

На правах рукописи



РУФОВА АЛЕНА АФАНАСЬЕВНА

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
СТАРИЧНЫХ ОЗЕР В УРБОЭКОСИСТЕМАХ ЯКУТСКА**

1.6.21. Геоэкология (географические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Улан-Удэ – 2026

Работа выполнена в Государственном бюджетном учреждении
«Академия наук Республики Саха (Якутия)» (АН РС (Я)),
Республика Саха Якутия, г. Якутск

Научный руководитель: **Легостаева Яна Борисовна,**
кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории геоэкологии и биогеохимии Института геологии
алмаза и благородных металлов Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Якутск

Официальные оппоненты: **Шмакова Марина Валентиновна,**
доктор географических наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель лаборатории математических методов
моделирования Института озераведения Российской академии
наук – обособленного структурного подразделения
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук», г. Санкт-Петербург

Белозерцева Ирина Александровна,
кандидат географических наук, заведующий лабораторией
геохимии ландшафтов и географии почв Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института
географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
г.Москва

Защита состоится «6» октября 2026 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного
совета 24.1.506.01, созданного на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Байкальского института природопользования
Сибирского отделения Российской академии наук (БИП СО РАН) по адресу:
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6.

E-mail: dissovet@binm.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке БИП СО РАН и на
сайте www.binm.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.н.



Жарникова Маргарита Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Городские озера – это сложный и непрерывно развивающийся природный комплекс, находящийся под постоянным разноуровневым антропогенным воздействием. С одной стороны, они являются природными объектами окружающей среды, с другой, расположение на урбанизированных территориях вносит весомую роль в их состояние и вызывает массовое загрязнение и деградацию озерных систем. Ухудшению подвергаются все компоненты озерной экосистемы: аллювиальные почвы, донные отложения, поверхностные воды и биота. Это ведет к угнетению экосистемы в целом и появлению реальной экологической опасности с разрушительными последствиями вплоть до обмеления и исчезновения озер. Поэтому комплексные исследования экологического состояния городских озер становятся все более востребованными.

Площадкой исследования выбрана территория столицы одного из самых крупных по площади регионов РФ – г. Якутск. Главной водной артерией Якутска является р. Лена, проходящая вдоль города и пригородов, и практически все озера в пределах городской черты являются старичными. Научная значимость геоэкологической оценки старичных озер обусловлена отсутствием исследований в контексте «почва – донные отложения – вода» для селитебной территории Якутска, несмотря на глубокую проработку общей озерной тематики в трудах якутских ученых-исследователей. На сегодняшний день, городские озера подвергаются сильному заилению, зарастанию и обмелению, что вызывает необходимость организации постоянного мониторинга за их состоянием.

Представленные новые данные о состоянии компонентов городской озерной экосистемы и предлагаемые алгоритмы оценки отличаются постоянством режимных наблюдений в течение 17 лет, обширным спектром выбранных показателей, способами их количественной и качественной оценки, сопоставимости между собой и последующего преобразования в интегральные показатели геоэкологического состояния.

Диссертационная работа соответствует нормативным документам федерального и республиканского уровней – программе «Стратегии экологической безопасности РФ», «Водной стратегии РФ», «Стратегии социально-экономического развития РС (Я)» и «Стратегии социально-экономического развития ГО «Город Якутск». Поэтому всесторонний и комплексный анализ старичных озерных экосистем г. Якутска позволяет провести оценку геоэкологического состояния городских озер и является своевременным и актуальным исследованием.

Объект исследования – экосистемы наиболее крупных старичных озер г. Якутска.

Предмет исследования – современное состояние озерной воды, аллювиальных почв и донных отложений старичных озер г. Якутска. Хронологический период исследования с 2009 по 2025 гг.

Цель исследования – комплексная геоэкологическая оценка старичных озерных экосистем г. Якутска на основе эколого-географического анализа абиотических компонентов: аллювиальных почв, донных отложений и

поверхностных вод – для разработки программы их благоустройства, рационального использования и охраны.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследовать и охарактеризовать озерные котловины на территории долины Туймаада и селитебной территории г. Якутска, оценить их геоэкологическое состояние;

2. Изучить современное состояние аллювиальных почв, донных отложений и поверхностных вод старичных озер г. Якутска, и рассчитать коэффициенты миграции микроэлементов между компонентами озерной экосистемы на примере модельных площадок;

3. Провести эколого-географический анализ городских старичных озер, классифицировать с учетом природно-климатических, геолого-геохимических и антропогенных условий территории;

4. Разработать программу по улучшению геоэкологического состояния городских старичных озер.

Степень изученности проблемы. Эколого-географический анализ озерных систем сделан на основе фундаментальных исследований отечественных ученых в области лимнологии, гидрологии – П.В. Иванова, С.В. Григорьева, Б.Б. Богословского, А.А. Самохина, С.П. Китаева, Д.Д. Квасова и др. Особую значимость имели работы якутских ученых, учитывающие региональные особенности территории – А.Г. Немчинова, М.К. Гавриловой, Д.Д. Саввинова, Н.П. Анисимовой и др. Изучение озер г. Якутска начинается с 30-х гг. XX в., однако детальное исследование отмечается только с конца 70-х и проводится многими научными и контролирующими организациями республики. Основные характеристики старичных озер г. Якутска базировались на исследованиях В.В. Шепелева, В.Н. Макарова, И.И. Жиркова, Л.А. Пестряковой, В.А. Габышева, Н.А. Павловой и др. Анализ миграционной способности микроэлементов выполнен на основе классических подходов Б.Б. Полюнова, А.И. Перельмана, Н.С. Касимова, определяющих интенсивность и характер водной миграции. На современном этапе в основном проводятся исследования химического и биологического состава озерных вод. В то же время их изучение следует основывать на анализе различных данных – морфогенетических, морфометрических, гидрологических, гидрохимических и др. Однако работы по систематизации данных, анализу эколого-географических факторов и изучение старичных озерных экосистем по компонентам (почвы, донные отложения, воды) практически выпадают из предлагаемых систем комплексного экологического изучения.

Материалы, методы и методология исследования. В период 2009–2025 гг. с участием автора проведены комплексные геоэкологические исследования, получены полевые материалы по типам и химическим параметрам озерной воды, почвы и донных отложений. В работе использованы фондовые и авторские материалы по исследованиям озер г. Якутска (Саввинов, 1989; Жирков, 1991, 2007; Гриненко и др., 1995; Макаров, 1985, 2017 и др.).

Поставленные задачи решались аналитическими, сравнительными, гидрохимическими, статистическими, картографическими, ландшафтно-

экологическими и геоинформационными методами. Непосредственно исследовательская работа включает 25627 элемент/определений, 82% из которых – непосредственно авторские данные.

Статистическая обработка данных осуществлялась при помощи программ Microsoft Excel 2019 и Statistica V.10 с использованием абсолютных и относительных статистических величин, статистических индексов, факторного анализа и кластеризации данных. Карта-схемы построены с помощью программы «SAS.Планета 201212.10106 Stable», Google Earth Pro 7.3.7.1155.

Личный вклад автора. Диссертационное исследование основано на материалах, полученных лично автором, который непосредственно участвовал в постановке задач исследования, экспедиционных полевых работах, выборе и морфологическом описании территории озер, а также в отборе проб озерных вод, донных отложений и аллювиальных почв и проведении пробоподготовки. Анализ результатов химико-аналитических исследований, интерпретация данных, их обобщение и формулирование выводов выполнены автором.

Научная новизна. Впервые дана характеристика микроэлементного состава, водорастворимого комплекса и физико-химических показателей аллювиальных почв старичных озерных экосистем г. Якутска. Определены миграционные способности микроэлементов в системе «почва – донные отложения – вода», что позволило выявить группу наиболее подвижных элементов. Разработан алгоритм оценки эколого-географического состояния городских озер на основе интеграции существующих классификаций и предложена программа по улучшению их геоэкологического статуса.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Результаты исследования систематизируют данные о геоэкологическом состоянии старичных озер в урбоэкосистемах Якутска, создавая теоретическую базу для прогнозирования загрязнения селитебных территорий. Разработанная методика оценки может быть использована при проектировании объектов благоустройства и реализации мероприятий по охране водных экосистем в северных городах. Материалы внедрены в учебный процесс СВФУ им. М.К. Аммосова по дисциплинам «Геоэкология» и «Геохимия техногенеза», а также могут быть использованы в курсах «Озероведение» и «Охрана окружающей среды».

Практическая значимость подтверждается интеграцией результатов в Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды РС (Я)», на основе которого Минэкологии Якутии принимает управленческие решения в региональной политике. Кроме того, в ходе работы модернизированы экологические паспорта городских озер: актуализированы данные об их морфометрических показателях и химическом составе вод, донных отложений и аллювиальных почв.

Соответствие паспорту научной специальности. Исследование соответствует паспорту научной специальности 1.6.21. Геоэкология (пп. 5, 11, 12).

Положения, выносимые на защиту:

1. Антропогенная трансформация территории г. Якутска привела к деградации естественного стока рек Шестаковка и Мархинка – левых притоков р.

Лена, обусловив переход старичных озер из проточного режима в состояние замкнутых систем. Это активизирует процессы ускоренного заиления, эвтрофикации и постепенной потери жизнеспособности озер.

