

На правах рукописи
УДК 556.55:551.4.01:168 (282.256.82)

ЛЕВИНА Сардана Николаевна

**КЛАССИФИКАЦИЯ ОЗЁР БАССЕЙНА РЕКИ ИНДИГИРКА
И ИХ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
(с применением диатомового анализа)**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург
2023

Работа выполнена в Лаборатории по изучению экологического состояния Арктики – БиоМ (Биологический мониторинг) Эколого-географического отделения Института естественных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» (ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова»)

Научный руководитель: доктор географических наук, доцент, главный научный сотрудник, профессор Эколого-географического отделения Института естественных наук ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

Пестрякова Людмила Агафьевна

Официальные оппоненты:

Доктор географических наук, главный научный сотрудник, профессор Научно-исследовательской лаборатории озераведения «Белорусского государственного университета»

Власов Борис Павлович

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник группы исследований донных отложений Института водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Потахин Максим Сергеевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «30» мая 2023 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 33.2.018.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный педагогический университет 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 (191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48, корп.5) и на сайте университета по адресу: disser.herzen.spb.ru/Preview/Karta/karta_000000909.html

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

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

Сазонова Ирина Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Арктический сектор Якутии является одним из самых труднодоступных, суровых и слабоизученных районов России. Обширную часть его западных территорий занимает бассейн реки Индигирка. Здесь, в зоне сплошного залегания многолетнемерзлых горных пород, широко распространены термокарстовые озёра. Развиваясь в экстремальных условиях, они вызывают повышенный интерес со стороны научного сообщества в качестве объекта исследований. Бассейн реки Индигирка в настоящее время изучен слабо, но в то же время является потенциальным объектом развития промышленности в будущем. Установлено, что глобальное потепление климата будет наиболее остро проявляться в высоких (северных) широтах (IPCC, 2021). В связи с этим для составления прогнозных сценариев глобальных изменений климата необходимо знать современное состояние криолитозоны. Также для изучения путей рационального использования водных ресурсов требуется выделение общих и индивидуальных признаков водных объектов, обусловленных комплексом абиотических и биотических факторов окружающей среды, определенные сочетания которых формируют водоёмы различных типов по генезису, свойствам воды, морфометрии котловин и гидробионтам. Для охвата многообразия водоёмов необходимо учитывать зональные, а зональные и местные факторы, под воздействием которых формируется гидрохимический режим водоёма, обуславливающий особенности протекания в нем продукционных процессов и осадконакопления (Якушко, 1988), что вызывает необходимость и высокую актуальность установления особенностей современного состояния водоёмов слабоизученного в лимнологическом отношении бассейна реки Индигирка, а также проведения их классификации по комплексу основных абиотических и биотических признаков с целью получения обобщенных представлений об их функционировании и развитии.

Цель работы – на основе морфометрических, физико-химических параметров воды и характеристик диатомовых водорослей дать оценку состоянию и произвести классификацию озёр различного генезиса бассейна реки Индигирка.

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

1) в ходе полевых исследований и геоэкологического мониторинга выявить формы рельефа с определением типов водоёмов на мониторинговом участке бассейна реки Индигирка – полигон Кыталык. Проанализировать водоёмы полигона на изменение структуры биоиндикаторов, морфометрических и гидрохимических показателей;

2) установить особенности морфометрических и физико-химических параметров водоёмов на полигоне Кыталык и на разнотипных озёрах района на основе растительных зон исследования с последующим созданием базы данных;

3) изучить современный таксономический состав и эколого-географические характеристики диатомовых водорослей водоёмов полигона Кыталык и озёр бассейна реки Индигирка;

4) дать оценку современного состояния озёрных вод района исследований с применением диатомовых водорослей как биоиндикаторов изменения окружающей среды;

5) создать региональную классификацию озёр Якутии на примере бассейна реки Индигирка по отдельным лимнологическим параметрам и комплексу показателей.

Объект исследования: водоёмы полигона Кыталык и разнотипные озёра, расположенные в бассейне реки Индигирка.

Предмет исследования: диатомовые комплексы, морфометрические и гидрохимические параметры водоёмов полигона Кыталык и разнотипных озёр района исследований.

Материалы и методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены автором на основе отбора проб в полевых условиях. В работе применен комплекс лимнологических, гидрохимических, геоинформационных и статистических методов, диатомовый и сравнительно-географический анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены три формы рельефа с указанием 7 типов водоёмов на мониторинговом участке бассейна реки Индигирка – полигон Кыталык: термокарстовые котловины (аласы), едомные возвышенности и пойма реки Бёрёлёх (Елонь). Анализ изученных водоёмов указывает на изменение биоиндикаторов, морфометрических и гидрохимических показателей с характерными особенностями по типам водоёмов.

2. Выявлены природные лимно-гидрохимические и эколого-географические особенности водных объектов бассейна реки Индигирка с физико-химическими показателями зонального характера изменения и классами качества воды по сапробности диатомей в водоёмах полигона Кыталык и разнотипных озёр.

3. Региональная эколого-лимнологическая классификация озёр Якутии, включающая 3 параметра, 18 признаков и 108 показателей, позволяет классифицировать озёра бассейна реки Индигирка с присвоением индивидуальных паспортов водным объектам и выявлением преобладающих классов.

Научная новизна работы состоит:

— в пионерном многоаспектном изучении диатомовых комплексов водоёмов полигона Кыталык арктической территории района исследования во взаимосвязи с абиотическими параметрами среды (морфометрическими, гидрохимическими характеристиками и параметрами местоположения водоёмов);

— в создании информационной базы параметров современного состояния водных экосистем по морфометрическим, физико-химическим показателям водоёмов полигона Кыталык и озёр бассейна реки Индигирка;

— в проведении комплексной оценки качества озёрных вод бассейна реки Индигирка по растительным зонам и по генезису их котловин;

— в разработке региональной многокритериальной эколого-лимнологической классификации озёр Якутии на примере бассейна реки Индигирка.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых сведений о состоянии экосистем водоёмов полигона Кыталык и озёр различного генезиса

бассейна реки Индигирка по комплексу абиотических и биотических параметров, отражающих местоположение водных объектов, качество их воды, морфометрические параметры и состав диатомовых комплексов (ДК). Результаты работы могут быть основой для дальнейших исследований водных объектов бассейнов северных рек криолитозоны. Выводы диссертации вносят вклад в понимание общей изменчивости диатомовой флоры и абиотических параметров водной экосистемы в экстремальных условиях окружающей среды Арктики.

Практическая значимость. Материалы работы могут быть применены при проведении на территории района исследования водохозяйственных и природоохранных мероприятий. Свод данных о качестве воды и состоянии диатомовой флоры применимы в качестве информационной основы для организации экологического мониторинга и охраны окружающей среды территории якутской Арктики. Разработанная автором региональная эколого-лимнологическая классификация (РЭЛК) озёр, учитывающая основные компоненты озерной системы, пригодна для решения задач озёрного природопользования разного уровня. Результаты оценки современного состояния разнотипных озёр могут быть использованы при хозяйственном освоении и прогнозирования развития территории в условиях изменяющегося климата.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты исследований обсуждались на научно-практических конференциях республиканского, российского и международного уровня: 2-ая Международная конференция «Палеолимнология северной Евразии» (Якутск, 2016); Ежегодная международная научно-практическая конференция Герценовские чтения «География: развитие науки и образования» (Санкт-Петербург, 2018-2022); XV Международная научно-практическая конференция «Наука и образование сохраняя прошлое» (Пенза, 2018); XXVI Международная научно-практическая конференция «Вопросы современных научных исследований» (Омск, 2018); The 3rd International Conference «Paleolimnology of Northern Eurasia: experience, methodology, current status and young scientists school in microscopy skills in Paleolimnology» (Казань, 2018); Международная научно-практическая конференция «Вопросы современных научных исследований» (Омск, 2018); II Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности» (Санкт-Петербург, 2019); VI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные основы инновационного развития науки и образования» (Пенза, 2019); Международная научно-практическая конференция «Системная трансформация – основа устойчивого инновационного развития» (Уфа, 2020); The 4th International Conference «Paleolimnology of Northern Eurasia» (Иркутск, 2020); Международная научно-практическая конференция «Молодёжная наука» (Пенза, 2020); XXI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием (Нерюнгри, 2020); Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (Москва, 2021, 2022); Аспирантские чтения-2021 (Якутск, 2021); The 5th International Conference «Paleolimnology of Northern Eurasia and the School of Young Scientists» (Санкт-Петербург, 2022); XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (Якутск, 2023).

Основное содержание и научные положения диссертации изложены в 28 печатных работах, из которых 4 опубликованы в изданиях из списка ВАК. Полученные результаты в ходе выполнения диссертационной работы стали основой 3 свидетельств о регистрации электронных баз данных (РИД) и 1 в международной системе PANGAEA.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы и приложений. Общий объем составляет 227 страниц, включает 77 рисунков, 32 таблицы. Список приложений – 5. Список литературы содержит 213 наименований, из которых 55 на иностранных языках.

Личный вклад автора. Диссертационная работа является самостоятельно выполненным научным исследованием. Автор самостоятельно спланировал полевые работы и выступил руководителем экспедиций по сбору фитопланктонных проб и поверхностных донных отложений (0-1 см) образцов на территории Ресурсного резервата «Кыталык» в 2017 году, а также участвовал в полевых геоботанических исследованиях в окрестностях поселка Чокурдах (Аллаиховский район) в течение 2013-2014 гг. Автор самостоятельно выполнил диатомовый анализ образцов, измерения в полевых условиях быстроизменяющихся физико-химических параметров воды водоёмов полигона Кыталык и озёр. Автором лично составлена база данных морфометрических, физико-химических параметров и диатомовых водорослей, проведена статистическая обработка данных с полным участием в интерпретации всех результатов и формулировок защищаемых положений, а также предложена и разработана РЭЛК озёр региона. Работа выполнена в лаборатории по изучению экологического состояния Арктики (БиоМ) Эколого-географического отделения Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова» в рамках исполнения проектов РФФИ (№11-04-91332-ННИО; №13-05-00327 и 15-45-05063), проектов Министерства науки и высшего образования РФ (Программа развития СВФУ. Мероприятие 2.8 Биомониторинг тундровых экосистем Северо-Востока России в условиях глобального изменения климата и интенсификации антропогенного процесса (мониторинг, экология, палеогеография, модель и технологии природопользования) в период 2011-2014 гг.; Проектная часть государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ по заданию №FSRG-2020-0019) и за счет экспедиционных грантов Института полярных и морских исследований имени А. Вегенера (АВИ, Германия).

