

УДК 550.46:556.551:551.345

ГЕОХИМИЯ ГОРОДСКИХ ОЗЕРНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ЯКУТСКА

А. А. РУФОВА *

Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия

Проведен анализ гидрохимического состава наиболее крупных озер города Якутска – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары – на основе комплексного исследования в период с 2009 по 2023 гг. Изучаемые озера преимущественно гидрокарбонатно-натриевые со средней минерализацией и умеренно-жесткой водой. В суммарный объем катионов основной вклад вносят Na^+ и Ca^{2+} , анионов – HCO_3^- и Cl^- . Прослеживается увеличение минерализации с невысокой величиной достоверности аппроксимации. Вариация значений жесткости воды напрямую зависит от содержания катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- . Средние значения содержания взвешенных веществ значительно выше существующих ПДК, их изменение в каждом озере носит индивидуальный характер, наиболее высокое обнаружено в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях. Наиболее значимым фактором в формировании гидрохимического режима является 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 Pb, Ni и $\text{Fe}_{\text{общ.}}$. Эколого-геохимический анализ показал, что наиболее загрязненными озерами являются Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.490>

Keywords: lake ecosystems, urban lakes, permafrost, anthropogenic impact.

Введение. Формирование химического состава водоемов – это сложный процесс обмена химическими веществами с другими природными средами или компонентами озерных экосистем. В число природных сред входят почво-образующие породы, почвы, растительность и водная биота. Рельеф, климат и многолетняя мерзлота – это факторы, влияющие на формирование водоемов и химический состав их вод в изучаемых условиях криолитозоны. Поэтому химический состав воды является отражением либо результатом работы всех факторов и компонентов в совокупности, то есть индикатором формирования озерных систем.

Химический состав природной воды определяет предшествующая ему история – путь, совершенный водой в процессе своего круговорота. Количество

* E-mail: alenaruf@inbox.ru

растворенных веществ в такой воде будет зависеть, с одной стороны, от состава тех веществ, с которыми она соприкасалась, с другой – от условий, в которых происходили эти взаимодействия [1–3]. Как те, так и другие могут быть самыми различными, и поэтому так разнообразен качественный и количественный состав природных вод. Это особенно ярко отражается на химическом составе вод селитебных территорий, где воздействие на экосистему, в том числе и на водную, носит многоплановый характер [4].

Накопление знаний о химическом составе городских природных вод и закономерностях его изменений во времени и пространстве достигло масштабного уровня в связи с высокой урбанизацией городских территорий. Поэтому вполне естественно и реально говорить о влиянии антропогенного воздействия на городские природные экосистемы, в том числе озерные, как об одном из важнейших аспектов изучения защиты и безопасности окружающей природной среды.

Городские озерные экосистемы испытывают интенсивное влияние хозяйственной деятельности человека, которое приводит к нарушению экологического равновесия. Усиленное антропогенное воздействие приводит к ухудшению качества водной среды и экологического состояния озер, нарушению структурно-функциональной организации водных экосистем и снижению рыбохозяйственной, водохозяйственной и рекреационной ценности [5–7].

В последние годы озера г. Якутска подвержены активной хозяйственной деятельности человека, нарушена способность озера к самоочищению и саморегуляции, что поставило под угрозу сеть городских пойменных озер. В настоящее время данная проблема остается актуальной в локальном и региональном аспекте.

Изучение водоемов г. Якутска начинается с 30-х годов XX в., однако детальное исследование отмечается с конца 70-х и проводится научными и контролирующими организациями Республики Саха (Якутия). В основном ведутся работы по исследованию качества озерных вод. В настоящей работе модернизирована паспортизация городских озер с учетом полученных актуальных исследований химического состава озерных вод. Кроме этого, работа выделяется частотой наблюдений и широким спектром исследуемых элементов определения.

Целью данной работы является изучение динамики и современного состояния городских озерных вод г. Якутска.

Материалы и методика исследования.

