

Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска

Я. Б. Легостаева¹, А. А. Руфова²✉

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Академия наук РС (Я), г. Якутск, Российская Федерация

✉ alenaruf@inbox.ru

Аннотация

Проведен ретроспективный анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер г. Якутск (Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары) на основе созданной базы данных, охватывающей период с 1985 по 2021 г. Изучаемые озера преимущественно гидрокарбонатно-натриевые с повышенной минерализацией и умеренно-жесткой водой. В суммарный объем катионов основной вклад вносят Na^+ и Ca^{2+} , анионов – HCO_3^- и Cl^- . Прослеживается снижение минерализации с невысокой достоверностью аппроксимации. Вариации значений жесткости воды напрямую зависят от содержания катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и гидрокарбонатов. Среднее содержание взвешенных веществ значительно выше существующих ПДК_{кб}, изменение концентраций в каждом озере носит индивидуальный характер, наиболее высокая обнаружена в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях. Наиболее значимыми факторами в формировании гидрохимического режима являются минерализация и жесткость воды. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер. Микроэлементный состав характеризуется повышением концентраций Zn и Cu .

Ключевые слова: антропогенное воздействие, озерные экосистемы, городские озера, ретроспективный анализ
Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания АН РС (Я) «Анализ экологической обстановки регионов Якутии, выявление неблагоприятных зон и факторов, отрицательно влияющих на экологическую безопасность» и Государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUEM-2019-0003).

Благодарности. Авторы благодарны академику АН РС (Я), профессору Саввинову Дмитрию Дмитриевичу, безвременно ушедшему из жизни, за поддержку, советы и ценные замечания на начальной стадии исследований.

Для цитирования: Легостаева Я.Б., Руфова А.А. Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):572–591. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591>

Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk

Y. B. Legostaeva¹, A. A. Rufova²✉

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute ,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

✉ alenaruf@inbox.ru

Abstract

A retrospective analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk (Beloe, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kuel, Sergelyakh, Saysary) was carried out in accordance with a registered database covering the period from 1985 to 2021. The studied lakes are mainly sodium bicarbonate with increased mineralization and moderately hard water. The main contribution to the total volume of cations is made by Na^+ and Ca^{2+} , HCO_3^- and Cl^- anions. They also demonstrate a decrease in mineralization with a low value of approximation reliability. The variation of water hardness values directly depends on the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} cations and hydrocarbonates. The average value of suspended materials in the lakes is significantly higher than the existing Maximum Concentration Limit (MCL). The change in their content in each lake is individual, however the highest was found in Beloe, Saysary and Khatyng-Yuryah lakes.

Mineralization and hardness of water are the most significant factors in the formation of the hydrochemical conditions. The established mechanisms are characteristic of the whole sample, which reflects the nature of the formation of the hydrochemical conditions of urban lakes. The trace element composition is characterized by an increase in Zn and Cu concentrations.

Keywords: anthropogenic impact, lake ecosystems, urban lakes, retrospective analysis

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment to the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) on the project “Analysis of the ecological situation in Yakutia, identification of unfavorable zones and factors negatively affecting environmental safety” and the State Assignment to the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (project number FUEM-2019-0003).

Acknowledgements. The authors are grateful to the Full Member of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Professor, Dmitry D. Savvinov, who passed away prematurely, for support, advice and valuable comments when working at the initial stage of the research.

For citation: Legostaeva Y.B., Rufova A.A. Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):572–591. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591>

Введение

Понимание процессов, состава, характера поступления и накопления загрязняющих веществ в озерные экосистемы селитебных территорий в любом уголке Земли весьма актуальны с точки зрения экосистемного риска и рационального природопользования [1, 2]. Озера как в природных ландшафтах, так и в пределах селитебных территорий выполняют множество экологических функций, таких как регулирование и хранение воды, улучшение ее качества, обеспечение среды обитания для животных, регулирование местного климата и обеспечение людей питьевой водой и пищей [3]. Во всем мире, особенно в развивающихся странах, из-за урбанизации, роста населения и промышленного развития огромное экологическое давление оказывается на водную среду озер, что приводит к ее загрязнению и ухудшению экологических функций. Эти процессы с развитием техногенного воздействия закономерно ухудшают качество городских озерных экосистем и на территории столицы одного из крупных регионов РФ – г. Якутск, где городские озера подвергаются сильному заилению, зарастанию и обмелению, что вызывает необходимость организации постоянного мониторинга за качеством гидрохимического состава озерных экосистем. Эти работы требуют ретроспективного анализа различных данных – морфометрических, литологических, гидрохимических, гидробиологических и других, составляющих основу различных информационных баз данных (БД). Такие БД являются инструментом для сбора, систематизации, группировки и хранения материалов, в том числе по химическому составу поверхностных вод.

Мировой опыт доказал эффективность использования ГИС и БД для оценки состояния гидрохимии водоемов и содержания гидробионтов в озерах разных регионов мира [4]. Большинство пресноводных озер имеет многоцелевое использование, включая питьевое водоснабжение, промышленное и сельскохозяйственное производство. В мировой практике разработаны общие базы данных по природным озерам, например, в Канаде, Китае, Польше, Монголии, Белоруссии и др. [5–9]. Авторы приходят к единому мнению, что для изучения и рационального использования озерных экосистем требуется выделение общих и индивидуальных признаков, которые позволили бы определить типы водоемов в зависимости от комплекса объединяющих показателей. Для примера предлагается рассматривать показатели гидрохимического режима водоемов, отражающие особенности протекания в них продукционных процессов и осадконакопления. При этом типизация озер на основании химического состава абиотических и биотических компонентов позволяет усовершенствовать систему их использования и охраны.

В России в каждом регионе зарегистрировано не менее десятка баз данных по данному вопросу [10–12]. Тематика предлагаемых БД обширная – от речных и озерных систем [13–16] до грунтовых вод и искусственных водохранилищ [17, 18]. Анализ существующих публикаций выявил оригинальные структурированные материалы по химической, физической и биологической характеристике водных ресурсов разных регионов РФ. В то же время в каждой работе есть свои индивидуальные особенности, например, определение уровня экологической безопас-

ности, связанной со спецификой социально-экономического развития каждого субъекта.

В Республике Саха (Якутия) зарегистрированы комплексные [19, 20] и частные работы по химическому составу вод [21, 22]. По гидрохимическому составу озер г. Якутск Академией наук РС (Я) и Институтом биологических проблем криолитозоны СО РАН создано три базы данных за 1985–2021, 2009–2016 и 2018–2019 гг. [23, 24].

На сегодня накопилось достаточное количество достоверного фактического материала для ретроспективной научной базы данных химического состава озерных экосистем г. Якутск, которая будет основой для разработки региональной политики по охране и рациональному использованию водно-озерных ресурсов. В настоящей работе приведено описание принципов и методов создания систематизированной базы данных гидрохимического состава наиболее крупных озер г. Якутск, позволяющей оценить эколого-геохимическое состояние и «ценность» каждого водоема.

Методика исследования и фактический материал

История аккумуляции материала. Первые научные данные о водоемах г. Якутск получены экспедицией Переселенческого управления, работавшей в 1909–1914 гг. под руководством академика К.Д. Глинки [25]. Более детальное изучение начинается с 80-х гг. XX в. одновременно несколькими организациями города: отделом охраны природы ЯНЦ СО АН СССР [26], Институтом мерзлотоведения СО РАН [27] и лабораторией озероведения Якутского государственного университета им. М.К. Аммосова [28].

В настоящее время исследованиями озер на территории Якутии и г. Якутск, в частности, занимаются Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН [29, 30], Институт мерзлотоведения СО РАН [31–33], Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера [34] и Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета [35, 36]. Постоянный контроль за состоянием водных ресурсов на территории РС (Я) осуществляет ГБУ РС (Я) «Республиканский информационно-аналитический центр экологического мониторинга» (РИАЦЭМ).

Вся доступная опубликованная информация составляет массив данных, который был проанализирован и сгруппирован по ряду признаков,

первостепенные из них: генетическое происхождение озерных котловин, морфометрические и гидрологические показатели, а также уровень антропогенной нагрузки. В результате выделено пять эталонных озерных экосистем, валидированная информация по которым прослеживается с 1985 г. (табл. 1).

Материал фактического опробования. Объемными исследованиями послужили озера, расположенные в пределах селитебной территории Якутска, – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары, которые имеют природное старичное происхождение, отличаются разной антропогенной нагрузкой в зависимости от местоположения водоема на территории города (рис. 1). В табл. 2 приведена общая морфометрическая характеристика исследуемых озер [35].

С 2009 по 2021 г. проведено гидрохимическое опробование в летний период времени с мая по сентябрь с отбором проб раз в месяц в первую его декаду. Всего отобрано 250 проб поверхностных озерных вод.

Ретроспективный анализ гидрохимического состава озер г. Якутск сделан на основе опубликованных, фондовых и авторских материалов, охватывающих период с 1985 по 2021 г. Осуществлена интеграция данных всех организаций, проводивших исследования городских озерных вод и сопоставимых по методам химического анализа. В общую выборку вошли данные по 786 пробам и 3252 элемент/определения. Из общей выборки 32 % – это непосредственно авторские данные.