Благодарности. Автор выражает признательность и благодарность за помощь в подготовке диссертации и наставничеству научному руководителю д.г.н. Пестряковой Людмиле Агафьевне, коллективу лаборатории БиоМ и Эколого-географического отделения Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова» за всестороннюю помощь и поддержку в написании работы. Особые слова благодарности автор выражает к.б.н. Р.М. Городничеву и к.г.н. М.С. Васильеву за консультации по статистической обработке фактического материала и интерпретации полученных результатов. Автор признательна за ценные советы сотрудникам Института биологических проблем криолитозоны СО РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлены актуальность работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимости. Изложена степень и достоверность исследований. Приведена структура и содержание работы. Перечислены публикации и личный вклад автора в работу.

В **первой главе «Физико-географические условия и обзор изученности водных экосистем бассейна реки Индигирка»** приведены основные характеристики природно-климатических условий района исследований. Бассейн реки Индигирка расположен на Верхоянско-Колымской горноскладчатой области, которая охватывает бассейны рек Алазеи, Яны, Алдана и Лены. Район расположен в северной части Восточной Сибири.

Индигирка является одной из самых крупных рек Восточной Якутии. Длина водотока – 1726 км, площадь водосборного бассейна составляет ~360 тыс. км². Исследуемые водоёмы расположены между 65°10' – 71°10' с.ш. и 143°36' – 149°19' в.д. Абсолютные высоты месторасположения озёр и водоёмов полигона Кыталык находятся в пределах от 4 (Яно-Индигирская низменность) до 596 м (Момский хребет) над уровнем моря. Протяженность района исследования, ограниченная координатами местоположения озёр, составляет ~700 км с севера на юг и ~200 км с запада на восток. Все изученные объекты, кроме озера Ю26, расположены за Северным полярным кругом. Территория района расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, характеризуется широким развитием термокарстовых процессов и водоёмов, образующихся в результате их протекания. Исследуемая территория характеризуется широким развитием «ледового» или «едомного» комплексов. Расположение исследованного региона в пределах арктического и субарктического поясов обуславливают особенности его климата. Район исследования представлен подзонами субальпийской тундры, лесотундры и северной тайги (Андреев и др., 1987). В главе так же приведен обзор изученности водных объектов бассейна реки Индигирка. В виду того, что изученность диатомовой флоры бассейна реки Индигирка немногочисленна, исследования были сгруппированы по двум периодам: ранний этап (Никитина, Толстихин, 1969; Комаренко, Васильева, 1975; Егорова и др., 1991 и др.) и этап современных исследований (Ядрихинский, Пестрякова, 2014; Городничев, Пестрякова, Ядрихинский, 2015; Пестрякова и др., 2015; Габышев, Габышева, 2018 и др.).

Глава вторая «Материалы и методы исследований» посвящена **описанию объектов, материалов и методов исследований**. Водоёмы на участке (полигоне) Кыталык рассмотрены в качестве начальной стадии формирования термокарстовых озёр региона, а также природного компонента, остро реагирующего на изменения окружающей среды (Кравцова, Быстрова, 2009). Всего изучено 35 водоёмов, расположенных на участке Кыталык левобережья бассейна реки Берёлёх – левого притока реки Индигирка (28 км от поселка Чокурдах Аллаиховского района Республики Саха (Якутия) – рис. 1. В диссертацию включены материалы исследований 42 озёр, разного происхождения: термокарстового – 36 %; водно-эрозионного – 21 %; эрозионно-термокарстового – 19 % и ледникового – 24 %.

Основная масса озёр приурочена к равнинным территориям обширной Яно-Индибирской низменности. Изученные озёра объединены в 3 группы по растительным подзонам, в которых они расположены: в субарктической тундре (ТТ) – 43 %; в лесотундре (ЛТ) – 13 %; в северной тайге (СТ) – 26 % (рис. 2).

Фактический материал исследования собран при участии автора работы в ходе экспедиций сотрудников лаборатории Биом, организованных и проведенных за период 2004-2018 гг. совместно с коллегами из РГПУ им. А.И. Герцена (г. Санкт-Петербург), Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Казань), МГУ (г. Москва) и АВИ (Германия). Все полевые исследования проводились в летний период. В ходе исследований были отобраны пробы воды, верхнего слоя донных осадков (0–1 см) и фитопланктона. Для проведения мониторинга современных условий полигональных водоёмов был выбран модельный водоём IP1, расположенный на более низком аласном уровне (70°49'52.36''с.ш., 147°28'58.76''в.д.) местности «Кыталык» (рис. 3), где в период с 19 июля по 26 августа 2011 г. были установлены датчики (логгеры) для регистрации непрерывного изменения набора физических параметров воздуха, воды и почвы.

Отбор донных отложений производился с лодки дночерпателем Ленца фирмы Гидро-Биос и грунтовой трубкой ÜWITEC (Австрия) из глубокой части водоёмов. Прозрачность воды определена с использованием диска Секки. Глубина водоёма измерена портативным эхолотом Echotest II (Япония); координаты фиксировались портативным GPS-навигатором Garmin 62s.

Поверхностные пробы воды на химический анализ отобраны в месте наибольшей глубины в каждом озере и полигональном водоёме с погружением стерильной бутылки для отбора и хранения проб на ~0,5 м и ~0,1 м от поверхности воды соответственно. В месте отбора каждой пробы с помощью многопараметрового электрохимического прибора WTW Multi-340i определено содержание растворенного кислорода, рН и удельная электропроводность воды.

Количественные и качественные пробы фитопланктона в воде мониторингового водоёма IP1 отобраны при помощи планктонной сетки с размером ячейки 5 и 7 мкм. Консервация проб фитопланктона осуществлена путем добавления 1-2 капель 40 % формалина. Морфометрические параметры водоёмов полигона Кыталык определены во время полевых работ с использованием измерительной ленты. Для определения конфигурации озёр использовались показатели, широко применяемые в лимнологии (Богословский, 1960). Сведения о морфометрических характеристиках озёр (площадь водной поверхности, длина, максимальная ширина, длина береговой линии) измерены с использованием космоснимков Google Earth Pro (время обращения август-сентябрь 2017 г.) и уточнены по топографическим картам масштаба 1:50000-1:200000.

Другие параметры (средняя ширина, развитие береговой линии, показатель удлиненности и приблизительный объём воды) рассчитаны с использованием формул (Григорьев, 1959; Городничев и др., 2015).