Объекты исследования. Гидрохимические исследования озерных вод проведены на территории г. Якутск в период 2009–2023 гг. во время открытой воды. Объектом исследования послужили озера 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. В табл. 1 приведена общая морфометрическая характеристика исследуемых озер.

Опробование проводилось в летний период времени с мая по сентябрь с отбором проб раз в месяц в первую декаду. Точки отбора проб приведены на

рис. 1. Всего за период исследования отобрано 275 проб поверхностных озерных вод.

Таблица 1

Морфометрическая характеристика наиболее крупных озер г. Якутск
([8] с дополнениями автора)

Характеристика / Озеро		Белое	Хатынг-Юрях	Ытык-Кюель	Сергелях	Сайсары
Площадь зеркала воды, км ²		0,67	0,26	0,89	0,47	0,49
Объем воды, м ³		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	12,8	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

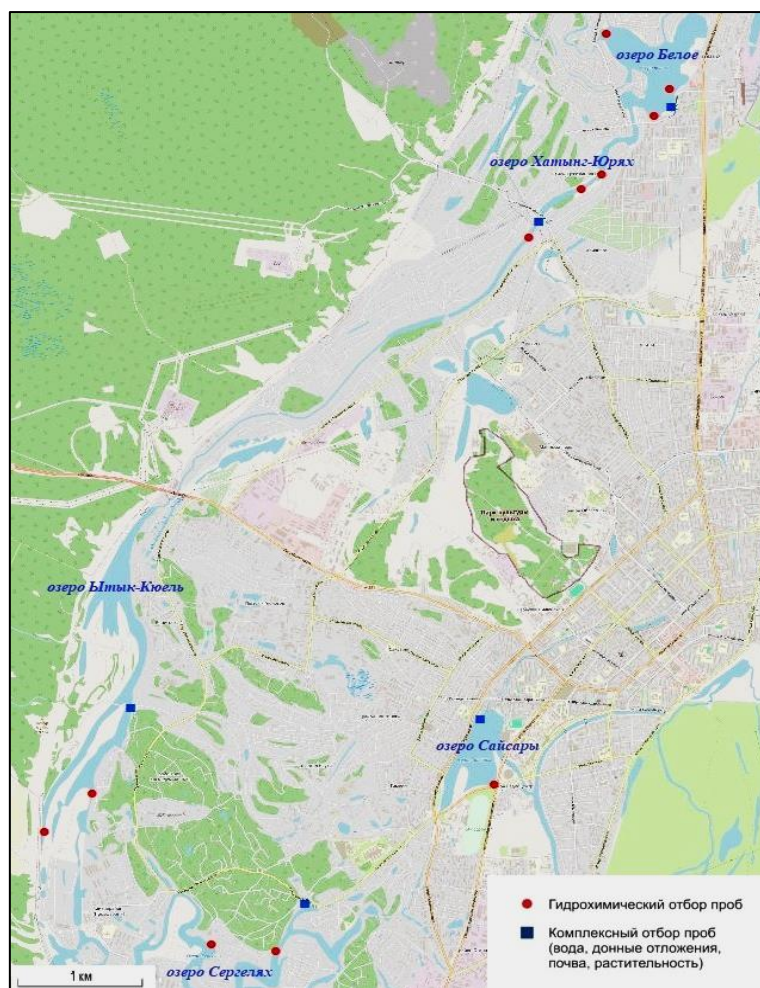


Рис. 1. Карта-схема фактического опробования вод наиболее крупных озер г. Якутск.

Эколого-геохимический анализ состояния озерных экосистем построен на основе расчета коэффициентов концентрации относительно нормативов ПДК для водоемов культурно-бытового назначения ($K_{\text{ПДК}}$) и фоновых концентраций ($K_{\text{К}}$). Учитывались $K_{\text{ПДК}}$ и $K_{\text{К}}$ каждого компонента со значениями $>1,5$ (табл. 2).