Методы химического анализа озерных вод. Химико-аналитические работы проводились в лабораториях НИИПЭС СВФУ им. М.К. Аммосова и ИГАБМ СО РАН. Использованы общепринятые методы исследования поверхностных природных вод на основании утвержденных ГОСТов с определением основных показателей химического состава воды. Анализ контрольных проб проведен в Центральной геологической лаборатории АО «Якутскгеология» (Росгео, АО) (Сертификат соответствия № СДС «УКАРГЕО»RU 0027.21). Оценка состояния водоемов по гидрохимическому составу проведена с использованием классификации О.А. Алекина.

Методы обработки данных. На основе общей выборки из составленных в БД атрибутивных таблиц проведены расчеты фоновых концентраций макро- и микроэлементного состава

Таблица 1

Основные источники данных по гидрохимическому составу озер г. Якутск

Table 1

The main sources of data on the hydrochemical composition of the lakes in Yakutsk

Название / Title	Организация / Institution	Авторы / Authors	Годы исследования / Years of research	Год выпуска / № свидетельства (год регистрации) / Year of issue / No certificate (year of registration)
Фондовые и опубликованные материалы / Archive and published materials				
НИР «Антропогенная динамика природной среды районов городских поселений Центральной Якутии (на примере г. Якутска)»	Отдел охраны природы ЯНЦ СО АН СССР	Анисимова Н.П.	1985–1989	1989
Экогеохимия городских озер Якутска	Институт мерзлотоведения СО РАН	Макаров В.Н., Седельникова А.Л.	1986–2013	2016
НИР «Эколого-лимнологическая паспортизация озер в черте г. Якутска»	Лаборатория озероведения БГФ ЯГУ им. М.К. Аммосова	Жирков И.И., Пестрякова Л.А.	1990–1995	1995
НИР «Трансформация экосистемы в процессе урбанизации территорий распространения многолетнемерзлых пород»	НИИ прикладной экологии Севера СВФУ им. М.К. Аммосова	Ксенофонтова М.И.	2009–2013	2013
НИР «Экологические проблемы северных городов»	Академия наук РС (Я)	Руфова А.А.	2009–2016, 2021	2017
Базы данных / Databases				
Озера Центральной Якутии	Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова	Пестрякова Л.А. и др.	–	2014621709, (2014)
Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в черте г. Якутск	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Габышев В.А., Габышева О.И.	2018–2019	2021622391, (2021)
Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в окрестностях г. Якутск	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Габышев В.А., Габышева О.И.	2018–2019	2021622394 (2021)
Реестр гидрохимического состава озер г. Якутск за 2009–2016 гг.	Академия наук РС (Я)	Руфова А.А.	2009–2016	2022620398 (2021)
Гидрохимический состав озер г. Якутск за 1985–2021 гг.	Академия наук РС (Я)	Легостаева Я.Б., Руфова А.А.	1985–2021	2022622195 (2022)

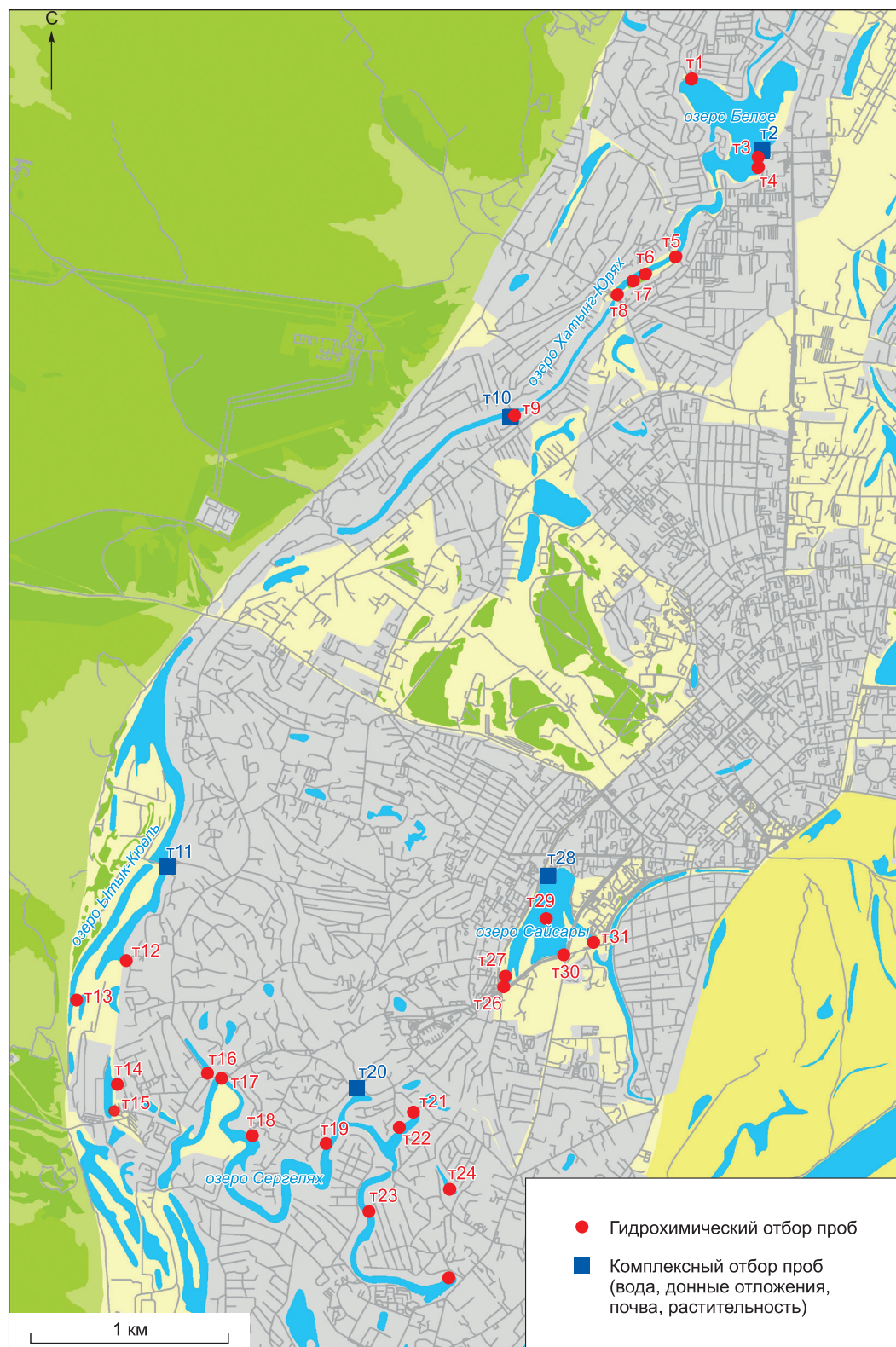


Рис. 1. Карта-схема фактического опробования наиболее крупных озер г. Якутск.

Fig. 1. Map-diagram of the actual sampling of the largest lakes in Yakutsk.

Морфометрическая характеристика озер г. Якутска

Table 2

Morphometric characteristics of the lakes in Yakutsk

Характеристика / Characteristics		Белое / Beloe	Хатынг-Юрях / Khatyng-Yuryakh	Ытык-Кюель / Ytyk-Kyuel	Сергелях / Sergelyakh	Сайсары / Saysary
Площадь зеркала воды, км ²		0,67	0,26	0,89	0,47	0,49
Объем воды, м ²		1,94	0,28	1,34	0,42	1,23
Глубина, м	максимальная	6,5	3,0	2,6	2,0	6,0
	средняя	2,9	1,1	1,5	0,88	2,65
Длина, км	озера	1,3	5,2	5,0	6,0	1,4
	береговой линии	6,7	10,7	6,7	–	5,4
Ширина, км	максимальная	1,28	0,16	0,55	0,15	0,47
	средняя	0,28	0,05	0,17	0,08	0,35

озерных вод методами описательной статистики. Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивалось по методу Колмогорова–Смирнова. В случае отклонения распределения от нормального данные перед статистической обработкой подвергались логарифмическому преобразованию [37, 38]. В результате рассчитанные среднегеометрические значения могут быть приняты за фоновые концентрации для озерных вод Якутска и его окрестностей.

Эколого-геохимическая характеристика озерных вод проводилась на основе расчета коэффициентов концентрации относительно нормативов ПДК для водоемов культурно-бытового назначения ($K_{ПДК}$) и фоновых концентраций (K_k). Учитывались $K_{ПДК}$ и K_k каждого компонента со значениями $>1,5$.

Инструменты обработки данных. Карта-схема фактического опробования построена с помощью программы SAS. Планета 2012.12.10106 Stable и MC Paint 3D. Схемы, диаграммы, графики сделаны в программе MC Excel. Описательная статистика выполнена в программе Statistica 10.

Результаты исследований

Обзор и принципы построения БД. С каждым годом накапливается огромное количество материалов и данных, которые сгруппированы и систематизированы в базы данных. Первая зарегистрированная БД по озерам Центральной Якутии, подготовленная сотрудниками Северо-Восточного федерального университета, вышла в 2014 г. БД содержит систематизированные сведения по озерам Центральной Якутии: географические, морфометрические, гидрологические

и гидрохимические показатели [19]. В информационный массив включены данные о 181 озерах, находящихся на территории шести районов Центральной Якутии: Чурапчинского, Мегинского, Кангаласского, Намского, Таттинского, Амгинского и Усть-Алданского. В выборку исследованных водоемов были включены озера, наиболее вовлеченные в хозяйственный оборот населения региона. В этой БД отсутствуют сведения о гидрохимическом составе озер, расположенных на территории г. Якутск.