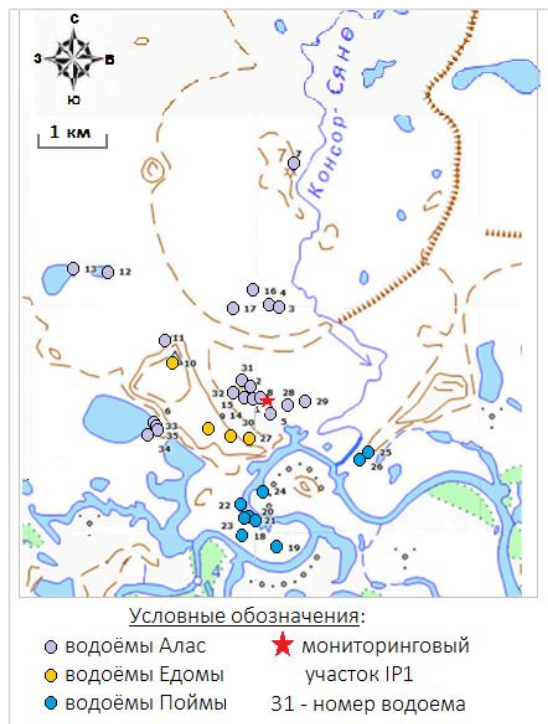


Рис. 1 – Месторасположение водоёмов местности Кыталык

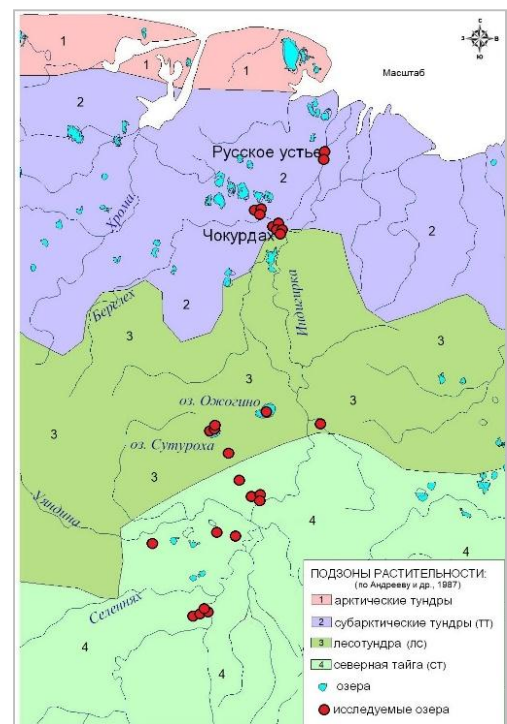
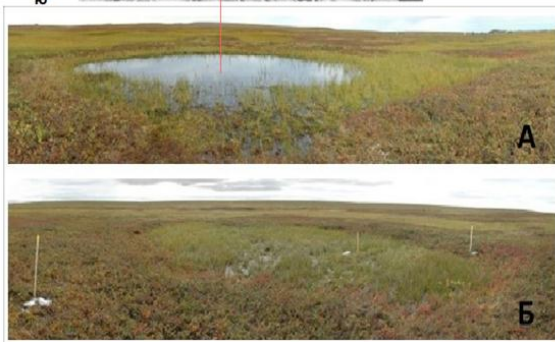
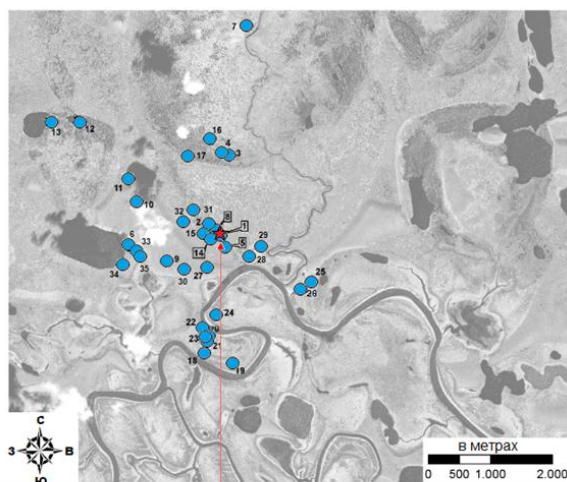
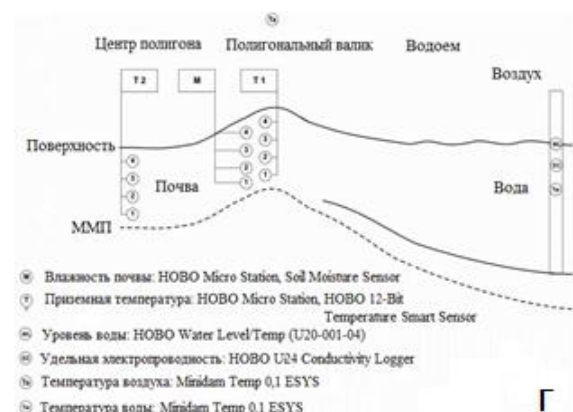
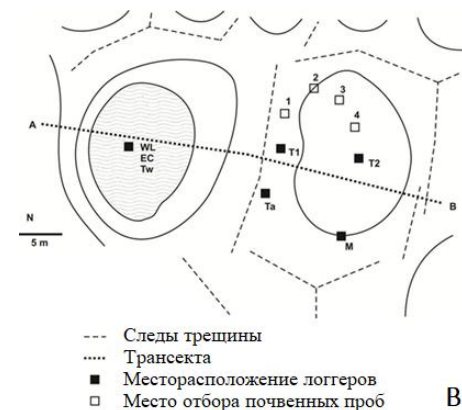


Рис. 2 – Карта-схема расположения озёр бассейна реки Индиگیرка



Водоёмы местности Кыталык:
 ○ водоём 27 номер водоёма ★ мониторинговый водоём IP-1

Рис. 3 – Мониторинговый участок, где А – модельный полигональный водоём IP1, Б – сухой участок (фото Ширрмейстера, 2011), В – схема мониторингового участка IP1, Г – на схеме указаны места (кружочки) установки датчиков измерения данных и перечень типов логгеров



Значения гидрохимических параметров определены с помощью общепринятых сертифицированных методик на базе структурных подразделений ИЕН СВФУ и АВИ. По результатам анализа построены треугольные диаграммы ионного состава воды, выполненные в программе Grapher Ver. 12.2.14 (2014).

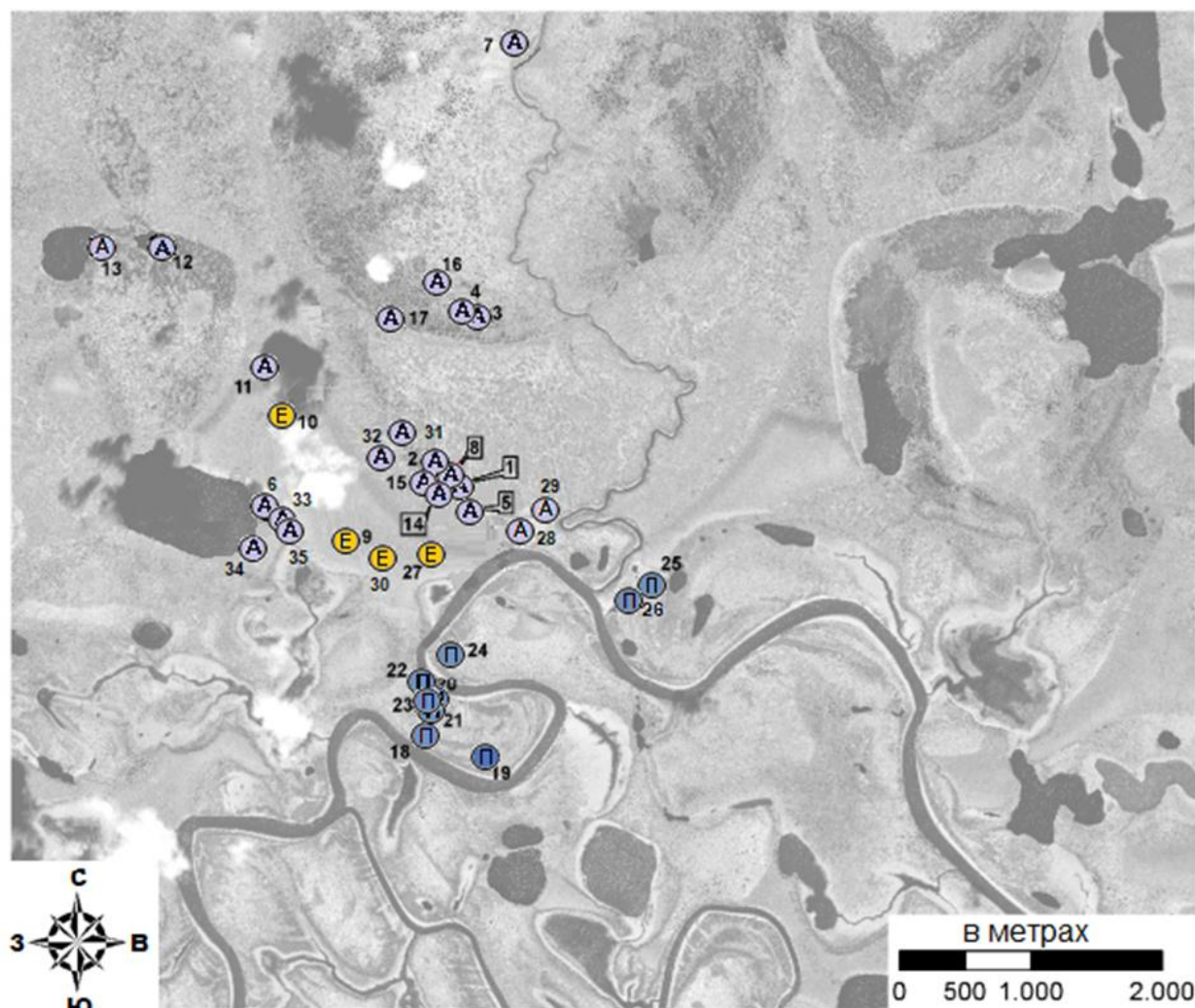
В ходе исследования собрано и обработано 200 образцов поверхностного слоя (0-1 см) донных осадков и фитопланктонных проб. Методика выполнения диатомового анализа озёрных осадков водоёмов подробно описана в статье автора с соавторами (Левина и др., 2021).

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программы Microsoft Excel (Городничев и др., 2019). Кластерный и корреляционный анализы исследуемых параметров проведены в программе PAST Ver. 4.0 (Hammer et al., 2001). Процедуры кластерного анализа проведены с применением евклидова расстояния методом невзвешенного попарного среднего арифметического. Корреляционный анализ осуществлен на основе коэффициента ранговой корреляции Спирмена. При построении диатомовых диаграмм использовался пакет программ TILIA, TILIA-GRAF, TGView версии 1.7.16 (Grimm, 2004). В диаграммах визуальное разделение таксон на локальные зоны произведено с применением программы CONISS.

В третьей главе «**Геоэкологический мониторинг водоёмов участка (полигона) Кыталык**» диссертации приведены материалы мониторинговых исследований водоёмов полигона Кыталык. Выделены три основные формы рельефа, с которыми связаны изученные водоёмы: термокарстовые котловины (аласы), едомные возвышенности и пойма реки Бёрёлёх (Елонь) – рис. 4. Изученные водные объекты на полигоне Кыталык по выявленным трем формам были отнесены к 7 типам водоёмов, из них в пределах аласов (внутриполигональные (I); межполигональные водоёмы в понижениях над протаивающими повторно-жильными льдами (ПЖЛ) (II); водоёмы сложные межполигональные в понижениях над протаивающими ПЖЛ (III); водоёмы на деградирующих полигонально-валиковых образованиях ПЖЛ (IV); остаточное термокарстовое озеро (V)); на едомных возвышенностях (водоёмы на первичных термокарстовых западинах (VI)); поймы реки Бёрёлёх (внутриполигональные водоёмы (I); межполигональные водоёмы в понижениях над протаивающими ПЖЛ (II); озёрки пойменные термокарстово-эрозионные (VII)).