Таблица 2

Эколого-геохимическая оценка состояния городских озер криолитозоны

Комплексный уровень экологического риска		Комплексный индекс загрязнения	Коэффициент риска
Значение уровня	Характеристика уровня (озерных вод, донных отложений, почв)		
Уровень 1	Нет превышений $K_{\text{ПДК}}$ и $K_{\text{К}}$, линейная зависимость между макро- и микрокомпонентами	нет загрязнения	сверхнизкий риск
Уровень 2	Превышение $K_{\text{ПДК}}$ и $K_{\text{К}}$ в 1,5–5 раз, линейная зависимость между макро- и микрокомпонентами	слегка загрязненный	низкий риск
Уровень 3	Превышение $K_{\text{ПДК}}$ и $K_{\text{К}}$ в 5 и более раз, логнормальное распределение компонентов гидрохимического состава	загрязненный	средний риск
Уровень 4	Аномально высокие значения $K_{\text{ПДК}}$ и $K_{\text{К}}$, отсутствие закономерностей в распределении компонентов гидрохимического состава	сильное загрязнение	высокий риск

Расчеты фоновых концентраций макро- и микроэлементного состава озерных вод выполнены из общей выборки составленных атрибутивных таблиц 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. В результате рассчитанные среднегеометрические значения предлагаются в качестве фоновых концентраций для озерных вод Якутска и его окрестностей.

Методы полевых исследований. Отбор проб производился согласно общепринятым в геоэкологии и геохимии методикам. Пробы воды отбирались из глубины и береговой полосы в специальные емкости, изготовленные из полимерного материала, разрешенные для контакта с водой. Перед отбором проб, в соответствии с программой исследования, определяли номенклатуру показателей (характеристик) состава и свойств воды, которые подлежат анализу незамедлительно на месте исследования. Это, как правило, органолептические показатели – прозрачность, цветность и запах воды. Далее емкость не менее двух раз ополаскивали водой, подлежащей анализу, и заполняли ею до верха, не оставляя расстояния для воздуха. Отобранную пробу хранили в охлажденном месте перед отправкой в лабораторию. При отборе проб воды учтены все

требования к отбору, транспортировке и подготовке к хранению, установленные ГОСТ Р 51592.

Методы химического анализа. Химико-аналитические работы проводились в лабораториях Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (НИИПЭС СВФУ) и Институте геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН). Использованы методы исследования поверхностных природных вод на основании утвержденных ГОСТ с определением основных показателей химического состава. Анализ контрольных проб проведен в Центральной геологической лаборатории АО “Якутскгеология” (Росгео, АО) (сертификат соответствия № СДС “УКАРГЕО”RU 0027.21).

Камеральная обработка данных. Карта-схема фактического опробования построена с помощью программы SAS. Планета 201212.10106 Stable. Использованы цифровые базовые карты города Google maps – физическая, экономическая, транспортная и др. Символы комплексных отборов проб отмечены с помощью программы MS Paint 3D. Подготовка и базовая обработка данных выполнена с помощью пакета Microsoft Office. Показатели рассчитаны по отношению к среднему геометрическому. По результатам геоэкологического анализа построены линейные графики, гистограммы и линейчатые диаграммы с помощью программы MS Excel и Statistica v.10. Диаграммы концентрации и рассеяния, тернарные графики построены в программе Statistica v.10. Дополнительные символы, фигуры и корректировки добавлены в программе MS Word и Paint 3D.

Многомерные анализы – корреляционный и факторный, выполнены в программе Statistica v. 10. В корреляционном анализе использован коэффициент Спирмена [9]. В факторном анализе применено вращение факторов варимакс нормализованных [10]. Для достоверного результата и снижения отклонения числовые параметры перед проведением многомерных анализов были подвергнуты стандартизации (среднее геометрическое разделено на стандартное отклонение каждой из переменных).