В 2021 г. зарегистрирована база данных по гидрохимическому составу озер в черте г. Якутск, подготовленная сотрудниками Института биологических проблем криолитозоны СО РАН [23]. База данных содержит оригинальные материалы по показателям химического состава вод озер в совокупности с показателями качества воды за 2018–2019 гг. Также выявлены индекс и степень загрязненности воды.

В том же году вышла база данных «Реестр гидрохимического состава озер г. Якутска за 2009–2016 гг.» Академии наук РС (Я) [24], где сгруппированы показатели многолетнего режимного наблюдения за вариациями макро- и микроэлементного состава озерных вод. База включает характеристики пяти озер – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары. В общую выборку вошли данные по 195 пробам и 5265 элемент/определению.

В 2022 г. зарегистрирована ретроспективная база данных гидрохимического состава озер г. Якутск за 1985–2021 гг. [39], которая разрабатывалась с учетом основных научных прин-

ципов: достоверности, историчности, системности, открытости и верификации [40, 41].

Можно выделить следующие основные положения принципов формирования БД:

1. Принцип фундаментальности и практичности. База данных составлена на основе фундаментальных и прикладных исследований. Может использоваться для информационного обеспечения научных исследований, позволяя анализировать и оценивать динамику изменения химического состава и качества воды озер, прогнозировать возможные изменения их состояния.

2. Принцип достоверности. База данных разработана на фактических данных, основанных на многолетнем исследовании о состоянии химического состава озерных экосистем. Впервые проведен ретроспективный анализ.

3. Принцип развития, историчности и современности. При составлении базы данных использовались фондовые и опубликованные материалы, охватывающие период с 1985 по 2021 г.

4. Принцип системности и комплексности. Озерная экосистема рассматривалась наряду с окружающей природной средой как целостная и развивающаяся система, закономерно связанная с факторами формирования химического состава озер.

5. Принцип открытости. База данных может развиваться и продолжаться. Для получения новых знаний будущие исследования можно будет продолжить в соответствии с той же структурой и содержанием базы данных.

6. Принцип верификации. Информация и материалы, заложенные в БД, проверяемы на истинность и достоверность. При этом в работе учтена сопоставимость методов химического анализа.

Ключевым этапом работы является разработка структуры базы данных, содержащей описательную и ретроспективную характеристику химического состава озер г. Якутск. Структура БД разработана по иерархической схеме соподчинения и включает объект исследования, учреждения (исполнители), период и источник исследования (рис. 2). Во вводной части дается определение объекта исследования, которые представляет собой отдельную единицу, в данном случае – озеро. Следующий блок – учреждения или организация-исполнитель, определяющие тему и задачи научных исследований.

Далее – период проведения исследований, определяющий объем работы. Замыкающее звено – источники научной информации, которые

делятся на фондовые, опубликованные и авторские материалы. Вместе с тем, могут быть использованы материалы, одновременно являющиеся фондовыми и опубликованными.

В БД отражены количественные и качественные характеристики: химические показатели, шифр методики исследования, количество проб и дата исследования. Характеристика гидрохимического состава озерных вод состоит из органолептических, физических и химических показателей, которые описывают содержание катионов, анионов, микроэлементов, а также органических показателей.

База данных гидрохимического состава озер г. Якутск является основой для проведения ретроспективного анализа и рационального использования городских озерных экосистем. БД предполагается расширять и совершенствовать, в частности, трансформировать в открытый для всеобщего доступа формат. Сделать более удобной для анализа и управления данными кадастровой оценки озерных экосистем, определения оптимального направления их рационального использования и контроля над их функционированием в условиях различной степени антропогенной нагрузки.

Ретроспективный анализ гидрохимического состава озерных вод. В последние годы при оценке состояния водных систем, в том числе и озерных, широко изучались обычные индикаторы загрязнения воды, включая эвтрофикацию, тяжелые металлы и органические загрязнители. На основе полученных данных сделан вывод, что озера Якутска характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом, повышенной минерализацией и умеренно-жесткой водой (табл. 3).

В целом для озерных вод суммарный объем катионов $128,41 \text{ мг/дм}^3$, основной вклад вносят Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Сумма анионов составляет $328,30 \text{ мг/дм}^3$ с доминированием HCO_3^- и Cl^- . Значительные колебания гидрохимических показателей, в том числе содержания HCO_3^- и Cl^- , в значительной степени связаны с проточностью городских озер. Озера подпитывались через малые реки, такие как Шестаковка и Мархинка, от основной водной артерии – р. Лена. Обычно в речной воде содержание HCO_3^- и Cl^- бывает в разы больше, чем в озерной [42]. И в годы, когда осуществлялось зарегулирование большого и малого колец городских озер, их пополнение за счет речного стока вносило существенное изме-