2. Сочетание слабощелочной среды и дефицита кислорода в экосистемах старичных озер г. Якутска предопределяет экстремальную кумулятивную способность донных отложений, которые постепенно принимают на себя функции химических накопителей с аккумуляцией Mn, Zn, Cu, Pb и Ni.

3. Разработанная комплексная эколого-географическая оценка состояния старичных озер Якутска, основанная на классификациях и многопараметрическом анализе, позволяет делать прогноз изменения геоэкологического состояния озерных экосистем и должна быть неотъемлемой частью управления городскими водными ресурсами.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов подтверждается большим массивом фактического материала, полученного в результате длительных режимных наблюдений, глубокой его проработанностью с применением методов описательной статистики, комплексностью используемых методов, в том числе эколого-географического анализа состояния основных компонентов озерных экосистем, выполнением химико-аналитических исследований в аккредитованных лабораториях.

Апробация. Основные разделы и результаты диссертационного исследования были представлены на международных, всероссийских и республиканских научно-практических конференциях, таких как международный молодежный научный форум «Ломоносов» (Москва, 2010-2012); III всероссийский геокриологический форум с международным участием (Якутск, 2013); VIII Невский экологический конгресс (Санкт-Петербург, 2013); международный экологический форум «Экология большого города» (Санкт-Петербург, 2013); IV всероссийская научная конференция «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2022, 2025); IV международная конференция «Умные и устойчивые города» (Москва, 2024), международная конференция «Актуальные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей природной среды в условиях изменяющегося климата» (Ереван, 2025).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 29 публикациях, в том числе 8 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Зарегистрированы 3 электронные базы данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 167 страницах, содержит 39 таблиц, 28 рисунков и приложения. Список цитируемых источников включает 279 наименований, в том числе 64 иностранных издания.

Благодарности. Особые слова благодарности автор выражает д.б.н., действительному члену Академии наук РС (Я), профессору Д.Д. Саввинову, безвременно ушедшему из жизни, за советы и ценные замечания на начальной стадии исследований. Автор выражает признательность и благодарность коллективу Академии наук РС (Я) во главе с президентом, чл.-корр. РАН, д.б.н., профессором Л.Н. Владимировым, а также коллективу Института геологии алмаза

и благородных металлов СО РАН во главе с директором, чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., профессором В.Ю. Фридовским за содействие и поддержку во время написания работы, а также своему научному руководителю – Я.Б. Легостаевой – за постановку проблемы, организацию химико-аналитических исследований и всестороннюю помощь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи, определен объект и предмет, обозначены защищаемые положения и обоснованы аспекты теоретической и практической значимости работы.

В главе 1 анализируются природные условия развития озерных экосистем г. Якутска и их генетическая связь с р. Лена. Выявлены источники техногенного воздействия. Дополнительно обобщен мировой, отечественный и региональный опыт изучения озерных урбоэкосистем и выделены этапы истории их исследования в Якутске.

В главе 2 описаны материалы и методы, использованные для достижения цели и задач диссертационной работы.

В главе 3 представлен анализ эколого-геохимического состояния экосистем городских старичных озер по схеме «почва – донные отложения – поверхностные воды». Рассчитаны коэффициенты миграции между абиотическими компонентами озер и выявлены микроэлементы, отличающиеся активной геоаккумуляцией.

В главе 4 предложен алгоритм оценки эколого-географического состояния старичных озерных экосистем г. Якутска. Предложена программа по рациональному использованию и охране старичных озерных экосистем городских территорий.

В заключении изложены основные аспекты результатов исследования.

На обсуждение выносятся следующие научные положения, представляющие предмет защиты диссертации:

1. Антропогенная трансформация территории г. Якутска привела к деградации естественного стока рек Шестаковка и Мархинка – левых притоков р. Лена, обусловив переход старичных озер из проточного режима в состояние замкнутых систем. Это активизирует процессы ускоренного заиления, эвтрофикации и постепенной потери жизнеспособности озер.

Площадками исследования являются 40 старичных озер г. Якутска и окрестностей, из них для эколого-географического анализа отобрано 10, находящихся в пределах селитебной территории. В качестве модельных площадок исследования выбраны пять крупных озерных котловин, отвечающих сочетанию факторов природного происхождения и антропогенной нагрузки: Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары. Опробование проводилось в период открытой воды с мая по сентябрь с отбором проб в первой декаде каждого месяца. Всего с 2009 по 2025 гг. отобрано 850 проб поверхностных озерных вод. С 2021 г. проводится отбор проб донных отложений ($n=125$) и аллювиальных почв ($n=40$) (рис. 1).

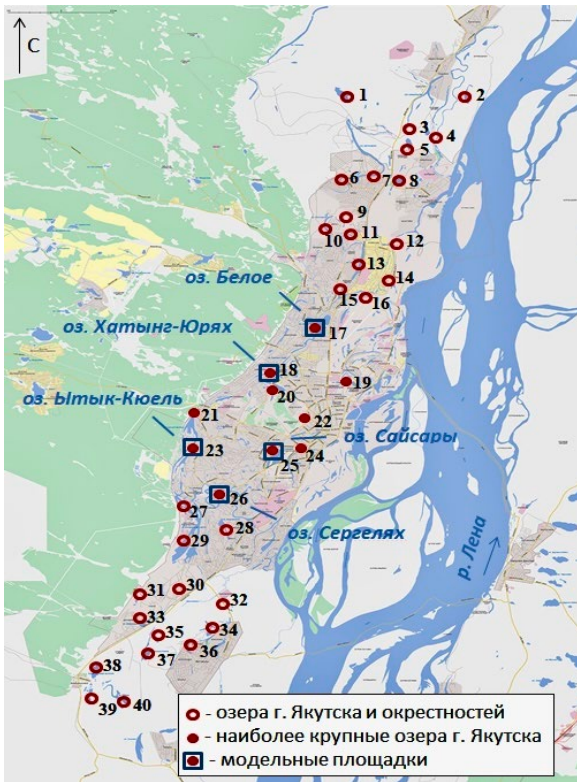
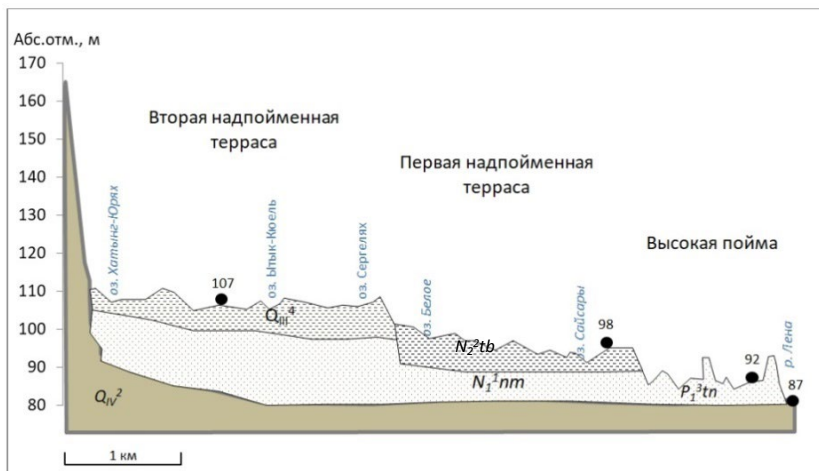


Рисунок 1 – Картограмма фактического опробования озер г. Якутска, масштаб 1:100 000

Природные условия. Территория г. Якутска расположена на левобережной части среднего течения р. Лена, на обширной аллювиальной равнине – долине Туймаада. Рельеф долины сформировался в результате русловых процессов позднего неоплейстоцена. Озёрные котловины города относятся к старичному типу и имеют флювиальное происхождение, образовавшись в результате изменения русла. Это фрагменты древних рукавов и проток реки. Они расположены в высокой пойме р. Лена и на двух надпойменных террасах (рис. 2).

Морфология озер изначально имела вытянутую, серповидную форму с выраженными крутыми берегами высотой до 3-4 м, что отражало структуру речного разветвления прошлых лет (Спектор, Спектор, 2017).



Условные обозначения:

1 2 3

1 - юрские песчаники и алевролиты;

2 - пески;

3 - алевроиты;

Q_{IV}^2 - аллювий поймы и русла;

P_1^3tn - тандинская свита;

N_1^1nm - намская свита;

N_2^2tb - табакгинская свита;

Q_{III}^4 - молодая толща ледового комплекса

Рисунок 2 – Геолого-геоморфологический разрез долины Туймаада (Гриненко и др., 1995, с доп. автора)

До начала интенсивного городского освоения территория характеризовалась типичным долинным ландшафтом (рис. 3). Озера, несмотря на свою относительную мелководность, периодически затапливались паводковыми водами, были устойчивыми и не промерзали до дна в зимний период, что поддерживало биологическое разнообразие и оптимальный газообмен в долине.

Геоэкологические условия территории г. Якутска определялись суровым климатом и влиянием реки. В естественном состоянии температура многолетнемерзлой толщи вне зон застройки составляла -2-4°C (Сыромятников и

др., 2017). Мерзлота «сливающегося типа» обеспечивала стабильность грунтовых оснований. На сегодняшний день под руслами проток и озер сформированы талики (глубокие зоны протаивания) мощностью от 5 до 30 м. Наличие таликов и подстилающего аллювия (пески мощностью до 20-22 м) создают сложную систему взаимосвязи надмерзлотных и речных вод.