Произведено детальное исследование изменения температуры воздуха (T_a), почвы и воды (T_b); физико-химических параметров воды (рН, удельной электропроводности, концентрации растворенного кислорода) и уровня мониторингового водоёма IP1, охватившие временной промежуток более 30 суток. В результате проведенной работы установлено, что зарегистрированные T_a и T_b меняются параллельно и демонстрируют сходные ежедневные закономерности. Изменение T_b на глубине 5 см происходило от +10 до +23,5 °С. Сонаправленные колебания отмечены для удельной электропроводности (от 9,5 до 17,5 мкСм/см) и уровня воды, который в первой половине полевого сезона (июль) был равен 0,37 м, а во второй половине августа в среднем достигал 0,51 м. К концу полевого сезона были зафиксированы колебания T_a от +24 до -1,4 °С. Суточная амплитуда изменения T_a и T_b в водоёме так же достаточно велика, например 23 июля T_a колебалась в

диапазоне от +8,3 до +12,5 °С, а T_v от +5,5 до +8,5 °С. Характер изменения исследованных параметров модельного водоёма IP1 указывает на то, что водоёмы полигона Кыталык достаточно быстро реагируют на внешние факторы.



Водоёмы местности Кыталык :

- аласные (А)
 - на едомных возвышенностях (Е)
- пойменные (П)
 - 27 номер водоёма

Рис. 4 – Полигон «Кыталык» и исследованные водные объекты

Флора диатомовых водорослей мониторингового водоёма насчитывала 41 вид (в т.ч. 1 разновидность), относящийся к 16 родам, 13 семействам и двум классам отдела Bacillariophyta. Массовые виды (более 5 %) диатомей представлены 11 таксонами (рис. 5). Из них только *Eunotia bilunaris* и *Tabellaria flocculosa* занимали первые ранговые места за весь период наблюдения. В целом, таксономический и эколого-географический анализы ДК фитопланктона полигонального водоёма IP1 показали, что изученное сообщество является довольно бедным и характерным для ультрапресных кислых вод дистрофного типа. Обнаружены взаимосвязи между концентрацией растворенного в воде кислорода ($K_{\text{раст.}}$) и некоторыми эколого-географическими показателями ДК (рис. 6) водоёма. Так, рост концентрации $K_{\text{раст.}}$ сопровождается сокращением доли донных диатомей, что, вероятно, объясняется

усилением процессов жизнедеятельности эпифитных организмов (обрастателей) и некоторым снижением прозрачности воды, необходимой для благополучного развития донных форм. Рост содержания $K_{\text{раст.}}$ также происходит параллельно снижению бореальных форм, что находит объяснение в том, что большая часть особей донных диатомей являются бореальными таксонами, предпочитающими умеренный температурный режим.

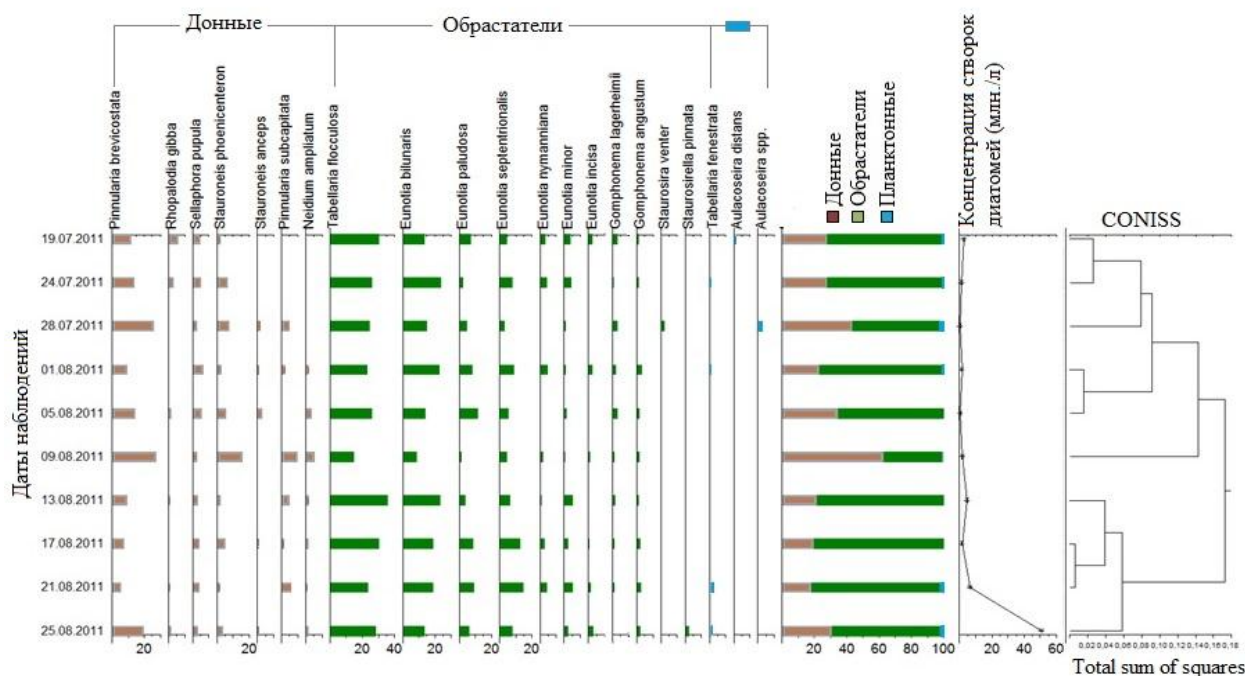
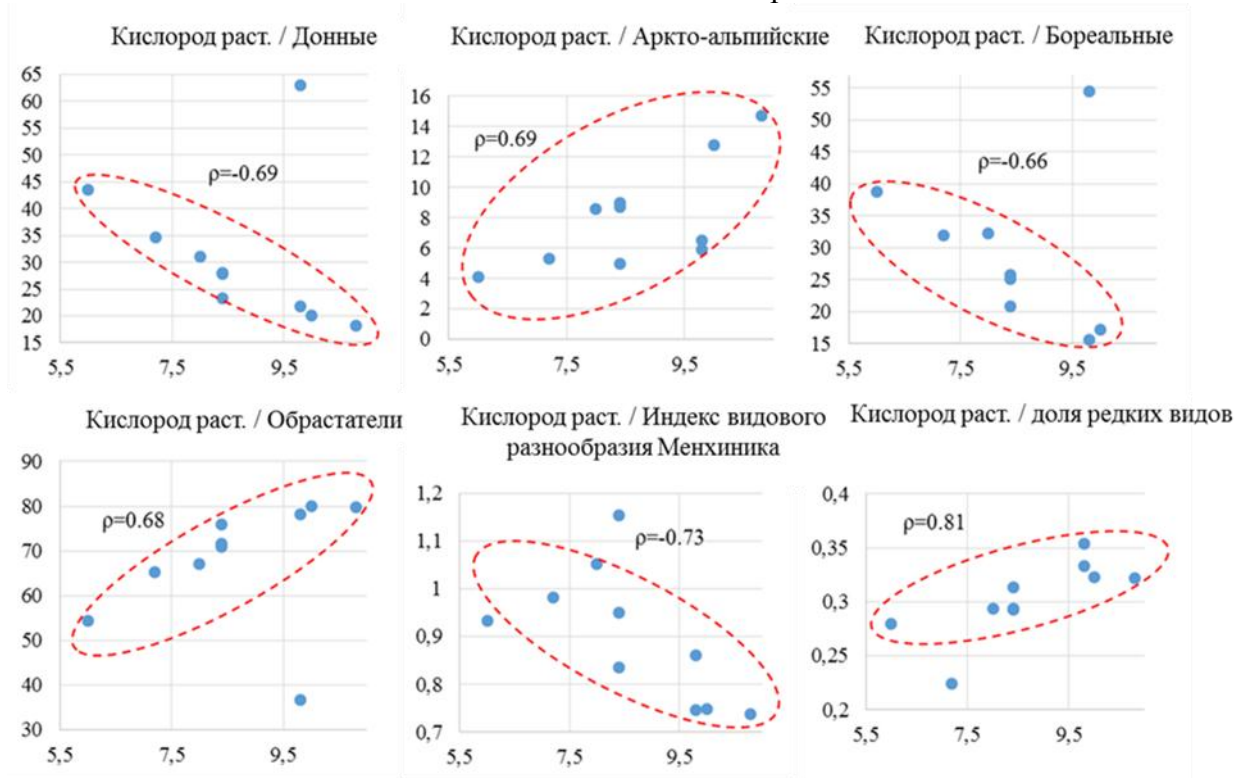


Рис. 5 – Массовые виды диатомей в водоёме IP1 за период наблюдения за 2011 г.



*Примечание: кислород – мг/л (ось x); группы диатомей – % (ось y).

Рис. 6 – Связь $K_{\text{раст.}}$ в воде с эколого-географическими показателями ДК водоёма IP-1

Сокращение донных форм в условиях низкой прозрачности (высокого кислорода) является благоприятным условием для арктоальпийских диатомей, представленных, главным образом, обрастателями (*Eunotia septentrionalis*, *E. denticulata* и *Symbopleura tynni*). При этом рост концентрации $K_{\text{раст}}$ сопровождается возрастанием арктоальпийских диатомей, предпочитающих холодноводную среду. Наблюдается сокращение индекса разнообразия Менхиника (D_{mn}) и возрастание доли редких видов (h), что свидетельствует о тенденции на сокращение общего числа видов диатомей и общего количества отмечаемых особей диатомей при возрастании концентрации $K_{\text{раст}}$.