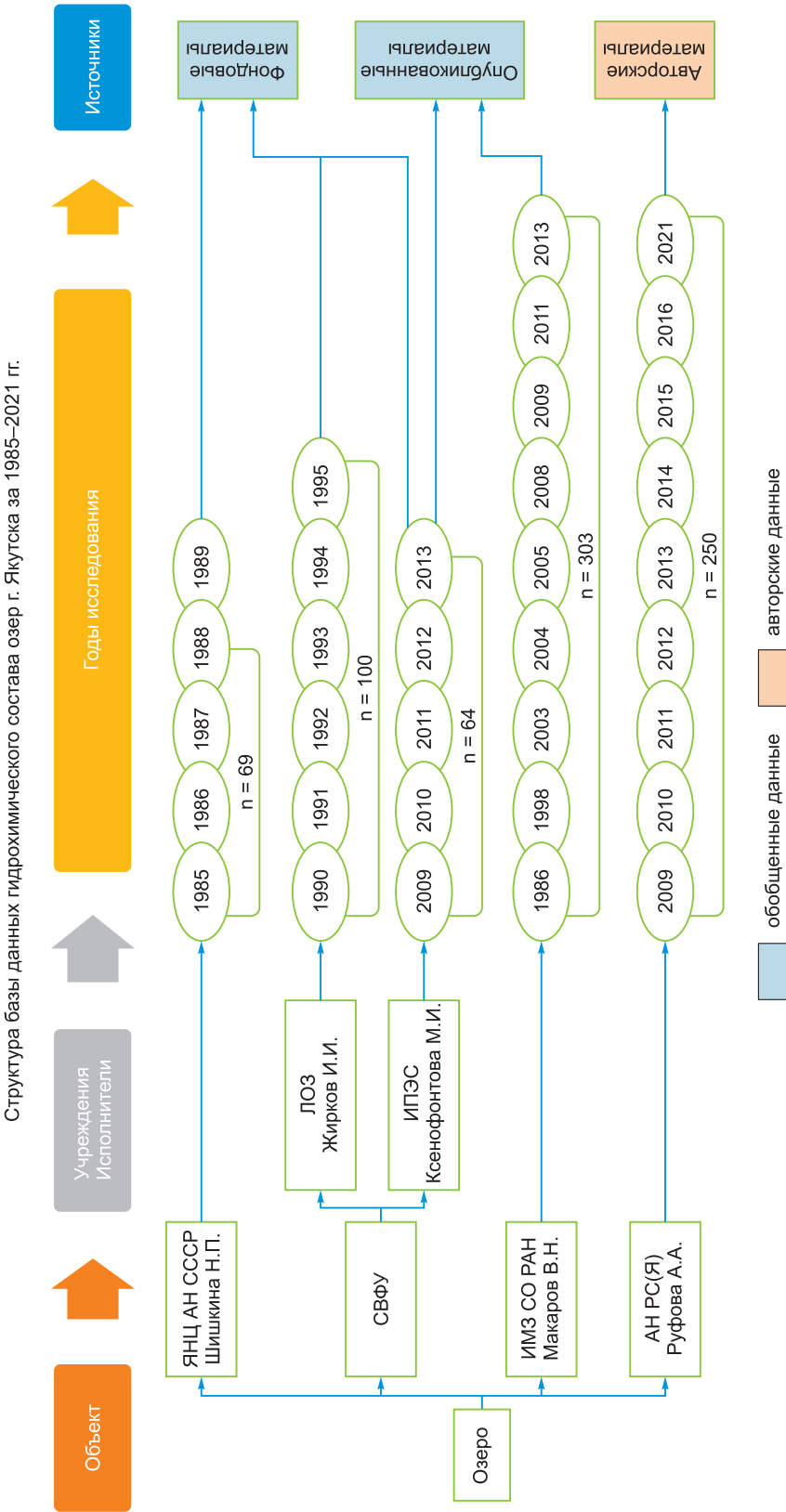


Рис. 2. Структура базы данных
Fig. 2. Database structure

Таблица 3

Усредненная гидрохимическая характеристика озерных вод г. Якутск

Table 3

Averaged hydrochemical characteristics of the lake water in Yakutsk

Показатель, ед. изм. / Indicator, unit of measurement	Количество проб, n / Number of samples, n	Белое, n = 112 / Beloe	Хатынг- Юрях n = 148 / Khatyng- Yuryakh	Ытык- Кюель n = 121 / Ytyk- Kyuel	Сергелях n = 256 / Sergelyakh	Сайсары n = 149 / Saysary	Среднее геометрическое / max-min / Geometric average / max-min	ПДКкб *К _{ПДК} MCL K _{MCL}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	651	8,37	7,93	7,84	8,08	8,34	<u>8,11</u> 9,36–6,9	–
Жесткость, мг-экв/л	786	4,30	4,13	3,58	3,27	4,04	<u>3,84</u> 9,25–1,30	<u>7,00</u> 0,55
Минерализация, мг/дм ³	786	527,10	428,12	368,93	308,95	478,74	<u>415,03</u> 1467,11–153,9	<u>1000</u> 0,415
Взвешенные вещества, мг/ дм ³	69	14,39	7,27	14,65	6,41	6,06	<u>8,23</u> 17,32–4,82	<u>0,75</u> 10,97
Ca ²⁺ , мг/ дм ³	786	26,54	32,58	28,57	25,44	27,43	<u>28,01</u> 106,2–5,2	<u>40</u> 0,7
Mg ²⁺ , мг/ дм ³	786	33,00	25,38	20,84	21,21	30,30	<u>25,70</u> 78,1–5,54	<u>50,0</u> 0,51
Na ⁺ , мг/ дм ³	786	99,56	72,43	49,68	47,42	77,61	<u>66,68</u> 375,0–12,0	<u>200</u> 0,33
K ⁺ , мг/ дм ³	786	11,59	8,55	4,77	5,84	6,51	<u>7,09</u> 68,4–1,32	–
NH ₄ ⁺ , мг/ дм ³	786	0,98	0,76	0,44	0,35	0,63	<u>0,59</u> 30,55–0,05	<u>1,50</u> 0,39
Ba ²⁺ , мг/ дм ³	303	0,02	0,03	0,23	0,02	0,002	<u>0,02</u> 0,51–0,02	<u>0,7</u> 0,03
Si ²⁺ , мг/ дм ³	651	0,17	0,20	0,20	0,15	0,26	<u>0,19</u> 0,3–0,01	<u>7</u> 0,03
Li ⁺ , мг/ дм ³	283	0,03	0,02	0,02	0,02	нпо	<u>0,02</u> 0,24–0,0003	<u>0,03</u> 0,67
HCO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	786	260,37	264,80	272,79	203,33	262,25	<u>251,33</u> 1025,78–37,91	–
Cl ⁻ , мг/ дм ³	786	85,69	76,71	30,62	32,26	83,82	<u>55,87</u> 428,5–1,14	<u>350</u> 0,16
NO ₂ ⁻ , мг/ дм ³	786	0,23	0,04	0,04	0,03	0,13	<u>0,07</u> 3,42–0,001	<u>3,3</u> 0,02
SO ₄ ²⁻ , мг/ дм ³	786	29,49	19,59	16,88	14,07	21,11	<u>19,61</u> 154,2–0,6	<u>500</u> 0,04
NO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	786	0,97	0,21	1,56	0,13	1,16	<u>0,54</u> 25,2–0,01	<u>45,0</u> 0,01
PO ₄ ³⁻ , мг/ дм ³	786	0,78	0,49	0,75	0,33	0,44	<u>0,53</u> 3,88–0,08	<u>3,50</u> 0,15
F ⁻ , мг/ дм ³	651	0,40	0,31	0,51	0,25	0,31	<u>0,35</u> 3,89–0,01	<u>1,50</u> 0,23
Fe _{общ} , мг/ дм ³	483	0,34	0,27	0,81	0,27	0,39	<u>0,38</u> 2,55–0,035	<u>0,30</u> 1,27

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pb, мг/ дм ³	283	0,004	нпо	0,02	0,01	0,004	<u>0,007</u> 0,03–0,002	<u>0,01</u> 0,70
Ni, мг/ дм ³	283	нпо	0,003	нпо	нпо	нпо	<u>0,003</u> 0,003–0,003	<u>0,02</u> 0,15
Mn, мг/ дм ³	283	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	<u>0,02</u> 0,12–0,01	<u>0,1</u> 0,2
Co, мг/ дм ³	283	нпо	нпо	нпо	0,0005	0,0008	<u>0,0006</u> 0,0008–0,0005	<u>0,100</u> 0,006
Cr, мг/ дм ³	313	0,001	0,0005	0,0004	0,0003	0,0004	<u>0,0005</u> 0,01–0,0001	<u>0,5</u> 0,001
Cu, мг/ дм ³	313	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	<u>0,001</u> 0,05–0,0001	<u>1,000</u> 0,001
Zn, мг/ дм ³	283	0,08	0,04	0,04	0,02	0,12	<u>0,07</u> 0,42–0,01	<u>1,00</u> 0,07
As, мг/ дм ³	283	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,01
Hg, мг/ дм ³	68	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,0005
Mo, мг/ дм ³	353	0,0007	0,0005	0,0005	0,0002	0,0004	<u>0,0004</u> 0,002–0,0001	<u>0,250</u> 0,002
Нефтепродукты, мг/ дм ³	548	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	<u>0,02</u> 0,123–0,001	<u>0,30</u> 0,07
Фенолы, мг/ дм ³	518	0,0006	0,0008	нпо	нпо	0,0008	<u>0,0007</u> 0,0008–0,0006	<u>0,001</u> 0,700
АПАВ, мг/ дм ³	518	0,002	0,002	нпо	0,001	0,003	<u>0,002</u> 0,003–0,002	<u>0,500</u> 0,004

Примечание. нпо – ниже предела обнаружения анализа; *K_{ПДК} – рассчитан как отношение среднегеометрического значения к нормативам ПДК культурно-бытового назначения [45, 49, 50].

Note. нпо – below limit of detection; *K_{MCL} – calculated as the ratio of the geometric average value to the MCL standards [45, 49, 50].

нение в гидрохимический состав озерных вод. Ретроспективный анализ показал, что с середины 90-х гг. XX в. в наиболее крупных озерах Якутска отмечается уменьшение содержания основных катионов и анионов в воде и это, соответственно, приводит к снижению суммы минеральных веществ.

За весь период наблюдений прослеживается тенденция снижения минерализации озерных вод с невысокой величиной достоверности аппроксимации, что, на наш взгляд, не вполне закономерно при увеличивающемся антропогенном прессе на озерные экосистемы в пределах селитебной территории (рис. 3, а). В отдельные годы отмечаются пики с максимальным значением – 1987 и 2004 гг. – 820,03 и 770,87 мг/дм³ соответственно. Повышение минерализации в эти годы происходит за счет ее увеличения в водах

озер Сайсары (1467,11 мг/дм³) и Ытык-Кюель (1295,00 мг/дм³).

Реакция водной среды (рН) исследуемых озер в основном слабощелочная (рис. 3, б). Максимальное увеличение щелочности озерных вод наблюдалось в 2002 и 2003 гг., в это время средняя величина рН достигала 8,7 и 8,8. Повышение рН, возможно, связано с небольшим количеством атмосферных осадков в предыдущие годы (180–190 мм в 2001 и 2002 гг.) и, соответственно, с малым поступлением ионов водорода [27].

Выявлена относительно слабая зависимость минерализации от рН, описанная при помощи робастной регрессии (рис. 4). Повышенная минерализация воды в озерах в отдельные периоды исследования могла способствовать большому разбросу данных [43]. Тем не менее, несмотря на существование экстремальных значений ми-