Рисунок 3 – Схема природных ландшафтов г. Якутск

Природный гидрологический режим озер характеризовался проточной системой. Городские озера функционировали в рамках малого и большого «кольцевого стока», имея прямую гидравлическую связь с рр. Шестаковка и Мархинка и с основным руслом р. Лена (особенно через городскую протоку) (рис. 4). Это до 1990 г. обеспечивало постоянный внешний водообмен и эффективное самоочищение озер: большая вода промывала котловины, вынося накопившиеся отложения в реку, поэтому озера служили естественными регуляторами поверхностного стока всей долины Туймаада.

Антропогенное воздействие. Исторически Якутский острог был заложен в пределах первой надпойменной террасы р. Лена. Данный морфологический уровень характеризовался низкой естественной защищенностью и регулярной подверженностью паводковым затоплениям. Рост численности населения и пространственное расширение городских границ обусловили переход к хозяйственному освоению второй надпойменной террасы. Однако и эта терраса частично оставалась уязвимой при наводнениях в периоды экстремально высоких уровней весеннего половодья. Масштабная урбанизация долины Туймаада повлекла за собой коренную техногенную переработку и искусственное возвышение исходного рельефа (рис. 5). Процесс значительного подъема уровней города активизировался в 1980-х гг., когда развитие г. Якутска потребовало

пересмотра методов инженерной подготовки территорий. Ведущим фактором реорганизации естественного рельефа послужило создание искусственных насыпных оснований. Строительство новых крупных жилых микрорайонов и массивных объектов инфраструктуры перешло на технологию возведения зданий на мощных грунтовых подушках. Это позволило не только изолировать постройки от теплового влияния на многолетнюю мерзлоту, но и существенно приподняло целые городские кварталы над исходными затапливаемыми отметками долины.

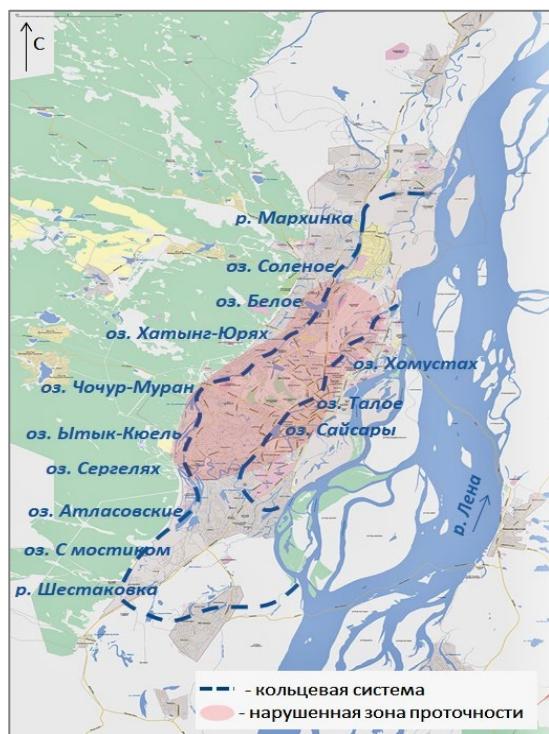


Рисунок 4 – Схема проточной системы озер г. Якутск

Эффективность переработки рельефа, появление микрорайонов с насыпными и намывными грунтами, возведение защитных сооружений подтверждается историко-гидрологическими данными: последнее катастрофическое наводнение в черте города было зафиксировано в 1998 г. На современном этапе искусственно поднятый рельеф полностью изменил пространственную структуру и гидродинамический режим г. Якутска, с одной стороны, обеспечивая инженерную безопасность современного города, с другой – меняя естественную гидрографическую сеть и проточность городского канала.

Параллельно со строительством происходило линейно-транспортное освоение окраин. Повсеместная прокладка, расширение и асфальтирование дорожной сети привели к формированию жесткого

искусственного каркаса. Автомобильные дороги, сооружаемые на высоких земляных полотнах, превратились в своеобразные искусственные линии, локально возвышающиеся над естественной поверхностью микрорельефа и изменившие пути движения поверхностных вод.

Важнейшим фактором преобразования рельефа стало капитальное гидротехническое регулирование. Возведение системы защитных дамб и берегоукрепительных сооружений в восточной и юго-восточной частях города – вдоль русла р. Лена, прилегающих проток и озер – окончательно перенаправило поверхностный сток. Это не только изолировало городские кварталы от разрушительных пойменных процессов, но и замкнуло внутреннюю гидрографическую сеть, зафиксировав урбанизированные территории на новом, «безопасном» высотном уровне. В результате многолетней строительной и инженерной деятельности естественный микрорельеф г. Якутска был замещен техногенным аналогом, определив на качественно более высоком орографическом уровне селитебную территорию и подняв ее более, чем на 1,5 м.

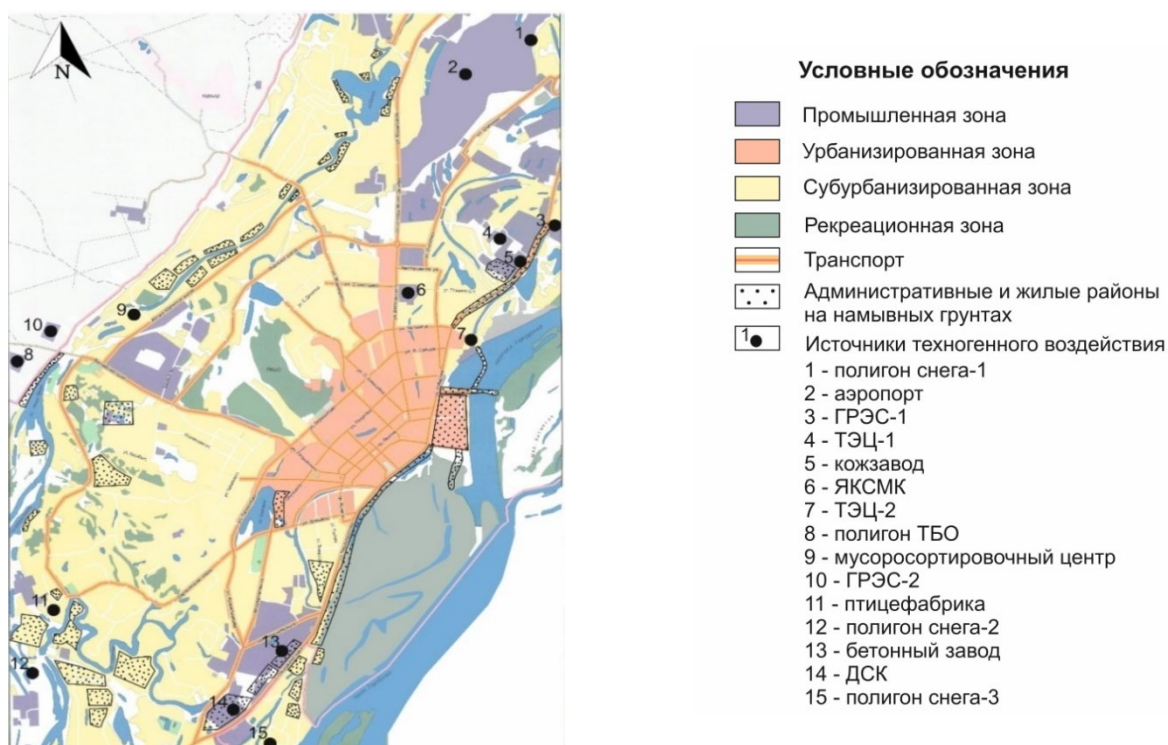


Рисунок 5 – Схема городских ландшафтов г. Якутск

Таким образом, техногенное преобразование рельефа привело к деградации естественных механизмов гидрологического цикла и переходу старичных озер в категорию полупроточных и замкнутых аккумулятивных систем. Из-за изоляции и нарушения водообмена старичных озер г. Якутска, которые на данный момент отрезаны от естественного паводка р. Лена и ее притоков рр. Шестаковка и Мархинка дамбами и дорогами, в их замкнутых котловинах активизировался процесс седиментации городских стоков, что на фоне летних высоких температур спровоцировало антропогенную эвтрофикацию водной среды.

Морфометрический анализ за сорокалетний период выявил устойчивую деградацию старичных озер г. Якутска, что проявляется в непрерывном сокращении площади их зеркала и средней глубины. В таблице 1 приведены данные по двум наиболее крупным озерам. Этот регрессивный процесс напрямую происходит из-за заболачивания и интенсивного цветения озерной воды, вызванных высокой антропогенной нагрузкой, нарушением естественной проточности и регулярным попаданием в озерную экосистему неочищенных стоков.

Таблица 1 – Динамика изменения некоторых морфометрических показателей наиболее крупных озер г. Якутска

Год обследования	оз. Белое		оз. Сайсары	
	Площадь водного зеркала, км ²	Глубина средняя, м	Площадь водного зеркала, км ²	Глубина средняя, м
1985	0,70	3,0	0,52	2,9
2003	0,68	2,9	0,50	2,7
2007	0,66	2,9	0,49	2,7
2025	0,60	2,5	0,45	2,3

Из-за повышенных концентраций биогенных веществ озера мелеют и заиливаются, при этом озеро Сайсары деградирует заметно быстрее, потеряв 13,5% своей площади и 20,7% глубины, в то время как озеро Белое за этот же срок сократилось по площади на 14,3% и потеряло 16,7% своей глубины. Динамика изменений на примере рассматриваемой пары озер носит неравномерный характер: после активного падения показателей в конце 90-х гг. наступил кратковременный период относительной стабилизации экосистем между 2003 и 2007 гг., который из-за продолжающегося накопления донных отложений и активного размножения водорослей затем вновь сменился ускоренным процессом обмеления и усыхания в настоящее время.