Произведено исследование морфометрических и гидрохимических параметров 35 водоёмов полигона Кыталык, отнесённых к 7 типам по трём основным формам рельефа: термокарстовые котловины (аласы), едомные возвышенности и пойма реки Бёрёлёх (Елонь). Площадь водного зеркала водоёмов аласа и поймы (до 50 x 39 м) и водоёмов едома (13 x 10 м) очень маленькая. Длина береговой линии примерно одинакова для всех объектов исследования и составляет в среднем около 0,1 км. В соответствии с классификацией С.П. Китаева (2007) по значениям максимальной глубины (от 0,1 до 0,8 м) все объекты отнесены к водоёмам с очень малой глубиной. Типичной формой котловины для исследуемых водоёмов является округлая и близкая к округлой (88 %). Вода всех водоёмов обладает 100 % прозрачностью, главным образом, является ультрапресной, очень мягкой с повышенной концентрацией общего железа и аммония. Во всех водоёмах отмечено превышение (до 99 раз) значений предельно-допустимых концентраций веществ для водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{р.в.}) общего железа (рис. 7). По иону аммония для водоёмов, расположенных на аласных депрессиях отмечено превышение ПДК_{в.р.} до 9 раз. Водоёмы находятся в удалении от населённых пунктов и, вероятно, повышенные концентрации иона аммония являются результатом естественных причин. Вода объектов исследования характеризуется широким диапазоном pH. Водоёмы аласа (I, II, III, IV, V типов) обладают значениями водородного показателя, варьирующими от кислых до слабощелочных (среднее 6,4), водные объекты поймы характеризуются нейтральным pH (среднее 6,9), а водоёмы, приуроченные к едомной возвышенности, отличаются слабокислой и кислой средой со средним значением pH – 5,8. По классификации О. А. Алекина (1970) химический состав вод большинства исследуемых водоёмов отнесен к классу сульфатных группам натриевых (алас, 48 %), магниевых и натриевых (едома, по 33 %) и классу гидрокарбонатных группе натриевых (пойма, 71 %).

Произведен сравнительный анализ морфометрических и гидрохимических параметров водоёмов за 2011 и 2017 гг. Установлена тенденция увеличения размеров исследуемых **водоёмов по длине и ширине**, при этом **глубина водоёмов сильно не изменились**. Форма зеркала стала более округлой. Значительными изменениями в длине и ширине отмечаются внутриполигональные водоёмы аласа и все межполигональные водоёмы в понижениях ПЖЛ. 50 % объектов характеризуются увеличением максимальных глубин (от 0,5 до 0,8 м), здесь выделяется увеличением в два и более раз остаточное термокарстовое озеро (IP12) на аласе и водоём на первичной термокарстовой западине на едоме (IP10).

Изменения гидрохимических характеристик отражается в уменьшении водородного показателя. 12 % водоёмов перешли из класса гидрокарбонатных группы кальциевых в класс сульфатных группы натриевых вод. Из-за небольших размеров исследуемые водоёмы полигона быстро реагируют на изменения внешних факторов. Снеговое и дождевое питание водоёмов, близость моря (в среднем в 125 км), способствующее обогащению атмосферных осадков ионами натрия, и большой объём талого стока в июне и июле 2017 года (An extreme..., 2020) могли способствовать изменению в химическом составе воды объектов исследования во второй год наблюдений.

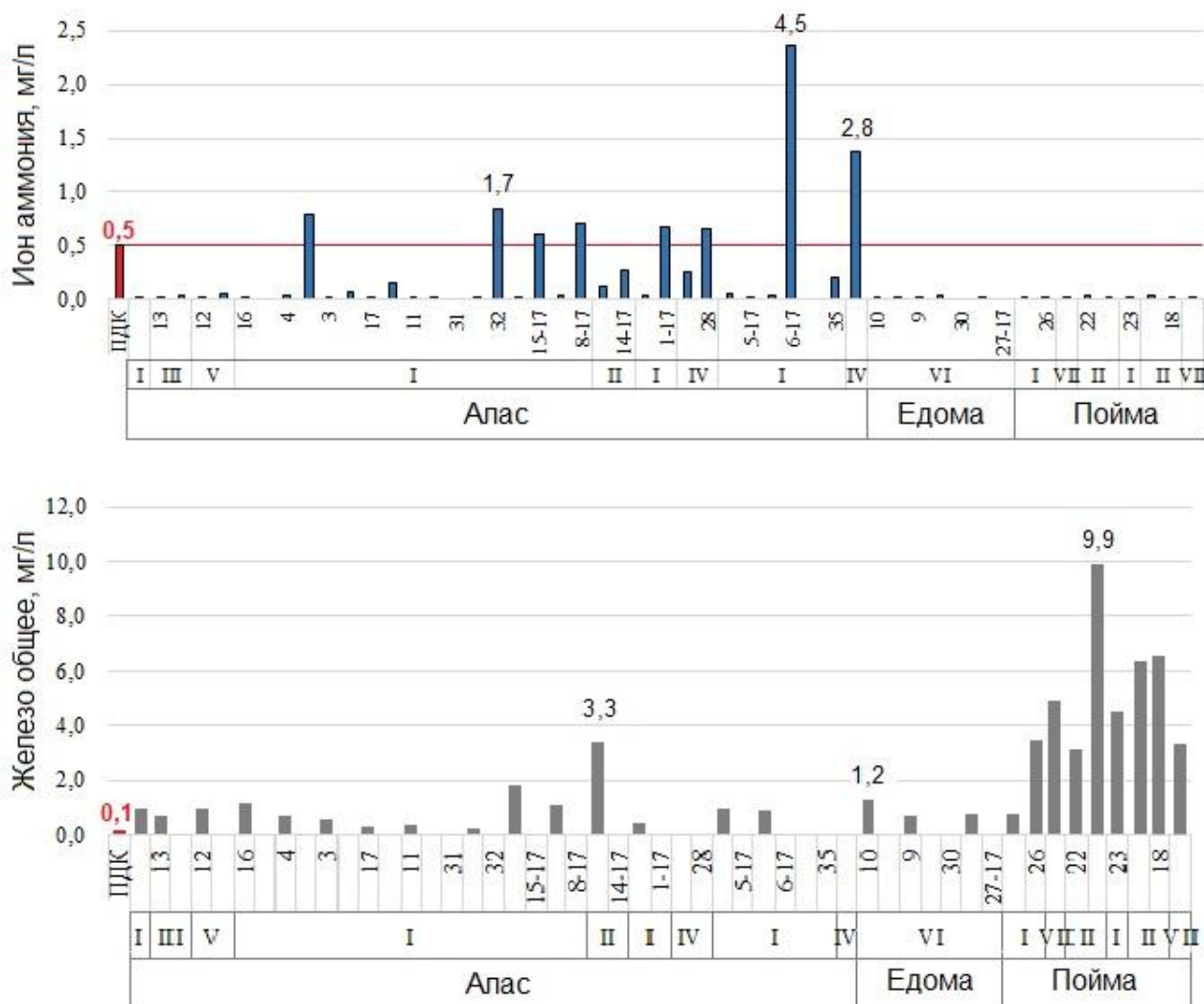


Рис. 7 – Концентрация общего железа и аммония в воде и превышение ПДК_{в.р.} в водоёмах полигона Кыталык

В 35 объектах исследования, расположенных на полигоне Кыталык, зарегистрировано 152 вида (в т.ч. 2 разновидности), относящиеся к 38 родам, 21 семействам, 12 порядкам и 3 классам отдела Bacillariophyta. Список массовых таксонов ДК насчитывает 40 видов, в т.ч. 13 видов во флоре представлены исключительно как доминанты (более 10 %), 11 только как субдоминанты (от 5 до 10 %) и 16 видов переходили из одной группы в другую. В водоёмах абсолютно преобладают такие виды как – *Tabellaria flocculosa* (в 48 водоёмах из 49), *Eunotia*

bilunaris (в 46 водоёмах), *E. subarcuatoides* (в 19). Отмеченные виды типичны для северных пресноводных объектов. Анализ состава ДК по трём формам рельефа участка Кыталык показал разделение диатомей водоёмов аласа на верхний (водные объекты 3, 4, 7, 11, 12, 13, 16, 17) и нижний (1, 2, 5, 6, 8, 14 и 15) участки; водоёмов поймы на подгруппы: внутрполигональные (ванны), межполигональные водоёмы «трещины» и термокарстово-эрозионные озёрки. Из 152 таксонов 51 % принадлежит к формам обрастателей макрофитов и перифитону, 43 % представлены донными, 6 % – диатомеи, обитающие в планктоне.

По галобности самой многочисленной группой являются индифференты, составляющие 63 % всей флоры. По рН широко представленными группами во флоре диатомей являются ацидофилы (30 %), развивающиеся в кислой и слабокислой среде при рН < 7, и алкалофилы (25 %) с преимущественным развитием при рН > 7. По географическому распределению большинство диатомей относится к группе с широким географическим распространением – космополитам (39 %) и к относительно тепловодным бореальным (34,8 %).

Произведена оценка современного состояния исследуемых водоёмов с применением диатомовых водорослей в качестве биоиндикаторов. Вода объектов исследования отнесена к категории чистых (II класс). Значения индекса сапробности водоёмов меняются от 0,6 до 1,5. Водоёмы едомы характеризуются относительно низкими показателями. По сравнению с водоёмами аласа и поймы водоёмы едомы характеризуются относительно низкими показателями индекса сапробности (со значениями 0,6 и 0,7).

Четвертая глава «Выявление лимно-гидрохимических и эколого-географических особенностей озёр бассейна реки Индигирка» посвящена выявлению лимно-гидрохимических и эколого-географических особенностей озёр района исследований. В разделах 4.1 («**Особенности морфометрических показателей**»)-4.3 («**Таксономическая и эколого-географическая структура диатомовых комплексов в поверхностных осадках озёр**») рассмотрены особенности морфометрии озёр, приведены физико-химические параметры воды и описаны таксономическая и эколого-географическая структуры ДК в поверхностных осадках изученных озёр, сгруппированных по подтипам растительности: субарктической тундры (43 % озёр), лесотундры (31 %) и северной тайги (26 %). Исследованные озёра по происхождению были отнесены к 4 типам: водно-эрозионные (9), термокарстовые (15), эрозионно-термокарстовые (8), ледниковые (10).