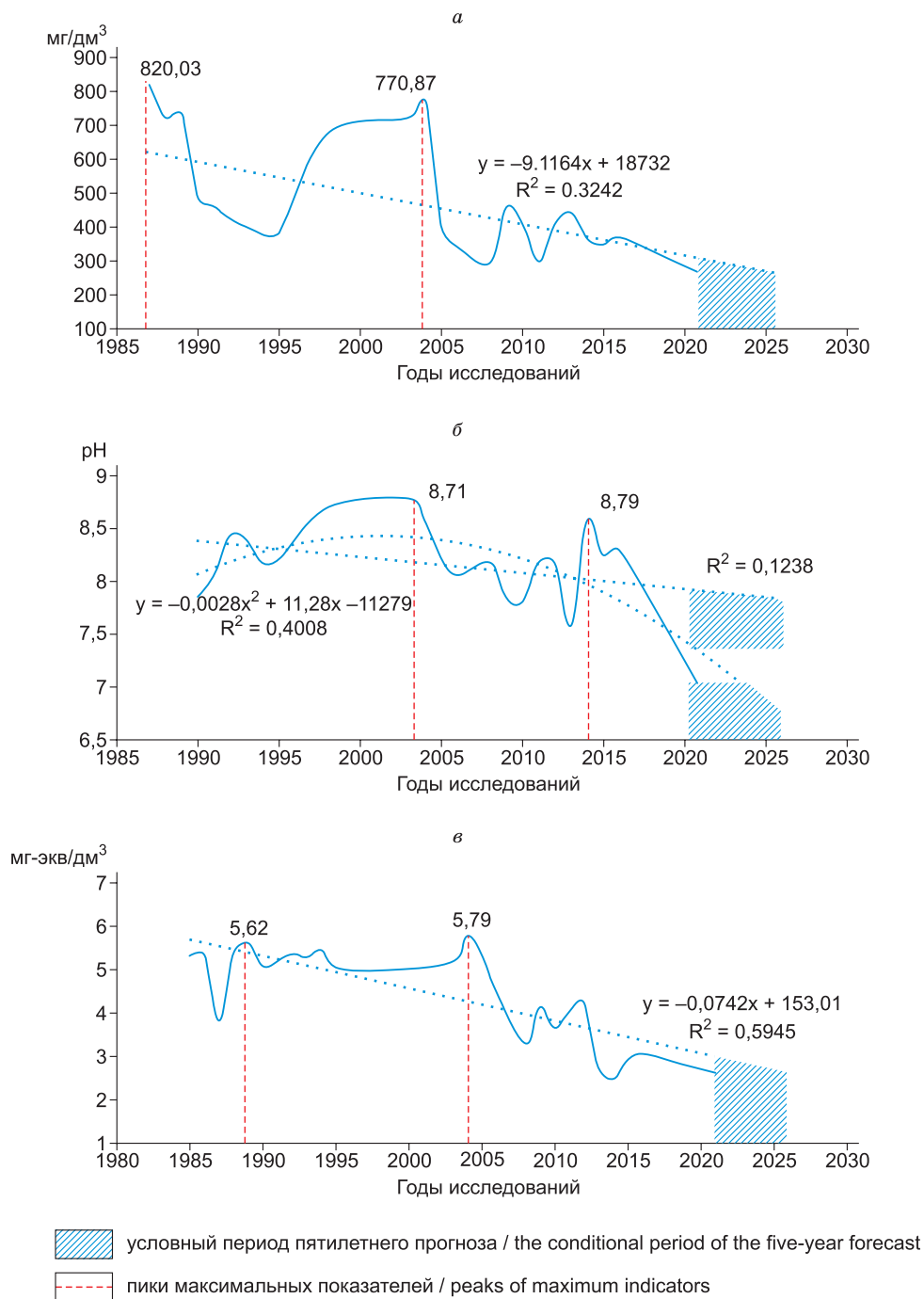


Рис. 3. Многолетняя динамика изменения показателей минерализации (а), pH (б) и жесткости (в) в озерных водах г. Якутск.

Fig. 3. Long-term dynamics of changes in mineralization (а), pH (б) and hardness (в) in lake water in Yakutsk.

нерализации, группируемых по pH ближе к нейтральной (6,9–7,7) и слабощелочной (7,9–8,7), основная выборка подчиняется законам линейного распределения [44] и характеризует озерные воды Якутска как средминерализованные и слабощелочные.

По величине общей жесткости воды озера являются умеренно-жесткими с вариациями значений от 2,48 до 5,79 мг-экв/дм³ (рис. 3, в).

Резкие колебания отмечаются в конце 1980-х гг. и в середине 2000-х гг., в остальное время показатель колеблется в достаточно узком диапа-

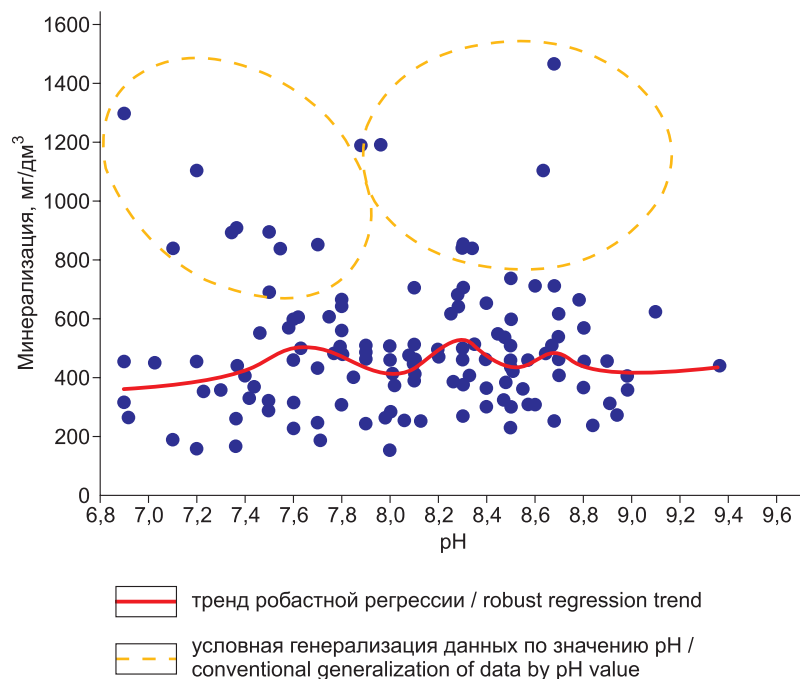


Рис. 4. Зависимость минерализации и pH в озерных водах г. Якутск.

Fig. 4. Dependence of mineralization and pH in lake water in Yakutsk.

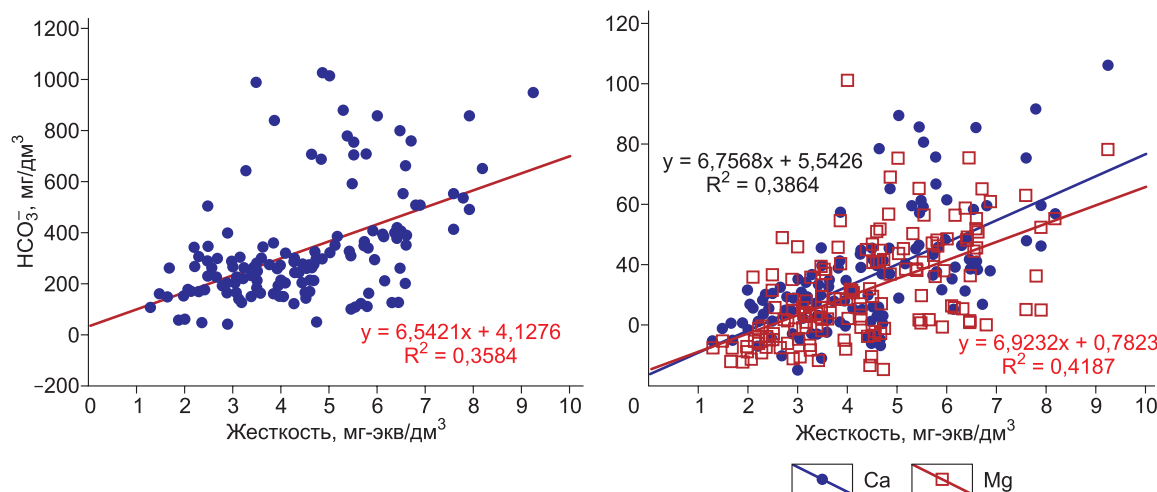


Рис. 5. Зависимость содержания HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} от жесткости воды озер г. Якутск.

Fig. 5. Dependence of HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} content on the water hardness of the lakes in Yakutsk.

зоне, достоверность подтверждается относительно невысокой величиной аппроксимации ($R^2 = 0,6$). Озерная вода обычно имеет меньшую жесткость, чем речная, поскольку она разбавляется в значительной степени атмосферными осадками и талыми водами, которые, как правило, бывают более мягкими [35, 42]. Общеизвестно, что вариация значений жесткости воды напрямую зависит от содержания основных ка-

тионов, в частности Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также гидрокарбонатов (рис. 5).

Наибольшее влияние на уровень жесткости озерных вод оказывает количество катионов Ca^{2+} , несколько в меньшей степени – Mg^{2+} . Анионы HCO_3^- также оказывают влияние на жесткость воды, однако их вклад значительно меньше.

Взвешенные вещества – это один из уникальных интегральных показателей состояния по-

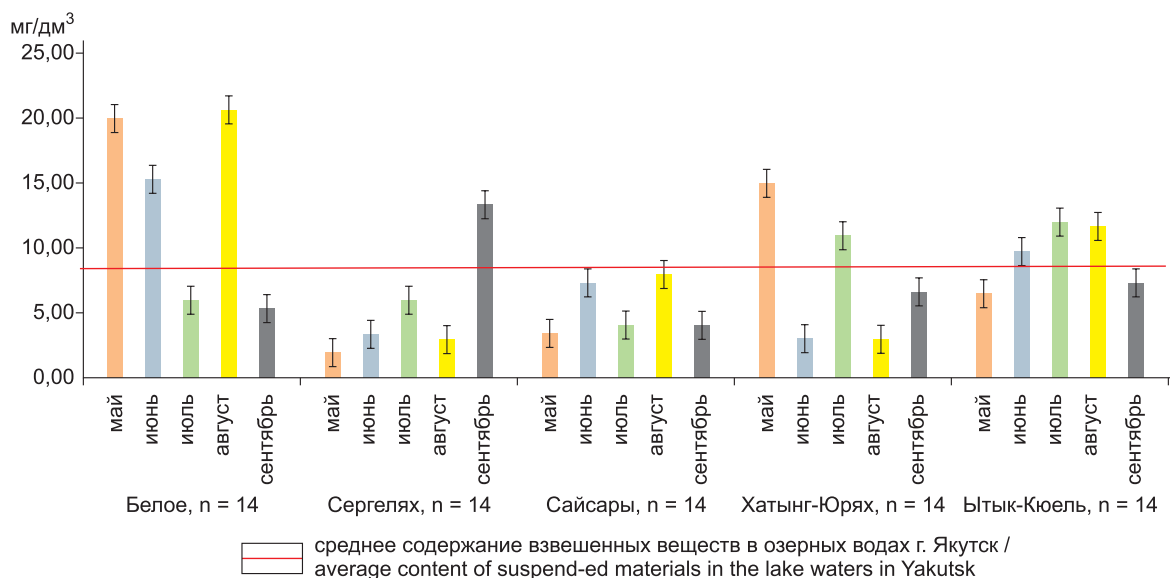


Рис. 6. Динамика изменения содержания взвешенных веществ в воде озер г. Якутск за теплый период времени.