Естественный режим озерных котловин Якутска, изначально определяемый природными факторами и близким залеганием многолетнемерзлой толщи, в последнее десятилетие кардинально трансформировался под воздействием интенсивной застройки. Техногенное преобразование рельефа и отсыпка грунта привели к нарушению гидрографической сети города: старичные озера потеряли связь с р. Лена. Смена проточного режима на замкнутый в сочетании с аккумуляцией урбанизированного стока запустила процесс деградации городских старичных озер.

2. Сочетание слабощелочной среды и дефицита кислорода в экосистемах старичных озер г. Якутска обуславливает экстремальную кумулятивную способность донных отложений, которые постепенно принимают на себя функции химических накопителей с аккумуляцией Mn, Zn, Cu, Pb и Ni.

Миграционная способность микроэлементов в городских старичных озерах проведена по схеме: аллювиальные почвы – донные отложения – поверхностные воды. Циркуляция начинается с вымывания веществ из почвы в воду и отложения. В донные отложения почвенные частицы попадают при обрушении склонов и выщелачивании, а смыв в воду идет из-за колебаний уровня водного зеркала. Между водой и отложениями происходит двусторонний обмен: вещества растворяются или оседают, образуя со временем «слоеный пирог». Однако, при взмучивании возможно вторичное загрязнение водной толщи. Атмосферные осадки также обогащают почву и воду. Изучение по данной схеме актуально для городской среды, где увязываются природные и антропогенные факторы формирования химического состава.

Озерная вода г. Якутска характеризуется гидрокарбонатно-натриевым составом, преимущественно повышенной минерализацией, слабощелочной pH и умеренно-жесткой водой. Суммарный объем биогенных веществ не высокий 5,63 мг/дм³. Основной вклад вносит NO₃⁻, несколько в меньшей степени NH₄⁺. За последние годы (с 2016) отмечается повышение содержания биогенных веществ, что указывает на ухудшение санитарного состояния озер г. Якутска. Основу гидрохимического состава городских озер формируют главные катионы и отдельные микроэлементы, при этом общая минерализация и жесткость вод повсеместно имеют субдоминантное значение (табл. 2).

Таблица 2 – Факторный анализ гидрохимического состава озер г. Якутска

Озера	Белое			Хатынг-Юрях			Ытык-Кюель			Сергелях			Сайсары		
Показатели	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 1	Ф 2	Ф 3	Ф 1	Ф 2	Ф 3
pH	0,10	0,78	0,05	-0,06	0,27	0,37	0,14	-0,13	0,68	0,84	-0,05	0,06	0,75	0,26	-0,36
М	0,10	0,85	0,13	-0,26	0,78	0,05	0,18	0,23	0,61	0,13	0,19	0,15	0,23	0,89	-0,07
Ж	0,15	0,82	-0,13	-0,16	0,87	0,07	-0,13	0,05	0,59	0,22	-0,19	0,21	-0,13	0,87	-0,07
Вв	-0,05	-0,46	-0,13	0,09	-0,58	-0,37	0,01	-0,31	0,75	-0,09	0,27	0,03	0,10	-0,57	0,38
Ca ²⁺	-0,66	0,06	0,20	0,71	0,20	-0,35	0,74	0,28	-0,11	0,95	-0,01	0,00	-0,66	0,24	0,42
Mg ²⁺	0,78	0,15	0,39	0,87	0,22	-0,09	0,95	0,14	-0,01	0,91	0,06	0,11	0,94	0,26	0,17
Na ⁺	0,74	0,19	0,23	0,84	0,25	-0,05	0,94	0,10	0,13	0,54	-0,06	-0,05	0,92	0,29	0,13
K ⁺	-0,31	-0,64	0,55	0,85	-0,06	0,00	0,82	-0,44	-0,08	0,64	-0,08	-0,10	0,64	-0,02	0,09
HN ₄ ⁻	0,58	-0,05	0,34	0,42	0,32	0,34	0,46	-0,34	0,26	-0,29	0,75	0,09	0,39	0,30	-0,39
Ba ⁺	-0,16	-0,12	0,74	0,30	0,62	-0,34	-0,34	0,06	0,30	-0,14	0,53	0,02	0,36	0,61	0,29
HCO ₃ ⁻	0,67	0,22	-0,19	0,66	0,10	-0,30	-0,71	-0,04	0,51	-0,14	0,13	0,80	0,69	0,08	0,22
Cl ⁻	0,77	0,43	0,04	0,62	0,28	0,21	-0,25	0,73	0,07	-0,63	-0,08	0,65	0,60	0,25	-0,28
NO ₂ ⁻	-0,10	0,45	-0,18	0,53	-0,32	0,14	0,65	0,50	-0,12	-0,37	0,73	-0,13	-0,56	-0,30	-0,07
SO ₄ ²⁻	0,27	0,38	-0,60	0,24	0,25	0,77	-0,09	-0,52	0,39	0,54	0,12	0,32	0,33	0,26	0,74
NO ₃ ⁻	0,14	0,73	0,05	0,56	-0,46	0,09	0,10	-0,47	-0,36	0,35	-0,36	0,76	0,52	-0,49	-0,14
PO ₄ ³⁻	-0,15	0,28	0,64	0,82	-0,07	0,22	0,41	0,72	0,01	-0,23	0,19	0,66	0,84	-0,04	-0,13
Fe _{общ}	0,76	0,34	-0,17	0,94	0,52	-0,04	0,85	0,10	-0,14	0,51	0,15	0,77	0,81	0,54	0,06
Pb	0,78	0,14	0,04	-0,51	-0,12	-0,11	0,01	0,84	-0,33	0,21	0,81	0,06	0,83	-0,09	0,16
Zn	0,71	-0,09	-0,02	0,09	0,12	-0,37	-0,22	0,64	0,31	0,16	0,75	-0,19	0,71	0,13	0,35
Mn	0,29	0,58	0,18	0,33	-0,04	0,60	0,03	0,66	0,62	0,56	0,77	-0,24	0,26	-0,07	-0,63
Ni	0,72	0,20	-0,41	0,78	0,18	0,59	-0,40	0,08	-0,35	-0,27	-0,64	0,19	0,77	0,16	-0,61
Cr	0,10	-0,28	0,26	0,12	0,25	-0,03	0,05	0,70	-0,39	0,57	0,31	0,28	0,13	0,25	0,01
σ ²	6,33	4,20	3,71	6,08	3,63	3,33	5,84	4,20	3,85	7,13	4,22	3,74	5,93	3,68	3,43
h ²	0,23	0,15	0,13	0,22	0,13	0,12	0,21	0,15	0,14	0,26	0,16	0,14	0,21	0,13	0,12

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены $>0,70$. σ^2 – дисперсия, h^2 – доля общих факторов. Сокращения: Ф – фактор, М – минерализация, Ж – жесткость, Вв – взвешенные вещества.

При рассмотрении микроэлементов как факторов загрязнения озерных вод, фиксируются повышенные концентрации Fe_{общ}-Zn-Pb-Ni (рис. 6). Распределение их носит неравномерный характер, подчеркивающий индивидуальность каждого рассматриваемого озера, где, в то же время, доминирование элементов группы Fe, а также Zn, Pb, Ni поступающих в озерные воды с почвенным материалом или пылью, обозначают антропогенное воздействие.

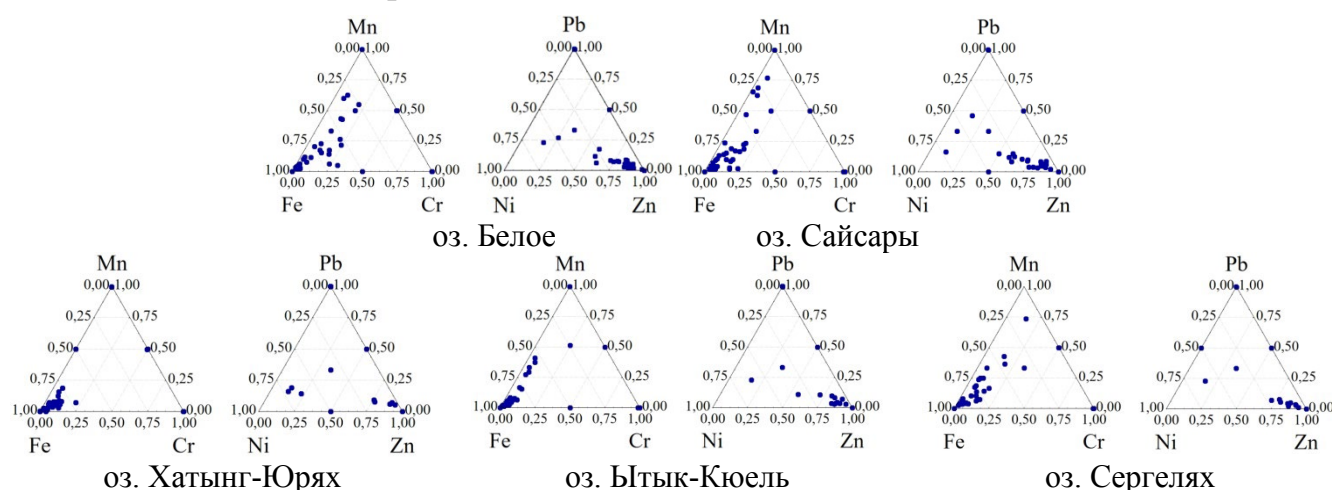


Рисунок 6 – Микроэлементный состав озерных вод г. Якутска

Индивидуальную специфику геосистем определяют локальные доминанты: Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $Fe_{общ}$ для всех озер, PO_4^{3-} для Хатынг-Юрях и Сайсары, Zn для Белого и Сайсары, а также Ni (Белое, Хатынг-Юрях) и Pb (Сайсары). Рост концентрации микроэлементов, равно как и стабильно высокая аккумуляция биогенных веществ в период 2017-2025 гг., вывели эти элементы в статус ведущих факторов химизма.