Результаты исследований и их обсуждение. Для удобства восприятия и анализа гидрохимическая характеристика представлена по показателям – общая (интегральная) характеристика и органолептические показатели, катионно-анионный и микроэлементный составы. Общая характеристика рассмотрена единичными представлениями о минерализации, водородном показателе pH и содержании взвешенных веществ. Органолептические показатели представлены запахом и цветностью воды, также в группу входит жесткость воды. Катионно-анионный состав описан основными ионами природных вод, в отдельную группу выделяют биогенные вещества. Микроэлементный состав представлен халькофильными элементами.

Общие характеристики и органолептические свойства. Интенсивность запаха озерных вод растет от весны к осени. С нарастанием жизнедеятельности организмов и фотосинтетических процессов запах меняется от слабого до сильного. Также к осени в озерах начинается процесс эвтрофикации, что

сказывается на органолептических свойствах в целом. Между тем, интенсивность запаха меняется не только по сезонам года, кроме этого, наблюдается динамика по годам и отдельно по озерам. Например, вода оз. Ытык-Кюель за годы исследования поменяла запах от очень слабого к отчетливому.

Цветность меняется от очень слабо-желтоватой до слабо-желтой. За все время наблюдений озерные воды имели цветность слабовыраженного желтого и желтоватого оттенка. Критической цветности, например коричневого и бурового оттенка, не наблюдалось. Отмечен также процесс усиления сезонной цветности от едва уловимой бледно-желтоватой в июне до желтоватой в сентябре. Между тем, изменения выражены не столь ярко, как с запахом воды.

По величине общей жесткости воды озера являются умеренно жесткими с вариациями значений от 1,50 до 7,60 мг-экв/дм³ (рис. 2). Резкие колебания отмечаются в период 2012–2014, 2017–2018 и 2020–2022 гг. В остальное время показатель колеблется достаточно в узком диапазоне, достоверность подтверждается низкой величиной аппроксимации ($R^2=0,24$). 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 [8, 11].

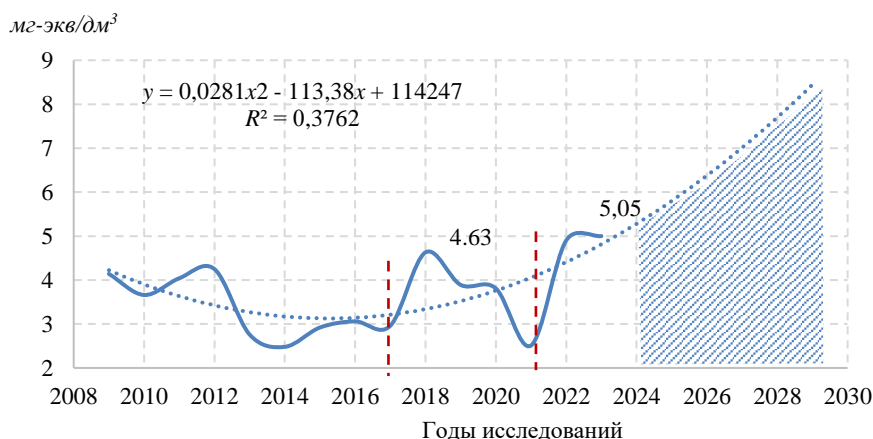


Рис. 2. Многолетняя динамика изменения жесткости озерных вод г. Якутска.

Условные обозначения (здесь и на рис. 3, 4):

— условный период пятилетнего прогноза; — пики максимальных показателей.

Таким образом, органолептические показатели являются одним из необходимых и достоверных критериев для оценки качества воды. Качественный и количественный анализ органолептики озерных вод проводятся одними из первых, что является связующим звеном с химическим анализом. Они обладают закономерной связью с главными катионами и анионами воды. В частности, жесткость воды может иметь тесную зависимость с микроэлементным составом озерных вод.

Озера г. Якутска характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом, средней минерализацией и слабощелочной средой (табл. 3).