Fig. 6. Dynamics of changes in the content of suspended materials in the water of the lakes in Yakutsk over a warm period of time.

верхностных вод, которые находятся в воде в твердом состоянии и включают в себя глиняные частички, песок, ил, суспендированные частицы, имеющие органическое и неорганическое происхождение. Оценка состояния взвешенных веществ в озерах г. Якутск приведена на основании анализа изменений содержания взвешенных веществ за теплый период времени (рис. 6). На вариации содержания взвешенных веществ влияют различные факторы: смена сезонов года, поступление сточных вод с поверхности, таяние снега, запыленность территории. Среднее геометрическое значение содержания взвешенных веществ, которое можно принять за условно фоновое, равно $8,23 \text{ мг/дм}^3$, что значительно выше существующих ПДК для водных объектов культурно-бытового назначения. Согласно СанПиН, в водных объектах рыбохозяйственного значения при содержании в межень более 30 мг/дм^3 природных взвешенных веществ допускается увеличение содержания их в воде в пределах 5 %. Наиболее высокое содержание взвешенных веществ обнаружено в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях.

Изменения содержания взвешенных веществ в каждом озере носят индивидуальный характер, но ни в одном водоеме колебания значений не носили линейный характер. Это значит, что нарушены природные закономерности, когда, например, относительно высокие содержания взвешенных веществ фиксируются в период весенне-летнего

и осеннего половодья, а далее наблюдается закономерный спад.

В табл. 4 приведена система уравнений, позволяющая описывать вариации содержания взвешенного вещества в исследуемых озерных водах в теплый период времени. Функции основного тренда относятся к полиномиальному типу распределения, который не меняется на всех исследуемых площадках. На основе анализа достоверности аппроксимации выявлены трансформационные изменения гидрохимического режима озерных вод.

Прослеживается зависимость содержания взвешенных веществ от концентрации общего железа, описываемая полиномиальной функцией (рис. 7).

Анализ данных на основе ковариационной матрицы позволил сократить число переменных, описывающих гидрохимический состав озерных вод, с 25 до 13, среди них проведена классификация взаимосвязей на основе величины коэффициентов переменных (табл. 5). Ведущими факторами являются жесткость и минерализация, основные катионы (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) и анионы (SO_4^{2-} и Cl^-). В качестве подчиненного фактора выступают взвешенные вещества и ион F^- .

Основным результативным признаком при учете вариаций гидрохимического состава озерных вод являются основные ионы в следующей последовательности: Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Cl^- и K^+ . Значимая доля в факторном анализе при-

Таблица 4

**Критерии состояния озерных вод по характеру содержания взвешенных веществ
на основе метода экспоненциального сглаживания [45]**

Table 4

**Criteria for the state of lake water by the nature of the content of suspended materials
based on the exponential smoothing method [45]**

Название озера, количество проб (n) / Lake, number of samples (n)	Функция основного тренда, величина достоверности аппроксимации (R) / The function of the main trend, the value of the accuracy of the approximation (R)	Состояние водоема по характеру содержания взвешенных веществ / The state of the reservoir by the nature of the content of suspended materials
Ытык-Кюель, n = 14	$y = -1,2619x^2 + 7,9381x - 0,5$ $R^2 = 0,9592$	Слабая трансформация, условия близкие к природным
Сергелях, n = 14	$y = 0,881x^2 - 3,0524x + 5$ $R^2 = 0,7163$	
Хатынг-Юрях, n = 14	$y = 1,0952x^2 - 8,2381x + 20,4$ $R^2 = 0,4073$	Средняя трансформация
Сайсары, n = 14	$y = -0,5952x^2 + 3,7381x + 0,7$ $R^2 = 0,2906$	Сильная трансформация
Белое, n = 14	$y = 0,1905x^2 - 3,5429x + 22$ $R^2 = 0,2642$	

надлежит минерализации и жесткости воды. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер. Оставшиеся можно отнести в группу случайных факторов.

Анализ микроэлементного состава озерных вод выявил наличие водорастворимых форм Ni, Mn, Co, Cr, Zn, Cu, Fe_{общ} и Mo. В отдельные годы наблюдается снижение содержания некоторых микроэлементов. За все время наблюдений As и Hg в озерных водах не зафиксировано. При рассмотрении микроэлементов как факторов загрязнения озерных вод фиксируются повышенные концентрации Fe–Cr–Cu–Mo–Zn. Распределение их носит неравномерный характер, подчеркивающий индивидуальность каждого рассматриваемого озера. Но даже по анализу средних значений проявляется отражение природных факторов в формировании микроэлементного состава озерных вод – доминирование элементов группы железа, а также меди и цинка, привносимые в озера с почвенным материалом или пылью (рис. 8).

Обсуждение

Путем обобщения опубликованных, фондовых и авторских материалов разработана база данных гидрохимического состава наиболее круп-

ных озер г. Якутск, которая позволяет представить комплексную оценку и динамику химического состояния озерных вод. Гидрохимический режим городских озер Якутска формируется под влиянием природных факторов, вместе с тем увеличение антропогенного воздействия привносит свои изменения в химический состав поверхностных вод.

Противоречивые результаты отмечаются по многолетней динамике изменения показателей минерализации озерных вод. В целом прослежи-

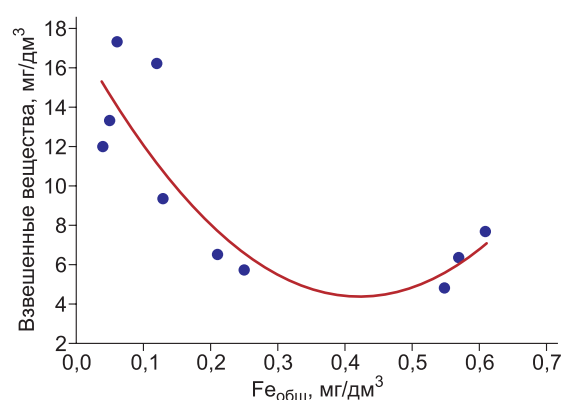


Рис. 7. Зависимость содержания взвешенных веществ и общего железа в озерных водах г. Якутск.

Fig. 7. Dependence of the content of suspended materials and total iron in the lakes in Yakutsk.

Таблица 5

Однофакторный анализ гидрохимического состава наиболее крупных озер г. Якутск

Table 5

One-factor analysis of the hydrochemical composition of the largest lakes in Yakutsk

Показатели / Indicators	Фактор 1 / Factor 1	Фактор 2 / Factor 2	Фактор 3 / Factor 3
Интегральные показатели состояния / Integral state indicators			
pH	0,697	–0,266	–0,659
Жесткость	0,946	0,031	0,265
Минерализация	0,966	0,115	–0,042
Взвешенные вещества	0,227	0,917	–0,026
Фактор ионного состава / Ionic composition factor			
Ca ²⁺	0,099	–0,020	0,966
Mg ²⁺	0,953	–0,086	–0,246
Na ⁺	0,998	–0,020	–0,058
K ⁺	0,903	–0,085	0,080
NH ₄ ⁺	0,973	0,044	0,188
Ba ²⁺	–0,488	0,845	0,209
Sr ²⁺	–0,047	–0,066	0,129
HCO ₃ [–]	0,468	0,590	0,437
Cl [–]	0,919	–0,266	0,099
NO ₂ [–]	0,887	0,164	–0,427
SO ₄ ^{2–}	0,966	0,207	–0,119
NO ₃ [–]	0,115	0,827	–0,265
PO ₄ ^{3–}	0,419	0,888	0,076
F [–]	0,039	0,992	0,107
Фактор загрязнения металлами / Metal pollution factor			
Fe _{общ}	–0,367	0,886	0,010
Mn	0,018	0,385	–0,919
Cr	0,866	0,283	–0,061
Cu	–0,293	0,404	0,862
Zn	–0,258	–0,611	–0,746
Mo	0,780	0,566	0,2442
Фактор органического загрязнения / Organic pollution factor			
Суммарные нефтепродукты	0,069	0,297	0,553
Оценка статистической значимости / Assessment of statistical significance			
Общая дисперсия	10,908	6,574	4,609
Вклад в суммарную дисперсию, %	44,42	28,89	16,95

вается тенденция снижения минерализации, что не вполне закономерно при увеличении антропогенного пресса на озерные экосистемы. К по-