В экосистемах озер Ытык-Кюель и Сергелях гидрохимический режим подчинен сопряженности типа «макрокомпонент – микроэлемент»: ведущей группе (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) коррелятивно соответствуют подчиненные микроэлементы (Pb , Zn , Mn , Cr), которые в периоды пиковых антропогенных или природных флуктуаций оказывают локальное трансформирующее воздействие на состав вод, выступая индикаторами геоэкологического состояния акваторий.

Почвы озерных экосистем г. Якутска преимущественно представлены аллювиальными темногумусовыми типами. По современной классификации они относятся к синлитогенному стволу, отделу аллювиальных почв (Тонконогов и др., 2009) и имеют следующий профиль с указанием глубин горизонтов (см):

- Белое АУ(g)0-20(31) – G 20(31)-43(47) – Cg $\sim$ 43(47)-88;
- Хатынг-Юрях АУ0-6(17)–АУv6(17)-24(29)–U 24(29)-32(37)–С32(37)-58(60)–С_{Ca}58(60)-84;
- Ытык-Кюель АУ 0-5(8) –Q 5(8)-18(2) – CQ 18(21)-31(32) – C $\sim$ 31(32)-68;
- Сергелях АУ 0-3(7)–Qs 3(7)-22(24)–Q 22(24)-23(28)–Cg 23(28)-53(65)–CQ(s) $\sim$ 53(65)-85;
- Сайсары АУ 0-3(4) – Qs 3(4)-16(19) – C $\sim$ 16(19)-62

Характеризуются тремя и более горизонтами, как правило, перекрытыми одним или несколькими горизонтами урбик, разной мощностью профиля от 62 до 88 см, наличием глеевых и оглеенных надмерзлотных горизонтов. Верхняя часть профиля преимущественно песчаная, содержание фракции физической глины увеличивается в минеральных и надмерзлотных горизонтах. рН почвенных растворов преимущественно нейтральная и слабощелочная, с невысоким количеством почвенного органического вещества, низким содержанием подвижных форм калия и фосфора. В водной вытяжке преобладают ионы SO_4^{2-} (0,76 ммоль/100 г) и Mg^{2+} (0,61 ммоль/100 г), наименьшим содержанием характеризуются $Na^+ + K^+$ и Cl^- (0,24 и 0,39 ммоль/100 г, соответственно). Почвы не засолены, водорастворимый комплекс представлен следующим рядом: $SO_4^{2-} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > HCO_3^- > Cl^- > Na^+ + K^+$.

Микроэлементный состав исследуемых почв неоднороден. Несмотря на то, что по медианным значениям превышения нормативов ПДК не зафиксировано, на отдельных площадках отмечается выраженное варьирование концентраций микроэлементов. Так, в почвах озер Ытык-Кюель и Сергелях выявлено превышение ПДК по Cu до 1,5 раза, а локальные максимумы на озере Сергелях достигают 3,3 раза. Кроме того, во всех отобранных образцах зарегистрировано превышение нормативных значений по Zn – до 2 раз.

Донные отложения старичных озер г. Якутска преимущественно песчаные с остатками детрита. Цвет варьирует от желто-серой до черно-серой с зеленоватым (болотным) оттенком. Отложения обладают торфяно-гнилостным или землистым запахом и, как правило, имеют мягкую консистенцию. В их составе отмечаются включения растительных остатков, различных конкреций и

грубообломочного материала. Реакция среды в основном слабощелочная (медиана $pH=7,2$), однако в озерах Сергелях и Ытык-Кюель зафиксирована слабокислая среда ($pH=6,3$ и $6,2$ соответственно). Содержание органического вещества $C_{орг}$ достигает максимума в озере Сергелях ($14,03\%$), а минимум отмечен в озере Ытык-Кюель ($0,03\%$). Медианное значение по всей выборке составляет $0,31\%$, что свидетельствует об очень низком уровне накопления $C_{орг}$. Между содержанием $C_{орг}$ и pH установлена умеренная корреляционная связь ($r=0,53$).

Преобладающую роль в водорастворимом комплексе донных отложений играют SO_4^{2-} ($0,09-11,47$ ммоль/100 г) и Ca^{2+} ($0,25-5,50$ ммоль/100 г), в меньшей степени – Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , Na^++K^+ .

Содержание микроэлементов в донных отложениях отличается большей вариативностью, чем в почвах, и характеризуется следующим рядом в порядке убывания: $Co>Cd>Ni>Pb>Cu>Zn>Mn$. Значительное количество Zn , Cu и Pb свидетельствует о присоединении антропогенного накопления элементов, которые находятся преимущественно в подвижной форме, что также подтверждается присутствием Cd . Высокое накопление микроэлементов в донных отложениях наблюдается в озерах Сергелях и Хатынг-Юрях. По среднему показателю превышение регионального фона отмечается по Cu , Ni и Zn . В озере Ытык-Кюель превышение наблюдается лишь по Cd , хотя наблюдаются высокие показатели Ni , Pb и Zn , не превышающие региональный фон. Увеличению содержания Cd могли способствовать активные строительные работы в акваториях озер – формирование насыпей с использованием строительного мусора для возведения объектов в прибрежной зоне, а также строительство и эксплуатация частных домов, где ведется садово-огородная деятельность и используются удобрения различного качества и происхождения.

Анализ взаимосвязи в системе «почва – донные отложения – поверхностные воды». Расчет коэффициента миграции (K_m) позволил определить направленность миграции элементов (табл. 3). Значения $K_m>1$ подтверждают накопление вещества, а $K_m<1$ свидетельствуют об обратном процессе – выносе элемента.

Коэффициенты для системы «почва – вода» и «донные отложения – вода» имеют значения многократно меньше единицы вплоть до $0,0001$ для Mn , Zn , Ni , Cr . Это свидетельствует о том, что вода является средой активного выноса и имеет крайне низкое фоновое содержание этих элементов по сравнению с почвой и донными отложениями.

Для системы «вода – почва» и «вода – донные отложения», напротив, коэффициенты достигают огромных значений в тысячи единиц для Mn , Zn , Cu . Это подтверждает, что при смене направления процесса и принятии воды за автономный элемент системы, почвы и донные отложения выступают как абсолютные аккумуляторы вещества. Таким образом, озеро Сайсары показывает экстремальные показатели аккумуляции Zn и Mn (до ~ 3500) в системе «вода – почва» и «вода – донные отложения», следовательно, озеро является мощнейшим геохимическим аккумулятором городской территории, где накопление микроэлементов в донных отложениях идет наиболее интенсивно. Также,

выделяется озеро Сергелях аномально высоким коэффициентом для Pb ($K_m=185,35$) в системе «вода – донные отложения». Это значение почти в 2,5-3 раза выше, чем в других озерах (например, в озере Белое $K_m=50,74$), что может свидетельствовать о специфическом источнике свинцового загрязнения (например, использованием тяжелого автотранспорта в промышленной зоне и усиленными городскими стоками).