Таблица 3

Интегральные показатели озерных вод г. Якутска

Котловина озера	Старичное водно-эрозионное			Старичное водно-эрозионное антропогенное		Среднее геометрическое/ max–min	ПДКкб *К _{ПДК}
Показатель,	Сергелях, n = 63	Ытык-Кюель, n = 65	Хатынг-Юрях, n = 65	Белое, n = 67	Сайсары, n = 64	–	–
pH	8,02	8,00	7,94	8,33	8,21	$\frac{8,10}{9,65-6,35}$	–
Минерализация, мг/дм ³	319,54	334,17	461,42	591,78	477,83	$\frac{426,87}{1100,98-147,04}$	$\frac{1000}{0,43}$
Взвешенные вещества, мг/ дм ³	21,71	37,54	25,09	37,20	23,23	$\frac{28,35}{540,00-2,00}$	$\frac{0,75}{37,80}$

Примечание: * – К_{ПДК} рассчитан как отношение среднегеометрического значения к нормативам ПДК культурно-бытового назначения (ГН 2.1.5.689-98); n – количество проб.

За весь период наблюдений прослеживается тенденция увеличения минерализации озерных вод с невысокой величиной достоверности аппроксимации, что вполне закономерно при увеличивающемся антропогенном прессе на озерные экосистемы в пределах селитебной территории (рис. 3). В отдельные годы отмечаются пики с максимальным значением – 2018 и 2020 гг., 683,39 и 601,94 мг/дм³ соответственно. Повышение минерализации в эти годы происходит за счет ее увеличения в водах озер Хатынг-Юрях (930,82 мг/дм³) и Белое (910,41 мг/дм³). Кроме того, повышению минерализации способствует увеличение Ca^{2+} (115,64 мг/дм³) и Na^+ (116,94 мг/дм³). Концентрация данных ионов в поверхностных водах подвержена сезонным колебаниям (весна, осень) и, как правило, коррелирует с общей минерализацией. В период понижения минерализации озер ионам принадлежит преобладающая роль, что связано с легкостью выщелачивания растворимых солей Ca^{2+} и Na^+ из поверхностного слоя почв и пород.

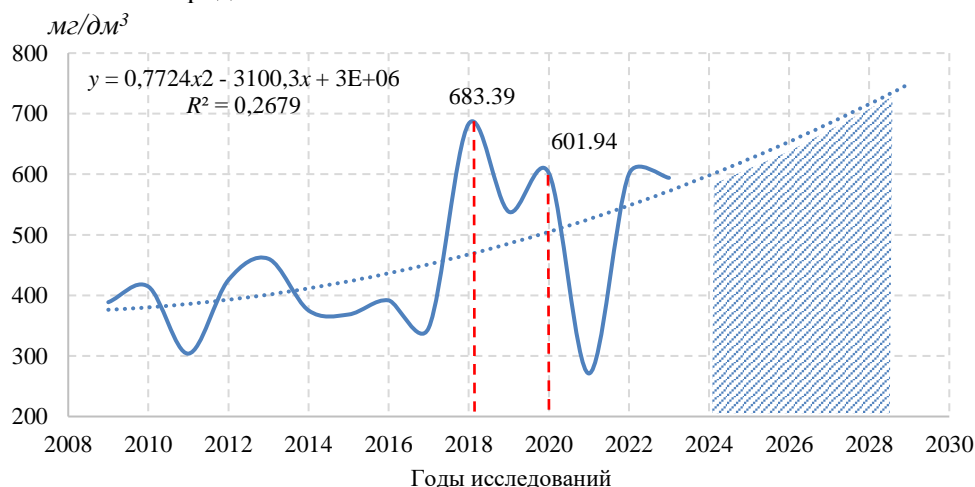


Рис. 3. Многолетняя динамика изменения минерализации в озерных водах г. Якутска.