Большинство озёр обладают малой величиной площади водного зеркала (33 %), варьируя от 0,003 (Ю29, субарктическая тундра) до 157 км² (Ю42, лесотундра). Относительно крупными размерами выделяются озёра ледникового происхождения зоны лесотундры (Ожогоино и Сутуруоха), длина котловины достигает 28 км. Озёра обладают очень малой глубиной (74 %). Абсолютное большинство озёр отнесены к очень малым (по значениям средней глубины), имеют близкие к округлым формам котловины (64 %) и слабую изрезанность береговой линии (93 % озёр круглые). Вода почти всех озёр характеризуется высокой прозрачностью, низкие значения показателя отмечены вблизи населенных пунктов. Озёра с мутной водой приурочены к с. Сутуруоха (Абыйский улус), со среднемутной – к с. Куберганя

(Абыйский улус), со слабо мутной – к с. Чокурдах (Аллаиховский улус). рН варьирует от 4,1 (кислая среда) до 8,95 (щелочная). Большинство озёр обладают слабощелочной средой (45 %). Таковыми водными объектами являются водно-эрозионные озёра тундры и северной тайги и ледниковые озёра лесотундры. Все озёра обладают ультрапресной, главным образом, «очень мягкой» (95 %) водой, жесткость воды снижается по направлению с юга на север. Удельная электропроводность достигает 380,3 мкСм/см. Наибольшее значение данного параметра отмечено для водно-эрозионных озёр северной тайги. Для 43 % озер прослеживается превышение ПДК_{р.в.} общего железа. Максимальные значения, достигающие 0,8 мг/л, отмечены для озёр лесотундры. Большинство вод исследуемых озёр относится к классу гидрокарбонатных (90 %), группе магниевых (50 %) и кальциевых (28 %), небольшая доля принадлежит группе натриевых вод (9 %).

Диатомовой флора озёр, представлена 257 видами (в т.ч. 4 разновидностями), относящимися к 75 родам, 30 семействам, 15 порядкам, 3 классам Bacillariophyta. В озёрах субарктической тундры, лесотундры и северной тайги найдено соответственно 177, 150 и 140 видов диатомовых водорослей. К массовым формам отнесены 55 видов, из них доминантами выступают 14, субдоминантами – 24 вида. Остальные виды переходят из первой группы во вторую и обратно. Впервые для флоры Якутии обнаружено 11 новых видов диатомей. 12 % общего числа видов относились к «редким» для флоры Якутии таксонам. По преимущественному местообитанию ДК представлены, главным образом, донными видами (48 %) и обрастателями (43 %); по галобности 66 % – индифференты; по предпочитаемому рН преобладают алкалофилы (39 %). По географическому распределению ДК озёр характеризуются почти равной долей участия бореальных и космополитных форм (39 % и 37 % соответственно). В ходе проведённых работ дана оценка состояния озёрных экосистем с учетом различных индексов разнообразия и сапробности, рассчитанных для диатомовых водорослей. Интегральные индексы сапробности изученных озёр колеблются от 0,73 до 1,73. Озёра субарктических территорий (94 %) и северной тайги (63 %) по уровню органического загрязнения оказались «чистыми» (III класс), составляя 57 % от выборки. Вода озёр лесотундры (61 %) со средним значением параметра (1,56) отнесена к III классу качества (умеренно загрязненная), включая 47 % выборки (рис. 8). Относительно загрязненные участки района исследований приурочены к территории сёл Чокурдах (Аллаиховский район) и Сутуруоха (Абыйский район).

Корреляционный анализ исследованных водоёмов показывает, что выявлены положительные связи между концентрациями ионов магния, кальция, минерализацией и общей жесткостью воды, а также установлено удаление озёр от ближайших водотоков с продвижением на север и запад. Концентрации растворенного в воде кремния, общего железа и кальция возрастают сонаправленно. Значительная часть бореальных особей диатомей представлены донными алкалофильными формами, космополиты – обрастателями. При возрастании доли обрастателей наблюдается сокращение донных форм и наоборот. Обитатели пресной воды преимущественно развиваются при пониженных значениях рН и в чистой воде, индифференты – при нейтральной рН среде и в очень чистой воде.

Пятая глава «Эколого-лимнологическая классификация озёр бассейна реки Индигирка» посвящена разработке РЭЛК озёр на примере бассейна реки Индигирка. Дается краткий обзор существующих основных классификаций озёр по литературным источникам. Приведено краткое описание некоторых классификаций, установлено, что большинство лимнологических классификаций, в основу которых положены отдельные признаки озёр, ориентированы на конкретный регион.

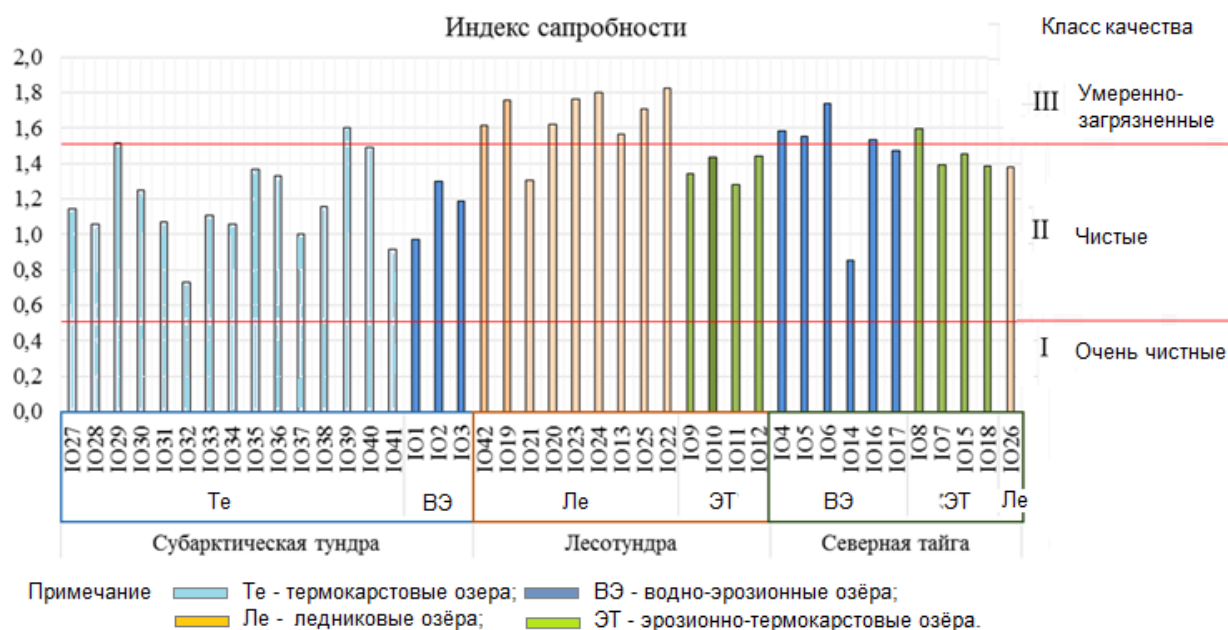


Рис. 8 – Интегральный показатель сапробности озёр и их класс качества (по диатомеям)

Приведено описание выявленных взаимосвязей параметров озёр бассейна реки Индигирка, где установлены тесные связи между абиотическими и биотическими параметрами (местоположение объектов, общая жёсткость, концентрация гидрокарбонатов, прозрачность воды, индекс сапробности озёр, индексы биоразнообразия) и эколого-географическими характеристиками ДК водоёмов. Установлены зональные изменения общей жёсткости, концентрации гидрокарбонатов и прозрачности воды. Коэффициенты Спирмена (ρ при $p < 0,05$) между указанными параметрами и координатами озёр по широте соответственно равны $-0,85$; $-0,81$ и $0,67$. С возрастанием широты местности наблюдается сокращение значений общей жёсткости и концентрации гидрокарбонатов и возрастание прозрачности воды. Проведенный корреляционный анализ позволяет сделать вывод о том, что более северные озёра расположены восточнее, при этом по мере продвижения на север происходит уменьшение высоты местоположения озёр над уровнем моря и их приближение к морскому побережью. Параллельно этому возрастает относительная численность диатомей галофобов, представленных в значительной степени ацидофилами, и степень чистоты воды, оцениваемая по индексу сапробности. Представлена разработка РЭЛК озёр Якутии (на примере бассейна реки Индигирка). При создании РЭЛК учитывались существующие классификации, в том числе структура универсальной лимно-экологической классификации (УЛЭК) (Галеева, Мингазова, 2010; Мингазова и др., 2014; Галеева и др., 2022), примененная со значительными изменениями и дополнениями. Структура

РЭЛК включает 3 параметра (географический, физико-химический и гидробиологический), 18 признаков и 106 показателей (табл.1). Каждому признаку прикреплен код обозначения, задаваемый латинскими буквами. Каждый признак включает в себя от 3 до 14 показателей. Используя структуру РЭЛК по 66 показателям, входящим в 14 признаков и 3 параметра, был выполнен сравнительный анализ эколого-лимнологических параметров 42 озёр бассейна реки Индигирка с базой данных 199 озёр Якутии (Пестрякова, 2008б; 2009). Относительно высоты над уровнем моря оказалось, что большинство озёр региона расположены на очень низкой высоте. Изученные озёра бассейна реки Индигирка находились в диапазонах высот: до 25 м – 48 % озёр; от 25 до 50 м – 43 %; от 50 до 75 м – 7 %. Исключение составляет озеро (Ю26) на Момском хребте – 596 м (2 %). По происхождению котловин все объекты отнесены к четырем генетическим типам, среди которых преобладают термокарстовые озёра (до 36 %). Аналогичная картина наблюдается и в целом по Якутии. Морфометрические параметры (площадь водного зеркала, максимальная глубина, коэффициент удлиненности и развитие береговой линии) в обоих наборах (озёр реки бассейна Индигирка и Якутии) очень схожи. Преобладают озёра с малой площадью, мелководные с глубиной менее 3 м, с формой близкой к кругу, округлые по развитию береговой линии, с прозрачной слабощелочной водой. Однако по температурному признаку они различаются: на территории всей Якутии преобладают озёра с теплой водой, а в бассейне реки Индигирка – с умеренно-холодной. Минерализация воды озёр Якутии варьирует в широких пределах, водоёмы бассейна реки Индигирка обладают ультрапресной водой. В регионе исследования абсолютно доминировали озёра с очень мягкой водой. Для набора озёр всей Якутии отмечен значительный разброс значений. По сапробности также оба набора существенно различаются. Для озёр Индигирки характерно преобладание олигосапробной зоны (64 % водоёмов). Объекты с бета-мезосапробными водами составляют 36 % общего количества. Для всей Якутии характерно преобладание бета-мезосапробных озёр (66 %). Олигосапробные и альфа-мезосапробные составляют 29 и 4 % соответственно.