Таблица 3 – Дифференциация микроэлементов в озерных экосистемах г. Якутска

Озеро	Коэффициент миграции (K_m)						
Микроэлемент	$K_m=Pb$	$K_m=Co$	$K_m=Cu$	$K_m=Zn$	$K_m=Mn$	$K_m=Ni$	$K_m=Cr$
Система	почва → вода						
Белое	0,03	0,11	0,002	0,0001	0,001	0,01	0,009
Хатынг-Юрях	0,03	0,05	0,002	0,0001	0,001	0,04	0,009
Ытык-Кюель	0,02	0,32	0,002	0,001	0,001	0,04	0,009
Сергелях	0,01	0,14	0,002	0,0001	0,001	0,004	0,008
Сайсары	0,02	0,07	0,002	0,0001	0,001	0,04	0,009
Система	донные отложения → вода						
Белое	0,02	0,23	0,01	0,001	0,001	0,05	4,35
Хатынг-Юрях	0,02	0,41	0,004	0,001	0,001	0,02	5,00
Ытык-Кюель	0,02	0,44	0,01	0,001	0,001	0,04	6,67
Сергелях	0,005	0,38	0,004	0,001	0,001	0,01	2,86
Сайсары	0,01	0,68	0,01	0,001	0,001	0,04	5,00
Система	вода → почва						
Белое	38,43	9,011	449,28	2243,47	860,44	91,33	111,36
Хатынг-Юрях	37,38	22,38	613,46	2582,72	2079,75	23,86	116,51
Ытык-Кюель	68,43	3,134	486,09	1707,43	1743,22	28,68	114,24
Сергелях	156,55	7,063	635,47	3682,26	1777,21	224,38	118,22
Сайсары	56,64	13,501	451,69	3697,94	1657,00	24,71	111,02
Система	вода → донные отложения						
Белое	50,74	4,33	197,72	734,27	804,21	21,68	0,23
Хатынг-Юрях	52,50	2,46	278,21	1195,12	1646,45	43,33	0,20
Ытык-Кюель	48,32	2,29	126,46	1133,91	1284,49	25,45	0,15
Сергелях	185,35	2,60	276,92	961,55	882,44	79,01	0,35
Сайсары	79,91	1,47	158,83	1952,10	1638,19	25,02	0,20

Коэффициенты Mn в системе «вода – донные отложения» достигают 800-1600, что коррелирует с восстановительными условиями в водной толще, где происходит его активное осаждение из раствора. Zn, Cu, Mn, Pb показывают высочайшую степень дифференциации, активно переходя в аллювиальные почвы и донные отложения. Cr имеет относительно низкие коэффициенты аккумуляции в донных отложениях по сравнению с другими элементами (до 5,0-6,67), что может говорить о его большей подвижности в данных условиях. Высокие коэффициенты накопления для Mn, Zn, Cu и Ni обусловлены сочетанием антропогенной нагрузки и специфических физико-химических условий старичных озер Якутии – это слабощелочная среда и низкий окислительно-восстановительный потенциал.

В озерах Центральной Якутии вода часто имеет слабощелочную или щелочную реакцию (7,5-8,5). В щелочной среде при наличии кислорода Mn быстро окисляется до нерастворимых оксидов (MnO_2), которые осаждаются. Это создает огромный градиент между водой и донными отложениями (до 1600), так

как в растворе остается лишь незначительное количество. В щелочных условиях Zn и Cu склонны к образованию труднорастворимых гидроксидов и карбонатов, а также к активной сорбции на органическом веществе и глинистых минералах. Высокие значения для Zn (до 3697) объясняются его способностью эффективно «изыматься» из водной толщи на щелочном геохимическом барьере. В восстановительных условиях оксиды Fe и Mn, удерживающие микроэлементы, растворяются. Это приводит к массовому выбросу сорбированных микроэлементов – Zn, Cu обратно в водную толщу (Перельман, Касимов, 2000). Снижение щелочности или, наоборот, резкое защелачивание может привести к десорбции микроэлементов. Можно предположить, что в условиях Якутска именно анаэробные процессы в донных отложениях являются «пусковым механизмом» десорбции.

Полученные при расчете коэффициенты направленности миграционных процессов, составляющие порядка 10^2 - 10^3 , значительно выше классических коэффициентов водной миграции по А.И. Перельману, что подчеркивает экстремальную кумулятивную способность в системах «вода-почва» и «вода-донные отложения» в старичных городских озерных экосистемах. К тому же столь высокие показатели служат индикатором крайне низкой самоочищающей способности мелководных озер в специфических условиях криолитозоны.

Основным источником антропогенного поступления Mn, Zn, Cu в озерные экосистемы г. Якутска выступает транспортный комплекс и сопутствующая городская инфраструктура. Антропогенный приток Zn обусловлен преимущественно износом автомобильных шин, в состав которых входит ZnO, в то время как Cu поступает вследствие механического истирания тормозных колодок и фрикционных материалов. Mn высвобождается в среду при сгорании топлива. Вероятным фактором повышенного коэффициента Pb в озере Сергелях является деятельность близлежащих промышленных объектов – Домостроительного комбината и Птицефабрики. Поступление Pb в экосистему может быть связано с деструкцией лакокрасочных покрытий (в частности, свинцового сурика), широко применявшихся в промышленном строительстве прошлых лет, а также с эмиссией мелкодисперсной пыли при механической обработке металлоконструкций. Накопленные в течение длительного зимнего периода в придорожных почвах и снежном покрове, эти микроэлементы в форме техногенной пыли мигрируют в озерные котловины с интенсивным весенним стоком и талыми водами. Учитывая замкнутый характер большинства городских старичных озер и отсутствие систем ливневой очистки, озера становятся конечными звеньями аккумуляции («ловушками») этих элементов, что подтверждается аномально высокими значениями коэффициентов миграции.

3. Разработанная комплексная эколого-географическая оценка состояния старичных озер Якутска, основанная на классификациях и многопараметрическом анализе, позволяет делать прогноз изменения геоэкологического состояния озерных экосистем и должна быть неотъемлемой частью управления городскими водными ресурсами.

Формирование старичных озер г. Якутска происходит под воздействием пяти равнозначных и взаимосвязанных условий (литосферных, атмосферных, гидросферных, биосферных и антропогенных), определяющих их генезис. На основе пяти модельных площадок исследования разработана иерархическая схема: условие → факторы → процессы → механизмы → тип озерной котловины (рис.7).

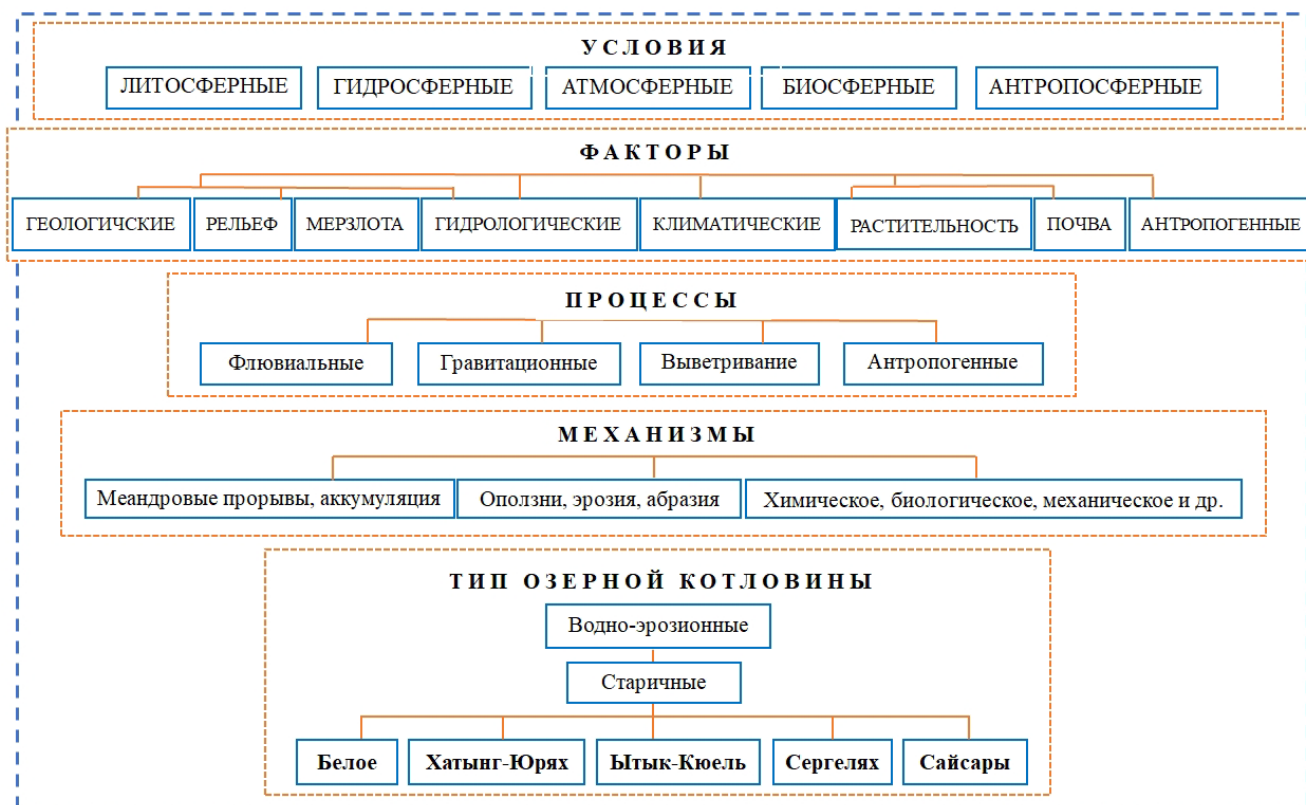


Рисунок 7 – Иерархическая схема формирования старичных озерных котловин урбоэкосистем Якутска (сокращенный вариант)

На основе существующих подходов создана унифицированная классификационная матрица озерных экосистем, объединяющая описательный и оценочный компоненты (рис. 8). Структура матрицы включает три уровня: тип классификации, классификационные признаки и итоговую экологическую оценку. Вводный раздел условно разделяет классификации на физико-географические (морфология, гидрология и др.) и геоэкологические (гидрохимия, геоэкология). Далее выделяются специфические параметры: например, для морфогенетического типа – это генезис и возраст котловин, а для морфометрического – площадь и глубина. Завершающий этап системы направлен на комплексную характеристику эколого-географического состояния водных объектов.