Реакция pH водной среды исследуемых озер в основном слабощелочная (рис. 4). Максимальное увеличение щелочности озерных вод наблюдалось в 2018 и 2019 гг., в это время средняя величина pH достигала 8,79 и 8,68. Повышение pH, возможно, связано с небольшим количеством атмосферных осадков в предыдущие годы (180–190 мм в 2017 и 2018 гг.) и, соответственно, с малым поступлением ионов водорода [12].

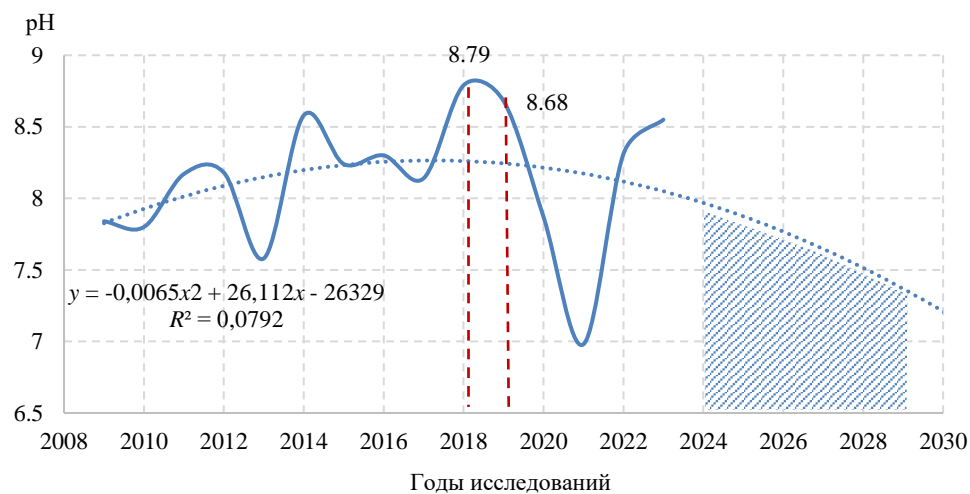


Рис. 4. Многолетняя динамика изменения pH в озерных водах г. Якутска.

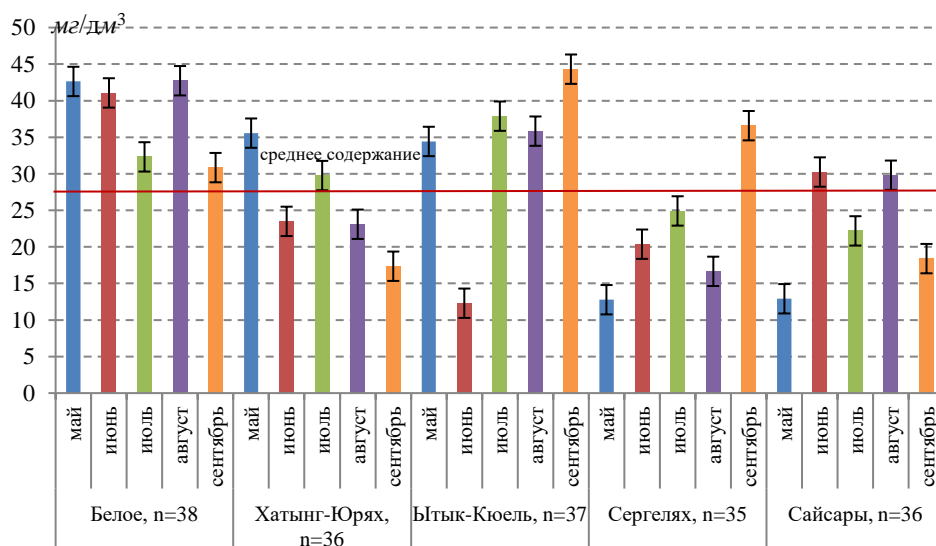


Рис. 5. Динамика изменения содержания взвешенных веществ в воде озер г. Якутск за теплый период времени.