При помощи РЭЛК составлена классификация 42 озёр бассейна реки Индигирка. При этом из-за отсутствия данных (исследования не проводились), из списка 18 признаков были исключены: водный баланс (W), трофический статус (Tr), флора (Fl) и фауна (Fa). Остальные признаки легли в основу составления профилей изученных озёр с присвоением индивидуальных паспортов с формулой для каждого озера. На основании полученных индивидуальных паспортов выполнен кластерный анализ для создания групп озёр, схожих между собой. Основным объединяющим показателем проведенных процедур кластеризации оказался генезис озёрных котловин. Тип озёр водно-эрозионного происхождения в наших исследованиях оказался внутри термокарстовых и эрозионно-термокарстовых озёр. Вероятно, этот факт указывает на то, что котловины водно-эрозионных озёр образовались в области древней и современной миграции рек и их притоков. Они могут быть в разных природных зонах одновременно. Не менее важный показатель объединения озёр в разные классы – ионный состав воды. Ледниковые озёра обладают гидрокарбонатно-натриевой водой; термокарстовые – гидрокарбонатно-кальциевой; эрозионно-термокарстовые – сульфатно-натриевой водой.

Табл.1 – Региональная эколого-лимнологическая классификация озёр Якутии

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ	Dm2 – большая, от 25 до 50 м	T3 – тёплые: tcp = 15-20 °С	pH6 – сильнощелочные (выше 9,5)
Высота над уровнем моря (E1) E11 – очень низкий (0-200 м) E12 – низкий (200-500 м) E13 – средний (500-1000 м) E14 – высокий (1000-2000 м) E15 – очень высокий (выше 2000 м)	Dm3 – повышенная, от 12,5 до 25 м Dm4 – средняя, от 6,25 до 12,5 м Dm5 – малая, от 3,12 до 6,25 м Dm6 – очень малая, меньше 3,12 м	T4 – очень тёплые: tcp = 20-30 °С T5 – горячие (термальные): tcp > 30 °С	Общая жесткость (Th) Th1 – очень жесткие (выше 9) Th2 – жесткие (6-9) Th3 – умеренно-жесткие (3-6) Th4 – мягкие (1,5-3) Th5 – очень мягкие (менее 1,5)
Генезис (G) Термокарстовые – G1 Водно-эрозионные – G2 Эрозионно-термокарстовые – G3 Туфановые – G4 Карстовые – G5 Траптовые – G6 Антропогенные – G7 Дельтовые – G8 Ледниково-зандровые – G9 Нагорно-плоскогорные – G10 Тектонические – G11 Лагунные – G12 Вулканические – G13 Космогенные – G14	Средняя глубина (Da) Da1 – очень большие, больше 16 м Da2 – большие, от 8 до 16 м Da3 – средние, от 4 до 8 м Da4 – малые, от 2 до 4 м Da5 – очень малые, меньше 2 м	T5 – очень мутная (менее 10 см)	ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ
Площади водного зеркала (A) A1 – очень большая, свыше 1000 км ² A2 – большая, от 101 до 1000 км ² A3 – средняя, от 10 до 100 км ² A4 – небольшая, от 1,0 до 10 км ² A5 – малая, от 0,1 до 1,0 км ² A6 – маленькая, от 0,01 до 0,1 км ² A7 – озёрки, от 0,001 до 0,01 км ²	Коэффициент удлиненности (K) K1 – вытянутая (более 10,0) K2 – удлиненная (7,0-10,0) K3 – овално-удлиненная (5,0-7,0) K4 – близкая к овалу (3,0-5,0) K5 – близкая к кругу (1,5-3,0) K6 – округлая (менее 1,5)	Минерализация (M) M1 – очень малая, до 100 мг/л M2 – малая, 100-200 мг/л M3 – средняя, 200-500 мг/л M4 – повышенная, 500-1500 мг/л M5 – высокая, 1500-3000 мг/л M6 – очень высокая, 3000 мг/л	Трофический статус (Tr) Tr1 – ультраолиготрофный Tr2 – олиготрофный Tr3 – мезотрофный Tr4 – эвтрофный Tr5 – гипертрофный Tr6 – дистрофный
Максимальная глубина (Dm) m1 – очень большая, более 50 м	Развитие береговой линии (L) L1 – изрезанная (более 6,0) L2 – слабоизрезанная (2,0-6,0) L3 – округлая (менее 2,0)	Ионный состав (I) I1 (1) – гидрокарбонатная кальциевая I1 (2) – гидрокарбонатная магниевая I1 (3) – гидрокарбонатная натриевая I2 (1) – сульфатная кальциевая I2 (2) – сульфатная магниевая I2 (3) – сульфатная натриевая I3 (1) – хлоридная кальциевая I3 (2) – хлоридная магниевая I3 (3) – хлоридная натриевая	Зона сапробности по диатомеям (Si) Si1 – ксеносапробная (до 0,50) Si2 – олигосапробная (0,50 – 1,50) Si3 – б-мезосапробная (1,51 – 2,5) Si4 – а-мезосапробная (2,51 – 3,5) Si5 – полисапробная (3,51 – 4,0) Si6 – полисапробная (>4,0)
	Водный баланс (W) W1 – проточное W2 – приточное W3 – сточное W4 – бессточное	Водородный показатель (pH) pH1 – кислые (3,0-5,0) pH2 – слабокислые (5,0-6,5) pH3 – нейтральные (6,5-7,5) pH4 – слабощелочные (7,5-8,5) pH5 – щелочные (8,5-9,5)	Флора (Fl) Fl1 – слабозарастающие озера Fl2 – макрофитные, с богатым видом Fl3 – макрофитные с низким видовым составом Fl4 – планктонные озера
	Физико-химический Температурный режим (T) T1 – холодные: tcp < 10 °С T2 – умеренные: tcp = 10-15 °С		Фауна (Fa) Fa1 – рыбные с редкими видами Fa2 – рыбные с богатым видовым составом; Fa3 – рыбные с фоновыми видами; Fa4 – безрыбные озера

Кластерный анализ на основе индивидуальных паспортов 42 озёр района исследований позволил установить три преобладающих класса, отличающихся по генезису озёрной котловины, площади и форме зеркала, химическому типу и сапробности, со следующими формулами озёр:

I. E11 G9 A3 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(3) Ph4 Th5 Si3 – **ледниковое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **среднее по площади**, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с **гидрокарбонатно-натриевой** очень мягкой водой, с **бета-мезосапробной зоной** (озёра ледникового происхождения лесотундры и северной тайги);

II. E11 G1 A5 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(1) Ph4 Th5 Si2 – **термокарстовое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **малое по площади**, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с **гидрокарбонатно-кальциевой** очень мягкой водой, с **олигосапробной зоной** (большинство термокарстовых озёр субарктической тундры и северной тайги);

III. E11 G3 A4 D5 K4 L3 T3 Ts1 M2 I2(3) Ph5 Th5 Si2 – **эрозионно-термокарстовое озеро**, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, **небольшое по площади**, с **малой глубиной**, округлое, **близкой к овалу формы**, с теплой и прозрачной водой, с **малой минерализацией**, слабощелочное, с **сульфатно-натриевой** очень мягкой водой, с олигосапробной зоной (большинство озёр лесотундры).

Таким образом, структура разработанной РЭЛК позволяет выявить отдельные классы озёр для решения конкретных задач озёрного природопользования, в том числе по использованию озёрных ресурсов.

ВЫВОДЫ

1) На полигоне Кыталык установлены 3 основные формы рельефа: термокарстовые котловины (аласы), едомные возвышенности (едома) и пойма реки Бёрёлёх (пойма). На термокарстовых котловинах выделено пять типов водоёмов: внутрполигональные (I); межполигональные в понижениях над протаивающими повторно-жильными льдами (ПЖЛ) (II); межполигональные в понижениях над протаивающими ПЖЛ со сложной конфигурацией (III); водоёмы на деградирующих полигонально-валиковых образованиях ПЖЛ (IV) и остаточные термокарстовые озёра (V). На едомных возвышенностях расположены водоёмы на первичных термокарстовых западинах (VI). На пойме реки Бёрёлёх расположены внутрполигональные (I), межполигональные в понижениях над протаивающими ПЖЛ (II) и озёрки пойменные термокарстово-эрозионные (VII).

Все водоёмы характеризуются очень маленькой площадью водного зеркала, очень малой глубиной, округлой и близкой к округлой формами. Максимальные размеры зеркала (до 50 x 39 м) принадлежат водоёмам аласа и поймы, водные объекты едомы отличаются небольшими размерами (до 13,5 x 10 м). Глубина всех водоёмов полигона небольшая (до 0,8 м), прозрачность воды 100 % (до дна). Вода слабоминерализованная, очень мягкая, ультрапресная. рН варьирует в широких

пределах. Водоёмы едомы характеризуются слабокислой и кислой средой, а водные объекты I, II, III, IV, V типов аласов обладают рН в диапазоне от кислых до слабощелочных; объекты поймы – от нейтральных до слабощелочных. Большинство водоёмов на аласах обладает водами сульфатного класса натриевой группы (48 %); едомы – сульфатными магниевыми (33 %) и натриевыми (33 %). В водоёмах поймы реки преобладают воды гидрокарбонатного класса натриевой группы (71 %). Идентичные типы водоёмов на аласе и в пойме имеют различный химический состав воды, что может говорить о значительном влиянии на него речных вод.