Разработанная матрица служит базовым инструментом для комплексного исследования и описания озер в городской черте. Данный формат систематизации оптимален для ведения кадастрового учета, выбора стратегии рационального природопользования и мониторинга состояния водных объектов, находящихся под воздействием различного уровня антропогенного прессинга. Иерархическая схема и унифицированная матрица послужили базой для создания алгоритма

многофакторной оценки эколого-географического статуса старичных озер г. Якутска (рис. 9).

Согласно результатам анализа (табл. 4), исследуемые озера классифицируются как малые и средние по площади акватории. Максимальный показатель площади зеркала зафиксирован у озера Ытык-Кюель (0,89 км²). Средние глубины варьируют от 0,88 до 2,9 м, максимальные достигают 2,0-6,5 м. Озеро Белое выделяется как наиболее глубоководное (6,5 м). Морфология береговой линии показывает различия: озера Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель и Сергелях характеризуются высокой степенью расчлененности и бороздчатой формой, в то время как для озер Белое и Сайсары типична овальная конфигурация котловины, усложненная наличием рукавов.



Рис. 8. Унифицированная классификационная матрица озерных экосистем на примере г. Якутска

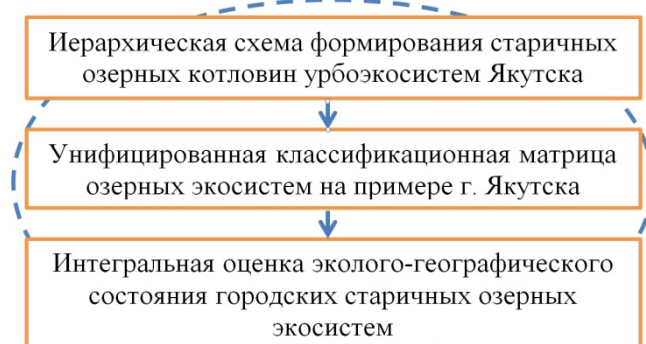


Рис. 9. Алгоритм оценки эколого-географического состояния старичных озерных экосистем г. Якутска

Гидрологический режим озер г. Якутска, изначально проточный, со временем трансформировался в замкнутый, что предопределяет принадлежность озер к аккумулятивному классу с замедленным водообменом. Согласно термической классификации, исследуемые озера относятся к умеренному типу. По гидрофизическим параметрам прозрачность воды изменяется от средних (озера Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях) до низких значений (озера Белое Сайсары). Характеризуются эвтрофным статусом и умеренным разнообразием беспозвоночных. Оценка качества вод по биотическому индексу Вудивисса позволила классифицировать озера Ытык-Кюель и Сергелях как умеренно загрязненные, Хатынг-Юрях – как загрязненное, а Белое и Сайсары – как грязные (Татаринова, Салова, 2012). Расчет удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) показал несколько более мягкую оценку, при которой качество вод варьирует от «слабо загрязненных» (Ытык-Кюель, Сергелях) до «загрязненных» (Белое, Хатынг-Юрях, Сайсары).

На основе комплексной геоэкологической оценки исследуемые озера разделяются по степени деградации: Белое и Сайсары классифицируются как грязные и загрязненные, озера Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель и Сергелях – как умеренно и слабозагрязненные. Первые показывают критические темпы уменьшения площади водного зеркала и средней глубины, отличаются низкой прозрачностью, повышенной минерализацией и экстремально высокой

антропогенной кумуляцией микроэлементов (Zn, Pb, Ni) на фоне периодически фиксируемой слабокислой среды. Вторые имеют средние уровни минерализации и более высокую прозрачность. Тем не менее, все пять модельных площадок находятся под постоянным техногенным прессингом, переведены из проточного в замкнутый гидрологический режим и повсеместно имеют выраженный эвтрофный статус. Нарушение естественного паводкового промыва, размножение водорослей, интенсивное цветение воды и прогрессирующее заболачивание запускают необратимые процессы заиления котловин и ведут к постепенному экологическому угасанию городских старичных озерных экосистем.

Таблица 4 – Эколого-географическое состояние городских старичных озерных экосистем г. Якутска (сокращенный вариант)

Вид классификации	Классификационные признаки		Характеристика озерных экосистем				
			Белое	Ытык-Кюель	Хатынг-Юрях	Сергелях	Сайсары
Морфо-генетическая	Лимногенетическая классификация (Жирков, 2007)		Водно-эрозионные старичные	Водно-эрозионные старичные	Водно-эрозионные старичные	Водно-эрозионные старичные	Водно-эрозионные старичные
Морфо-метрическая	Величина площади (Иванов, 1948)		Очень малые	Очень малые	Очень малые	Очень малые	Очень малые
	Глубине (Китаев, 1984)	Ср.	Малые	Очень малые	Очень малые	Очень малые	Малые
		Макс.	Средние	Очень малые	Очень малые	Очень малые	Малые
	Расчлененность берегов (Самохин, 1980)		Слабо расчлененные	Мало расчлененные	Мало расчлененные	Сильно расчлененные	Слабо расчлененные
	Форма котловины (Григорьев, 1959)		Ближний к овалу	Вытянутые	Вытянутые	Вытянутые	Ближний к овалу
Гидро-логическая	Внешний водообмен (Богословский, 1980)		Аккумулятивное-сточное	Аккумулятивное-сточное	Аккумулятивно-е-сточное	Аккумулятивное-сточное	Аккумулятивное-сточное
Гидро-физическая	По прозрачности воды (Китаев, 1984)		Средняя	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
Гидро-химическая	Тип вод	Алекин, 1953	Гидрокарбонатно-натриевые	Гидрокарбонатно-натриевые	Гидрокарбонатно-натриевые	Гидрокарбонатно-натриевые	Гидрокарбонатно-натриевые
	Минерализация		Повышенная	Средняя	Средняя	Средняя	Повышенная
	pH		Слабощелочная	Слабощелочная	Слабощелочная	Слабощелочная	Слабощелочная
	Жесткость		Умеренно-жесткая	Умеренно-жесткая	Умеренно-жесткая	Умеренно-жесткая	Умеренно-жесткая
	УКИЗВ		Загрязненная	Слабо загрязненная	Слабо загрязненная	Слабо загрязненная	Загрязненная
Гидро-биологическая	Индекс Вудивисса (1964)		Грязная	Загрязненная	Умеренно-загрязненная	Загрязненная	Грязная
Гео-экологическая	Почвы	Тип почв (Тонконогов и др., 2008)	Аллювиальные темногомусовые глееватые	Аллювиальные темногомусовые гидрометаморфические	Аллювиальные темногомусовые со вторичным горизонтом	Аллювиальные темногомусовые засоленные	Аллювиальные темногомусовые песчаные
		Засоление (Базилевич и др., 2013)	Сульфатный / незасоленная	Хлоридно-сульфатный/слабо засоленная	Сульфатный / незасоленная	Сульфатный / слабо засоленная	Сульфатный / незасоленная
		Рег. фон (Легостаева и др., 2017)	Zn, Pb	Нет превышений	Ni	Нет превышений	Zn, Pb
	Донные отложения	Тип донных отложений (МУ №112.)	Песчаные	Песчано-илистый	Торфяно-илистый	Песчано-торфянистый	Песчано-глинистый
		Рег. фон (Легостаева и др., 2017)	Ni	Нет превышений	Ni, Cd	Нет превышений	Нет превышений

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования получены следующие основные результаты.

1. Формирование озер г. Якутска началось в конце позднего неоплейстоцена в период масштабной перестройки рельефа долины р. Лена. Пойменное расположение и старичное происхождение котловин обусловлены длительным гидрологическим воздействием реки, сформировавшим их современные очертания. Специфика местных озер также тесно связана с криолитозоной: повсеместное распространение многолетнемерзлой толщи прерывается лишь под руслом р. Лена и озерными котловинами, где сформировались сквозные талики.

2. Интенсивное селитебное освоение территории г. Якутска приобрело статус ведущего антропогенного фактора, который коренным образом нарушил вековой баланс ключевых природных регуляторов озерных котловин – геологическое строение, рельеф, климатические условия, криолитозона, почва и растительность.

3. В результате масштабного искусственного повышения рельефа произошло полное разобщение городских старичных озер с их главным гидрологическим источником – р. Лена. Переход лимнических экосистем из проточного режима в замкнутый ликвидировал естественные механизмы паводкового промыва и самоочищения. В условиях непрерывного техногенного заиления и аккумуляции неочищенных урбанизированных стоков фиксируется прогрессирующая деградация геосистем, которая выражается в сокращении глубины, площади водного зеркала и в необратимом экологическом угасании городских озер.

4. Приоритетными загрязнителями, ухудшающими качество озерной воды г. Якутска, являются взвешенные вещества, $Fe_{\text{общ}}$, Cu, Pb и Ni. При этом установлено, что в последние годы все чаще отмечаются показатели слабокислой среды, особенно в озерах Белое и Сайсары.

5. Почва озер аллювиальная темногумусовая, имеет различную степень трансформации. Характерна нейтральная или слабощелочная реакция среды, дефицит $C_{\text{орг}}$, а также низкая обеспеченность подвижным фосфором и калием. В составе водорастворимых солей доминируют SO_4^{2-} , Mg^{2+} и Ca^{2+} . Отмечается повышенное содержание Zn, Pb и Ni.

6. Донные отложения преимущественно песчаные с примесью растительных остатков. Отложения бедны органикой и имеют слабощелочную pH. Среди водорастворимых соединений преобладают SO_4^{2-} и Ca^{2+} , зафиксировано аккумулятивное накопление Ni и Cd.