добным выводам пришли и сотрудники ИМЗ СО РАН, отмечающие, что на протяжении последних лет идет понижение величины минерализа-

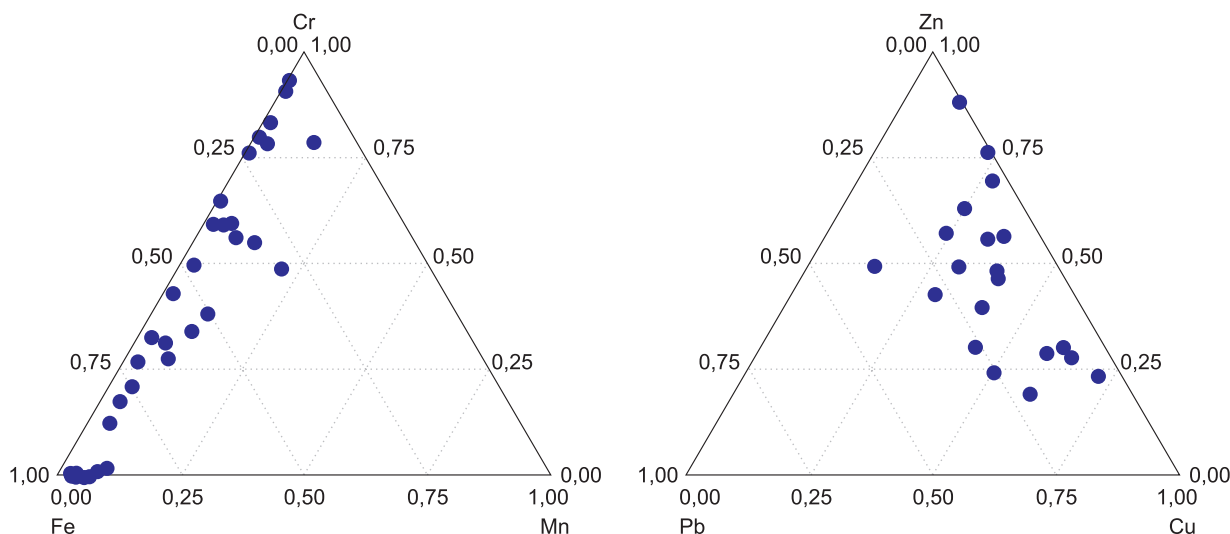


Рис. 8. Характеристика озерных вод г. Якутск по содержанию микроэлементов.

Fig. 8. Characteristics of lake water in Yakutsk by the content of trace elements.

ции вод в озерах Якутска [27]. Для сравнения, например, в Мурманске и Новосибирске установлено увеличение минерализации в водах городских озер, что связывают в том числе и с использованием реагентов противогололедной обработки дорожных покрытий [46, 47]. В Якутске в качестве противогололедного материала используют смесь из крупного песка и мелкого гравия, что, безусловно, более благоприятно для общей экологической обстановки и не приводит, например, к повышению засоления городских грунтов. В то же время, эта смесь увеличивает степень запыленности города в теплый период времени, когда песчано-гравийный материал скапливается по обочинам улиц.

Весомую роль в формировании химического состава озерных экосистем играет степень проточности водоема. В настоящее время проточность городских озер нарушена. С 2015 г. администрацией г. Якутск предпринимаются попытки по восстановлению проточности городской озерной системы. Эта проблема также не уникальна и с ней сталкиваются все коммунальные службы в разных регионах РФ [48].

В целом, микроэлементный состав озерных вод г. Якутск соответствует следующей схеме: $Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Mo$. Наиболее часто встречающимися и вносящими вклад в загрязнение озерных экосистем являются Fe, Zn, Mn и Cu. Исследованиями сотрудников ИБПК СО РАН выявлено, что повышенная концентрация Zn и

Cu вызывает сокращение общей численности фитопланктона, его видового богатства, а также влияет на изменение в составе доминирующих видов, когда доминанты из цианопрокариот замещаются представителями диатомовых водорослей [29]. Подтверждена перспективность изучения влияния ионов тяжелых металлов на живые компоненты водной экосистемы городских озер Якутска, а также пригодность фитопланктона в качестве тест-объекта для таких исследований.

Основными загрязнителями, осложняющими эколого-геохимическое состояние озерных вод Якутска, являются взвешенные вещества, $Fe_{\text{общ}}$ и Pb. В наиболее крупных озерах города зафиксировано загрязнение вод, характеризующееся аномально высокими содержаниями взвешенных веществ (превышение ПДК_{кб} от 8 до 20 раз на всех исследуемых площадках), что соответствует сильному загрязнению с высоким риском. Легкое загрязнение с низким риском по $Fe_{\text{общ}}$ отмечается на озерах Ытык-Кюель, Белое и Сайсары. Такая же степень загрязнения по Pb наблюдается на оз. Ытык-Кюель. Остальные водоемы – Хатынг-Юрях и Сайсары на данный момент можно отнести к незагрязненным.

Приведенные примеры показывают, что даже предварительный ретроспективный анализ имеющихся результатов наблюдений озерных вод позволяет установить тенденции изменения качества воды. Дальнейший анализ и статистическая

обработка рядов наблюдений гидрологических и гидрохимических характеристик позволят дать более точную оценку тенденций изменения качества воды, роли различных факторов и выполнить прогноз на ближайшую перспективу.

Заключение

Созданная база данных городских озер является удобным инструментом для сбора, систематизации, группировки и хранения материалов, что проиллюстрировано на примере детального изучения гидрохимического состава наиболее крупных водоемов г. Якутск.

Воды изученных озер преимущественно гидрокарбонатно-натриевые с повышенной минерализацией, по величине общей жесткости – умеренно-жесткие. В суммарный объем ионного состава воды основной вклад вносят Na^+ и Ca^{2+} , HCO_3^- и Cl^- . Отмечены повышенные концентрации взвешенных веществ, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и Pb.

Выводы сделаны на основе многолетних исследований, проводимых ведущими организациями республики. В результате проведенной описательной статистики рассчитаны средние значения основных показателей качества озерных вод городских территорий, которые могут быть основой для дальнейшего гидрогеохимического мониторинга озерных систем г. Якутск.

Список литературы / References

1. Noori R. et al. Hyper-Nutrient Enrichment status in the Sabalan Lake. *Water*. 2021;13:28–44.
2. Mollo V.M. et al. Evaluation of surface water quality using various indices for heavy metals in Sasolburg, South Africa. *Water*. 2022;14:23–75.
3. He S. et al. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of contaminants in Baiyangdian Lake. *Water*. 2022;14:33–52.
4. Мэйдмент Д.Р. ГИС для водных ресурсов. М.: Arc Hydro; 2002. 45 с.
[Maidment D.R. GIS for water resources. M.: Arc Hydro; 2002. 45 p.]
5. Lakes. Atlas of Canada. Natural Resources Canada. Archived from the original on. 2. Ottawa: ABC; 2007.
6. Wang S.M., Du S.M. Lakes in China. Beijing: Acad. Sci. Press; 1998.
7. Atlas Jezior Polski Poznan: Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Warsaw: Press; 1999.
8. Якушко О.Ф. Озера Белоруссии. Минск: Урожай; 1988. 216 с.
[Yakushko O.F. Lakes of Belarus. Minsk: Uroday, 1988. 216 p. (In Russ.)]

9. Tzerensodnom Zh. Catalogue of Mongolian Lake. Ulan Bator: Mongolian Acad. Sci. Publ., 2000.

10. Гидрохимические показатели водных объектов района Костомукши. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39295580>.

[Hydrochemical indicators of water bodies in the Kostomuksha region. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39295580>. (In Russ.)].

11. Экологический мониторинг гипергалинных водоемов Калмыкии. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39302557>.

[Ecological monitoring of hyperhaline reservoirs in Kalmykia. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39302557>. (In Russ.)].

12. Гидроминеральные ресурсы республики Тыва: химический и геохимический состав. 2021 Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47433710>.

[Hydromineral resources of the Republic of Tyva: chemical and geochemical composition. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47433710>. (In Russ.)].

13. База данных элементного состава вод нижнего течения р. Дон и рек бассейна западного Приазовья. 2020. Доступно: https://elibrary.ru/query_results.asp.

[Database of the composition of the waters of the lower reaches of the river. Don and rivers of the western Azov basin. Available: https://elibrary.ru/query_results.asp. (In Russ.)].

14. База данных: химический состав воды рек арктической зоны России» (архивные данные 1941–1975 гг.). Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42498828>.

[Database: the chemical composition of the rivers of the Arctic zone of Russia» (archival data 1941–1975). 2019. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42498828>. (In Russ.)].

15. База данных значений показателей состава и свойств воды южной и средней части озера Байкал за 2019 год. 2020. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44241866>.

[Database of values of indicators of the composition and properties of water in the southern and middle parts of Lake Baikal for 2019. 2020. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44241866>. (In Russ.)].

16. База данных по соленым озерам юга европейской территории России. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39314119>.

[Database on salt lakes in the south of the European territory of Russia. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39314119>. (In Russ.)].

17. Вода и донные отложения Иваньковского водохранилища. 2019. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39309557>.

[Water and bottom sediments of the Ivankovsky reservoir. 2019. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39309557>. (In Russ.)].