Во всех исследованных водоёмах зарегистрировано 152 вида (в т.ч. 2 разновидности) диатомовых водорослей, относящиеся к 38 родам, 21 семейству, 12 порядкам и 3 классам (*Bacillariophyceae*, *Coscinodiscophyceae* и *Mediophyceae*). Список массовых (более 5 % клеток) таксонов диатомовых насчитывает 40 видов. Массовые формы представлены типичными видами северных пресноводных водоёмов такими, как *Tabellaria flocculosa*, *Eunotia bilunaris*, *Eunotia subarcuatoidea*, *Pinnularia brevicostata* др. По сходству таксономического состава диатомовой флоры объекты исследования подразделены на 3 группы: водоёмы на аласе; на едомной возвышенности и на пойме. Группа аласных водоёмов разделилась на 2 уровня (верхний алас и нижний алас). Водоёмы поймы объединены в подгруппы внутриполигональных (I) и межполигональных (II) водоёмов. По эколого-географическим характеристикам в диатомовых комплексах водоёмов преобладают эпифиты (51 %); по отношению к солёности воды – индифференты (63 %); по предпочтениям к рН – ацидофилы (30 %); по географическому распределению равной долей космополитов (39 %) с широким географическим распространением и относительно тепловодных бореальных (34,8 %) форм.

Характер изменения абиотических и биотических параметров в пределах модельного водоема IP-1 указывает на то, что водоёмы полигона Кыталык достаточно быстро реагируют на внешние факторы. Уровень мониторингового водоёма изменяется во взаимосвязи с температурой воздуха и воды. Частые колебания физических и химических характеристик воды оказывают сильное влияние на соотношение экологических групп диатомей.

2) Площадь водного зеркала исследуемых озёр варьирует в широких пределах (от 0,003 до 157 км²), длина котловин – от 0,1 до 28 км, максимальная глубина – от 1,1 до 15 м. Большинство озёр (74 %) обладает очень малой глубиной (<3,12 м). По площади водного зеркала большая часть озёр субарктической тундры отнесены к малым (33 %) и небольшим (44 %), северной тайги – к небольшим (55 %). В лесотундре преобладают средние озёра (62 %). По форме котловины в зоне субарктической тундры (67 %) и лесотундры (85 %) преобладают округлые, в северной тайге – удлинённые озёра (46 %). Степень развития береговой линии всех озёр очень слабая, 93 % объектов по данному параметру отнесены к круглым озёрам. По длине, ширине, максимальной глубине выделяются озёра, расположенные в лесотундре (ледниковые озёра Сутуруоха и Ожогоино). Крупные по размерам, но достаточно мелководные (3,1-15 м), они образуют сильную вариацию выборки по морфометрическим характеристикам. Все озёра субарктической тундры, лесотундры и большинство озёр северной тайги (54 %) характеризуются прозрачной водой. Мутной и средне мутной водой отмечаются водно-эрозионные и эрозионно-

термокарстовые озёра северной тайги, расположенные вблизи населенных пунктов. Водородный показатель озёр варьирует в широких пределах от 4,1 до 8,95. Изученные озёра характеризуются «очень мягкой» (95 %), ультрапресной (100 %) водой. Электропроводность воды варьирует в широких диапазонах (4,7-380,3 мкСм/см), достигая максимальных значений в водно-эрозионных озёрах северной тайги. В целом по озерам преобладают воды класса гидрокарбонатных группы магниевых (50 %). 28 % имели воду класса гидрокарбонатных группы кальциевых; 9 % – гидрокарбонатных группы натриевых. Установлены зональные изменения общей жёсткости, гидрокарбонатов и прозрачности воды. По мере продвижения с юга на север прозрачность увеличивается, а общая жёсткость и концентрация гидрокарбонатов снижаются.

В диатомовой флоре исследованных озёр зарегистрировано 257 видов (в т.ч. 4 разновидности), относящихся к 75 родам, 30 семействам, 15 порядкам, 3 классам Bacillariophyta. Преобладают донные формы (48 %) и обрастатели (43 %), по отношению к рН – алкалифилы (39 %). По предпочтению к солености (так же как и в водоёмах полигона) доминируют индифференты (66 %). По преимущественному ареалу обитания преобладали космополиты (37 %) и бореальные формы (39 %). Наибольшим видовым богатством обладали озёра, расположенные в зоне субарктической тундры (177 видов). Озёра лесотундры (150 видов) и северной тайги (140 видов) характеризуются ощутимо меньшим количеством таксонов. Выявлены закономерные взаимосвязи видового состава, эколого-географических условий, количественных соотношений таксонов диатомовых водорослей исследуемых водных объектов с показателями сапробности, параметрами местоположения и др. характеристиками.

По индексу сапробности водоёмы полигона Кыталык отнесены к категории чистых (II класс качества). Отмечено превышение рыбохозяйственного ПДК общего железа и ионов аммония. Водоёмы находятся на значительном удалении от населённых пунктов и мест выраженного антропогенного воздействия, что позволяет сделать вывод о естественных причинах повышения концентраций указанных компонентов. Исследуемые озёра обладают чистой (57 % озёр, II класс) и умеренно загрязненной (47 %, III класс) водой. Наибольшие значения индекса сапробности отмечены для озёр лесотундры (в среднем 1,56). Большинство озёр субарктической тундры (94 %) и северной тайги (63 %) отнесены ко II классу качества (чистая вода), наибольшая часть водных объектов лесотундры (61 %) принадлежат III классу качества (умеренно-загрязненная вода). Относительно загрязненные участки района расположены вблизи сёл Чокурдах (Аллаиховский район) и Сутуруоха (Абыйский район).

3) С целью обобщения сведений о состоянии водных объектов Якутии создана региональная эколого-лимнологическая классификация озёр Якутии на примере бассейна реки Индигирка. Классификация состоит из 3 параметров (географический, физико-химический и гидробиологический), 18 признаков и 106 показателей. На основе РЭЛК произведена типизация изученных озёр бассейна реки Индигирка с присвоением индивидуальных профилей с формулой каждому водному объекту. Разработанная РЭЛК применима для инвентаризации озёрного фонда и может быть использована для решения задач озёрного природопользования разного уровня. На

основании кластерного анализа индивидуальных паспортов озёр были выявлены 3 преобладающих класса, отличающиеся по генезису озёрной котловины, площади и форме зеркала, химическому типу и сапробности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, определенных ВАК

1. Левина, С.Н. Физико-химические особенности воды полигональных водоемов ресурсного резервата "Кыталык" (бассейн реки Индигирка) / С. Н. Левина, И. В. Ядрихинский, Р. М. Городничев, П. В. Давыдова, Л. А. Пестрякова, И. М. Перепелица, Л. А. Ушницкая // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 9. – С. 64-71. (1,0 / 0,32 п.л.)

2. Левина, С.Н. Качество воды озер Севера Якутии (установленное на основе диатомового анализа) / Р. М. Городничев, Л. А. Пестрякова, И. М. Перепелица И. В. Ядрихинский, Л. А. Ушницкая, С. Н. Левина, П. В. Давыдова // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 2. – С. 70-75. (0,75 / 0,18 п.л.)

3. Левина, С.Н. Морфометрические параметры разнотипных озер севера Якутии / Р. М. Городничев, С. Н. Левина, Л. А. Ушницкая, П. В. Давыдова, Л. А. Пестрякова // *Успехи современного естествознания*. – 2020. – № 1. – С. 18-25. (1,0 / 0,2 п.л.)

4. Левина, С. Н. Оценка современного состояния озер низовья реки Индигирка / С. Н. Левина, П. В. Давыдова, И. А. Баишева // *Региональные геосистемы*. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 168-182. (1,89 / 1,25 п.л.)

Свидетельства о государственной регистрации баз данных:

1. Левина С.Н. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017621008 Российская Федерация. Диатомовые водоросли бассейна реки Анабар : № 2017620743 : заявл. 11.07.2017 : опубл. 07.09.2017 / Л. А. Пестрякова, П. В. Давыдова, Р. М. Городничев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова».

2. Левина С.Н. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621266 Российская Федерация. Разнообразие диатомовых водорослей термокарстовых водоемов бассейна р. Колыма : № 2018620901 : заявл. 29.06.2018 : опубл. 13.08.2018 / Л. А. Пестрякова, Р. М. Городничев, И. М. Перепелица [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова».

3. Левина С.Н. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2018621972 Российская Федерация. Разнообразие водорослей отдела Bacillariophyta термокарстовых водоемов бассейна р. Индигирка : № 2018621767 : заявл. 30.11.2018 : опубл. 06.12.2018 / Л. А. Пестрякова, Р. М. Городничев, И. М. Перепелица [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова».

4. Levina S.N. Freshwater communities and environmental data of a polygonal tundra landscape at the Berelekh River in the Indigirka lowland (NE Siberia) / Schirrmeister, Lutz; Herzsuh, Ulrike; Pestryakova, Luidmila A; Wetterich, Sebastian; Bobrov, Anatoly A; Frolova, Larisa A; Ushnitskaya, Lena A; Levina, Sardana N; Schneider, Andrea; Nigamatzyanova, Gulnara (2022): PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.946887>.

Левина Сардана Николаевна

**Классификация озёр бассейна реки Индигирка
и их современное состояние
(с применением диатомового анализа)**

Специальность: 1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Подписано в печать 23.03.2023 г.
Форма 60x90 1/16
Бумага офсетная. Печать цифровая
Объем: усл. печ. л. 1,5
Тираж 100 экз. Заказ №_____.

Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН.
677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, ИМЗ СО РАН.