Среднее содержание взвешенных веществ, которое можно принять за условно фоновое, равно $28,35 \text{ мг/дм}^3$, что значительно выше существующих

ПДК. Согласно СанПиН, в водных объектах рыбохозяйственного значения при содержании природных взвешенных веществ в межень более 30 мг/дм^3 допускается увеличение их содержания в воде в пределах 5%. Наиболее высокое содержание взвешенных веществ обнаружено в озерах Ытык-Кюель, Белое и Хатынг-Юрях (рис. 5).

Изменения содержания взвешенных веществ в каждом озере носит 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.

Таким образом, в результате оценки интегральных показателей (минерализации, водородного показателя pH и содержания взвешенных веществ) выявлена тенденция их увеличения. Пятилетний прогноз показал переход минерализации от средней до повышенной, pH – от слабощелочной до щелочной, содержания взвешенных веществ – от среднего до сильного. Это вполне объяснимо при современном угнетенном состоянии озерных вод в условиях экономического и технического роста города, приводящего к усилению антропогенного воздействия.

Ухудшение общих параметров озерной воды г. Якутска обусловлено направленным изменением их качественных и количественных показателей в сторону увеличения под воздействием комплекса природных и антропогенных факторов, перехода и обмена миграционных форм отдельных загрязнителей химического состава поверхностных вод.

Катионно-анионный состав озерных вод Якутска представлен следующим рядом накопления: $\text{Ca}^{2+}_{0,73} \rightarrow \text{Mg}^{2+}_{0,42} \rightarrow \text{K}^{+}_{0,26} \rightarrow \text{Na}^{+}_{0,25} \rightarrow \text{Ba}^{2+}_{0,23} \rightarrow \text{Cl}^{-}_{0,12} \rightarrow \text{Sr}^{2+}_{0,04} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}_{0,02} \rightarrow \text{Li}^{+}_{0,01}$ (табл. 4).

Большая амплитуда колебаний основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) наблюдается в промежутке 2009–2011 и 2017–2022 гг. Вариация подчиненных катионов отличается от основного узким диапазоном ($0,1\text{--}0,3 \text{ мг/дм}^3$). В катионном составе воды озер Якутска в основном ревалентны между собой. При этом в водах озера Белое отмечаются пики с максимальным значением Na^{+} примерно на 20% над средним содержанием.

В последние годы озеро Белое подвергается сильному антропогенному воздействию. В 2019 г. начали отсыпку юго-восточной части озера и с 2021 г. строится огромная база и склад. Кроме этого, в 2021 г. в южной части озера открыли услугу аренды лодок и sup-досок, для этого водоем отсыпали горным и кильдямским песком затем щебнем – организовали пристань. С 2021 г. идет реконструкция улицы Можайского, проходящая вдоль озера, протяженность ремонтируемого участка составляет 2,1 км. Проводились работы по подготовке земляного полотна, выносу инженерных сетей, также проложены водопропускные сооружения. Все эти мероприятия оказывают негативное воздействие в целом на экосистему озера.

Вариации главных анионов меняются с большой амплитудой колебаний, например, HCO_3^{-} ($48,06\text{--}361,72 \text{ мг/дм}^3$) или Cl^{-} ($2,29\text{--}100,62 \text{ мг/дм}^3$). Преобладающую роль в озерных водах играют гидрокарбонаты, что объясняется соприкосновением озерных вод преимущественно с относительно хорошо

промытыми верхними слоями почв и пород, и потому бедными легкорастворимыми Cl^- и SO_4^{2-} [1]. Ионный состав озерных вод Якутска генетически связан составом пород и почв.