18. Химический состав грунтовых вод парковых ландшафтов Ростовской области. 2020. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44758190>.

[Chemical composition of groundwater in park landscapes of the Rostov region. 2020. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44758190>. (In Russ.)].

19. Озера Центральной Якутии. 2014. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324586>.

[Lakes of Central Yakutia. 2014. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324586>. (In Russ.)].

20. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды разнотипных водоемов левобережья р. Яны в окрестностях пос. Северный. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255121>.

[Hydrochemical indicators and data on water quality in different types of reservoirs on the left bank of the river. Yana in the vicinity of the village. Northern. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255121>. (In Russ.)].

21. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озера Ожогоино. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255138>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of Lake Ozho-gino. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255138>. (In Russ.)].

22. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озера Большое Токо и рек Идюм и Мулам. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255107>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of Lake Bolshoye Toko and the Idyum and Mulam rivers. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255107>. (In Russ.)].

23. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в черте г. Якутска. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255136>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of lakes within the city of Yakutsk. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255136>. (In Russ.)].

24. Реестр гидрохимического состава озер г. Якутска за 2009–2016 гг. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48137246>.

[Register of the hydrochemical composition of lakes in Yakutsk for 2009–2016. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48137246>. (In Russ.)].

25. Никифоров К.К. и др. Краткий почвенно-географический очерк Усть-Майского района Якутской области. СПб.: Типография А.Э. Коллинс, 1913; 273 с.

[Nikiforov K.K. et al. A brief soil-geographical sketch of the Ust-Maisky district of the Yakutsk region. Sankt-Peterburg: A.E. Collins Printing House, 1913; 273 p. (In Russ.)]

26. Антропогенная динамика природной среды районов городских поселений Центральной Якутии (на примере г. Якутска) (1985–1989 гг.): отчет НИИР (заключит.). ЯНЦ СО АН СССР; рук. Кириллин А.Д.; исполн. Саввинов Д.Д. Якутск, 1989; 151 с. № ГР 01.86.0104387. Инв. № 02.9.10013384.

[Anthropogenic dynamics of the natural environment of the areas of urban settlements in Central Yakutia (on the example of Yakutsk) (1985–1989): research report (concluding). Yakut Scientific Center SB AS USSR; supervisor A.D. Kirillin; executive D.D. Savvinov Yakutsk, 1989; 151 p. No. GR 01.86.0104387. Inv. No. 02.9.10013384. (In Russ.)]

27. Макаров В.Н., Седельникова А.Л. Экогеохимия городских озер Якутска. Якутск: ИМЗ, 2016; 207 с.

[Makarov V.N., Sedelnikova A.L. Ecogeochemistry of urban lakes in Yakutsk. Yakutsk: Permafrost Institute, 2016; 207 p. (In Russ.)]

28. Эколого-лимнологическая паспортизация озер в черте г. Якутска (1990–1995 гг.): отчет НИИР (заключит.). ЯГУ; рук. Жирков И.И. Якутск, 1995; 131 с. № ГР 01.90.004831.

[Ecological and limnological certification of the lakes within Yakutsk (1990–1995): research report (concluding). Yakut State University; supervisor I.I. Zhirkov. Yakutsk, 1995; 131 p. No. GR 01.90.004831. (In Russ.)]

29. Габышев В.А., Габышева О.И. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020;25(4):81–91. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6>.

[Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. The study of heavy metals influence on the development of phytoplankton in the lakes of Yakutsk and its environs. Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2020; 25(4):81–91. (In Russ.)].

30. Кириллов А.Ф., Салова Т.А. Гидробиология. Прикладные экологические проблемы г. Якутска: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука; 2017:130–145.

[Kirillov A.F., Salova T.A. Hydrobiology. Applied environmental problems of Yakutsk: a collection of scientific papers. Novosibirsk: Nauka; 2017:130–145. (In Russ.)].

31. Анисимова Н.П. Техногенные гидрохимические изменения в долине Лены на участке Туймаада. Эколого-геохимические проблемы криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1996:35–44.

[Anisimova N.P. Technogenic hydrochemical changes in the Lena River Valley at the Tuymaada site. Ecological and geochemical problems of permafrost. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1996:35–44. (In Russ.)].

32. Макаров В.Н. Редкоземельные элементы в атмосфере Якутска. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022;(4):54–56. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030055>

[Makarov V.N. Rare earth elements in the atmosphere of Yakutsk. Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2022;(4):54–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869780922030055>]

33. Седельникова А.Л., Макаров В.Н. Стронций в воде городских озер. Геология и минерально-

сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск, 29 марта – 1 апреля 2022 года. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022:474–478. https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_98

[Sedelnikova A.L., Makarov V.N. Strontium in the water of urban lakes. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia*. Yakutsk, March 29 – April 1, 2022. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022:474–478. (In Russ.) https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_98]

34. Ксенофонтова М.И. и др. Характеристика химического состава вод и донных отложений крупных водоемов г. Якутска. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013;(4):493–500.

[Ksenofontova M.I. et al. Characteristics of the chemical composition of waters and bottom sediments of the large reservoirs in Yakutsk. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2013;(4):493–500. (In Russ.)].

35. Реки и озера Якутии. Отв. ред. В.И. Агеев. Якутск: Бичик; 2007. 136 с.

[Rivers and lakes of Yakutia. Ed. V.I. Ageev. Yakutsk: Bichik; 2007. 136 p. (In Russ.)].

36. Пестрякова Л.А. Процесс эвтрофирования озер долины Туймаада (Центральная Якутия). *Наука и образование*. 2010;(4):82–87.

[Pestryakova L.A. The process of eutrophication of the lakes in the Tuymaada valley (Central Yakutia). *Nauka i obrazovaniye*. 2010;(4):82–87. (In Russ.)].

37. Romic M., Romic D. Heavy metals distribution in the agricultural topsoils in urban area. *Environmental Geology*. 2002;(43):795–805.

38. Acosta J.A. et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*. 2011;109(1-3):8–17.

39. Гидрохимический состав озер г. Якутска за период 1985–2021 гг. 2022.

[Hydrochemical composition of lakes in Yakutsk for the period 1985–2021. 2022. (In Russ.)]

40. Сидоренко Н.И. Принципы и их значение для построения теории. *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. 2016; 2(86):157–166. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2016-2-157-166>.

[Sidorenko N.I. Principles and their significance for the construction of a theory. *Bulletin of the Russian University of Economics G.V. Plekhanov*. 2016; 2(86):157–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2016-2-157-166>]

41. Сухачева Е.Ю. и др. Принципы и методы создания цифровой среднемасштабной почвенной карты Ленинградской области. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2019; 64(1):100–113. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.106>

[Sukhacheva E.Yu. et al. Principles and methods of creating a digital medium-scale soil map of the Leningrad region. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2019; 64(1):100–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.106>]

42. Чистяков Г.Е. *Водные ресурсы рек Якутии*. М.: Наука; 1964. 256 с.

[Chistyakov G.E. *Water resources of the rivers in Yakutia*. M.: Nauka; 1964. 256 p. (In Russ.)]

43. Mackin J. W. Robust analysis of linear models. *Statistical Science*. 2004. 9(4):562–570. <https://doi.org/10.1214/088342304000000549>. JSTOR4144426

44. Strutz T. *Data Fitting and Uncertainty A practical introduction to weighted least Squares and Beyond*. 2. Lipsia: Springer; 2016.

45. Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы прогнозирования*. М.: Статистика, 1979; 254 с.

[Lukashin Yu.P. *Adaptive forecasting methods*. M.: Statistics, 1979; 254 p. (In Russ.)]

46. Даувальтер В.А. и др. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020;66(2):252–266. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>.

[Dauwalter V.A. et al. Peculiarities of the chemical composition of water in urban lakes of Murmansk. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2020;66(2):252–266. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>]

47. Бакаев В.А., Савченко Н.В. Зональные особенности гидрохимического состояния малых озер Новосибирской области. *Мир науки, культуры, образования*. 2013;5(42):430–435.

[Bakaev V.A., Savchenko N.V. Novosibirsk region small lakes' zonal features of hydrochemical condition. *Mir Nauki, Kul'tury, Obrazovaniya*. 2013;5(42):430–435. (In Russ.)]

48. Кашина В.А. Осипова С.В. Параметры солевого состава ряда малых водоемов юга Амурской области. *Современные проблемы науки и образования*. 2014; 2:58–64.

[Kashina V.A. Osipova S.V. Parameters of the salt composition in a number of small reservoirs in the south of the Amur region. *Modern problems of science and education*. 2014;2:58–64. (In Russ.)].

Об авторах

¹ЛЕГОСТАЕВА Яна Борисовна, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, e-mail: ylego@mail.ru

²РУФОВА Алена Афанасьевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2216-3866>, e-mail: alenaruf@inbox.ru

Аффилиация

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Российская Федерация

²Академия наук РС (Я), 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 33, Российская Федерация

About the authors

¹LEGOSTAEVA, Yana Borisovna, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, e-mail: ylego@mail.ru

²RUFOVA, Alena Afanasievna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2216-3866>, e-mail: alenaruf@inbox.ru

Affiliation

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 06.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 25.10.2022

Принята к публикации / Accepted 10.11.2022