7. Геохимические исследования подтвердили роль городских старичных озер Якутска как мощных аккумуляторов микроэлементов, распределение которых в аллювиальных почвах и донных отложениях подчиняется закономерностям латеральной геохимической дифференциации. Аномальное накопление Mn, Zn, Cu, Pb и Ni обусловлено антропогенным воздействием, щелочными условиями и изменением редокс-потенциала, создающими обратимые геохимические барьеры. Пространственный анализ выявил, что эффективное

самоочищение водной толщи сопряжено с риском вторичного загрязнения при десорбции из илов, требуя мониторинга миграционных процессов для прогнозирования стабильности городских геосистем в условиях Крайнего Севера.

8. Разработан методологический алгоритм комплексной оценки эколого-географического состояния старичных озер г. Якутска. Данный подход базируется на иерархической схеме формирования и унифицированной классификационной матрице, учитывающей специфические факторы урбанизированной среды. Методика характеризуется доступностью получения результатов и эффективностью при определении экологической напряженности. На основании комплексной оценки эколого-географического состояния установлено, что большинство озер имеют малую площадь и глубину, слабую расчлененность берегов. Гидрологический режим определяется аккумулятивным классом с замедленным водообменом. Гидрохимические показатели характеризуются слабощелочной средой, преимущественно повышенной минерализацией, гидрокарбонатно-натриевым составом с умеренной жесткостью. Оценка качества вод по индексу Вудивисса и УКИЗВ выявила различную степень деградации: от умеренно загрязненных до грязных.

9. Предложена программа по улучшению геоэкологического состояния, содержащая список восстановительных мероприятий по организации системы режимных наблюдений (контроль количественных и качественных показателей, очистка и благоустройство). Реализация данных предложений обеспечит существенную оптимизацию экологической и санитарно-эпидемиологической обстановки на старичных озерах г. Якутска.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК:

1. Легостаева Я.Б., **Руфова А.А.**, Николаева Н.Е. Оценка солевого состава аллювиальных почв озерной экосистемы г. Якутска // Проблемы региональной экологии. 2026. – №1. – С. 70-75. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2026-1-70-75>

2. **Руфова А.А.** Подходы к эколого-географической классификации городских озер (на примере г. Якутска) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. – Т. 48. – С. 74–89. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.48.74>

3. Легостаева Я.Б., **Руфова А.А.** Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. – Т. 27. – № 4. – С. 572-591. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591>.

4. **Руфова А.А.**, Ксенофонтова М.И. Гидрохимический состав, как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска) // Наука и образование. 2015. – Т.23. – № 2. – С. 162-170.

5. **Руфова А.А.**, Ксенофонтова М.И. Эколого-географические факторы, обуславливающие формирование озер г. Якутска Республики Саха (Якутия) // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 1-1. – С. 1836-1845.

6. **Руфова А.А.**, Татаринова А.В. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных

городов (на примере г. Якутска) // Современные проблемы науки и образования. 2015. – № 4. – С. 503-511.

7. **Руфова А.А.**, Ксенофонтова М.И., Трофимова Л.Н. Содержание некоторых микроэлементов в воде оз. Сайсары // Наука и образование. 2013. – № 3. – С. 139-142.

8. **Руфова А.А.**, Ксенофонтова М.И., Ябловская П.Е. Мониторинг состояния озер г. Якутска по гидрохимическим показателям // Наука и образование. 2012. – № 4. – С. 52-55.

Свидетельства о регистрации баз данных:

9. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2025624801 Российская Федерация. Гидробиологическое состояние озер г. Якутска за 2012-2016 гг. / заявл. 23.10.2025: опубл. 30.10.2025 / Каратаева А.В., **Руфова А.А.**; заявитель Государственное бюджетное учреждение «Академия наук РС (Я)».

10. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2022622388 Российская Федерация. Гидрохимический состав озер г. Якутска за 1985-2021 гг. / заявл. 09.09.2022: опубл. 04.10.2022 / **Руфова А.А.**, Легостаева Я.Б.; заявитель Государственное бюджетное учреждение «Академия наук РС (Я)».

11. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2022620398 Российская Федерация. Реестр химического состава озер г. Якутск за 2009-2017 гг. / заявл. 10.02.2022: опубл. 01.03.2022 / **Руфова А.А.**; заявитель Государственное бюджетное учреждение «Академия наук РС (Я)».

Публикации в изданиях РИНЦ и материалах научных, научно-практических конференций:

12. **Руфова А.А.** Миграция микроэлементов в городской озерной экосистеме на территории криолитозоны (на примере г. Якутска) // Материалы V международной научной конференции «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии». – Барнаул, 2025. – С. 156-161.

13. **Руфова А.А.** Виды и последствия антропогенного воздействия на озерные экосистемы г. Якутска // Материалы VII межрегиональной научно-практической конференции «Арктический вектор: Экология Арктики: вызовы устойчивого развития и права коренных народов». – Якутск, 2025. – С. 25-28.

14. **Руфова А.А.** Геохимия городских озерных вод на территории города Якутска // Proceedings of the Yerevan State University, Geology and Geography. 2025. – Т. 59, № 2 (266). – С. 490-510.

15. **Руфова А.А.** Пространственно-временная трансформация озерных котловин в условиях города // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – Новосибирск, 2024. – С. 555-560.

16. Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., **Руфова А.А.** К вопросам оценки засоленности почв и грунтов (на примере приозерных территорий) // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – Новосибирск, 2024. – С. 478-483.

17. **Руфова А.А.** Факторный анализ как инструмент оценки гидрохимического состояния озерных вод г. Якутск // Материалы всероссийской студенческой конференции с международным участием «Геоэкология: теория и практика». – М., 2023. – С. 409-414.

18. **Руфова А.А.** Взвешенные вещества в озерных водах г. Якутск // Материалы IV всероссийской научной конференции «Биоразнообразие экосистем Крайнего Севера: инвентаризация, мониторинг, охрана». – Сыктывкар: ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2023. – С. 636-641.

19. **Руфова А.А.** Интегральные показатели гидрохимического состояния озерных вод г. Якутск // Материалы XXIV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования». – Москва: РУДН, 2023. – С. 323-329.

20. **Руфова А.А.** Ретроспективный анализ гидрохимического состава озер г. Якутск // Материалы XIII всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – Якутск, 2023. – С. 523-528.

21. **Руфова А.А.** Геохимический мониторинг озер г. Якутск // Материалы IV всероссийской научной конференции «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии». – Барнаул, 2022. – Т. 3. – С. 274-279.

22. **Руфова А.А.** Анализ и динамика трансформации гидрохимического состава озер г. Якутска // Материалы XII всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». – Якутск, 2022. С. 468-473.

23. **Руфова А.А.** Гидрохимический состав городских озер // Прикладные экологические проблемы г. Якутска. – Новосибирск: Наука, 2017. – С. 64-71

24. **Руфова А.А.**, Ксенофонтова М.И., Ябловская П.Е. Оценка содержания биогенных элементов в водах озер г. Якутска // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8-1. – С. 75-77.

25. **Руфова А.А.** Динамика биогенных веществ в озерах г. Якутска // Материалы научно-практической конференции «Научные и инновационные основы Стратегии социально-экономического развития городского округа «город Якутск» на период до 2030 года. – Якутск: КнигоГрад, 2012. – С.167-169.

26. **Руфова А.А.** Гидрохимия озер г. Якутска Республики Саха (Якутия) // Материалы ежегодной научно-практической конференции «География: проблемы науки и образования». –СПб.: Астерион, 2011. – С. 243-246.

27. **Руфова А.А.** Гидрохимическая характеристика озерных вод г. Якутска // Материалы XVIII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2011». – М.: МАКС Пресс, 2011. – С. 308-309.

28. **Руфова А.А.** Гидрохимический состав озер г. Якутска // Научное обеспечение решения ключевых проблем развития г. Якутска. – Якутск: ООО «Издательство Сфера», 2010. – С.228-230.

29. **Руфова А.А.** Экологическое состояние рекреационной зоны г. Якутска // Материалы X всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов –Нерюнгри: ТИ(ф)ЯГУ, 2009. – С. 271-273.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

Глава 1. Природно-антропогенные условия и степень изученности района исследования

- 1.1. Природные условия
- 1.2. Антропогенные условия
- 1.3. Степень изученности и история освоения городских старичных озер Якутска

Выводы по главе 1

Глава 2. Методология, материалы и методы исследования

- 2.1. Объекты исследования
- 2.2. Методология и методика исследований

Глава 3. Современное геоэкологическое состояние городских старичных озер Якутска

- 3.1. Анализ гидрохимического состава озерных вод
- 3.2. Система «почвы – донные отложения – поверхностные воды» в озерных экосистемах

Выводы по главе 3

Глава 4. Эколого-географический анализ старичных озер в урбоэкосистемах Якутска

- 4.1. Факторы формирования
- 4.2. Основные подходы к классификации озер
- 4.3. Классификация старичных озер г. Якутска
- 4.4. Программа по улучшению геоэкологического состояния старичных озер в урбоэкосистемах Якутска

Выводы по главе 4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ

Подписано в печать 26.06.2026. Формат 60х84/16.
Печать цифровая. Усл.-печ. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ № 124.
Издательский дом Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.
Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ИД СВФУ