5 сентября 2020 г. – Петрозаводск: Карельский Научный центр РАН, 2020. – С. 63-67. (0,5 п.л./ 0,3 п.л.)

8. **Постевая, М.А.** Оценка загрязнения тяжелыми металлами урбанизированных водоемов Арктической зоны РФ / З.И. Слуковский, В.А. Даувальтер, А.В. Гузева, М.А. Постевая // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики: Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова, Архангельск, 02–05 ноября 2020 года. – Архангельск: ФБГУН ФИЦКИА РАН, 2020. – С. 573-577. (0,5 п.л./ 0,1 п.л.)

9. **Постевая, М.А.** Оценка концентраций тяжелых металлов в воде озер города Мурманска / М.А. Постевая, З.И. Слуковский // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXIV Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 21–23 апреля 2021 года. Т. 2. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2021. – С. 111-115. (0,3 п.л./ 0,2 п.л.)

10. **Постевая, М.А.** Озёра города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности / З.И. Слуковский, Д.Б. Денисов, В.А. Даувальтер [и др.]. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. – 174 с. (15,2 п.л./ 3,0 п.л.)

11. **Постевая, М.А.** Гидрохимический мониторинг озер города Мурманска / В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский, М.А. Постевая, Д.Б. Денисов // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции к 225-летию Герценовского университета. Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2022 года. Том I. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. – С. 157-161. (0,3 п.л./ 0,1 п.л.)

12. **Постевая, М.А.** Гидрохимия редкоземельных элементов озер города Мурманска / В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский, М.А. Постевая [и др.] // Наука и образование-2021: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 01 декабря 2021 года. – Мурманск: МГТУ, 2022. – С. 554-560. (0,8 п.л./ 0,1 п.л.)

13. **Постевая, М.А.** Трофический статус и лимитирующие факторы трофности озёр г. Мурманска / М.А. Постевая, В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский, Д.Б. Денисов // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXVI Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года. Том I. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2023. – С. 284-288. (0,3 п.л./ 0,2 п.л.)

14. **Постевая, М.А.** Оценка устойчивости урбанизированных водоемов Арктической зоны РФ к закислению / М.А. Постевая, В.А. Даувальтер, З.И. Слуковский // География: развитие науки и образования: Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции LXXVII Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2024 года. Том I. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2024. – С. 317-321. (0,3 п.л./ 0,2 п.л.)