Таблица 4

Катионно-анионный состав озерных вод г. Якутска

Котловины озера	Старичное водно-эрозионные озера			Старичные водно-эрозионные антропогенные озера		Среднее геометрическое/ max-min	ПДКкб *Кпдк
Показатель, мг/дм ³	Сергелях, n = 63	Ытык-Кюель, n = 65	Хатынг-Юрях, n = 65	Белое, n = 67	Сайсары, n = 64	=	=
Ca^{2+}	26,12	24,03	31,71	32,46	32,06	$\frac{29,22}{140,0-10,0}$	$\frac{40}{0,73}$
Mg^{2+}	16,36	17,15	20,36	28,38	24,99	$\frac{21,21}{214,0-3,05}$	$\frac{50,0}{0,42}$
Na^+	30,61	34,82	55,12	89,19	59,47	$\frac{50,28}{278,83-3,73}$	$\frac{200}{0,25}$
K^+	3,22	2,97	7,76	10,07	4,93	$\frac{5,19}{110,0-1,20}$	$\frac{20}{0,26}$
Ba^{2+}	0,13	0,13	0,19	0,16	0,19	$\frac{0,16}{0,45-0,10}$	$\frac{0,7}{0,23}$
Sr^{2+}	0,26	0,27	0,28	0,29	0,32	$\frac{0,29}{0,65-0,20}$	$\frac{7}{0,04}$
Li^+	0,008	0,01	0,01	0,009	0,01	$\frac{0,01}{0,05-0,001}$	$\frac{0,03}{0,01}$
HCO_3^-	172,99	186,20	219,41	241,74	236,51	$\frac{209,91}{640,71-24,40}$	–
Cl^-	23,20	20,08	50,06	91,60	52,11	$\frac{41,24}{280,10-1,00}$	$\frac{350}{0,12}$
SO_4^{2-}	7,73	9,32	12,11	21,18	10,59	$\frac{11,53}{261,12-0,50}$	$\frac{500}{0,02}$

Обычно в озерных водах содержание Cl^- выше SO_4^{2-} . Вариации Cl^- связаны с взаимодействием атмосферных осадков с почвами, особенно засоленными [13].

Содержание SO_4^{2-} в озерных водах г. Якутска варьирует от 0,50 до 261,12 мг/дм³. В 2022 г. в водах озера Белое отмечается абсолютный максимум за весь период наблюдений: в мае – 260,16 мг/дм³; в июне – 261,12 мг/дм³, в остальные месяцы – 8,00–13,00 мг/дм³. В том же году в других озерах содержание колеблется от 70,00 до 80,00 мг/дм³.

Значительные вариации анионов и катионов связаны в основном с сезонными колебаниями и проточностью городских озер, которые подпитываются через малые реки, такие как Шестаковка и Мархинка, и от основной водной артерии – р. Лена. Обычно в речной воде содержание некоторых катионов и анионов бывают в разы больше, чем у озерной [11]. И в годы, когда осуществлялось зарегулирование большого и малого кольца городских озер, их пополнение за счет речного стока вносило существенное изменение в гидрохимический состав озерных вод. Мониторинг показал, что с

2017–2018 гг. в озерах Якутска отмечается увеличение содержания основных катионов и анионов в воде, что, соответственно, приводит к росту суммы минеральных веществ и ухудшению качества воды.

В табл. 5 представлено многолетнее усредненное содержание биогенных веществ в озерных водах г. Якутска.

Таблица 5

Содержание биогенных веществ в озерных водах г. Якутска

Показатель, мг/дм ³	Старичные водно-эрозионные озера			Старичные водно- эрозионные антропогенные озера		Среднее геометрическое/ max–min	ПДК _{кб} К _{пдк}
	Сергелях, n = 63	Ытык- Кюель, n = 65	Хатынг- Юрях, n = 65	Белое, n = 67	Сайсары, n = 64		
NH ₄ ⁺	0,64	0,61	0,73	1,25	0,60	<u>0,74</u> 6,70–0,03	<u>1,50</u> 0,49
NO ₂ [–]	0,34	0,42	0,77	1,10	0,81	<u>0,64</u> 5,10–0,02	<u>3,3</u> 0,19
NO ₃ [–]	1,35	1,38	1,49	2,03	1,82	<u>1,62</u> 10,87–0,20	<u>45,0</u> 0,04
PO ₄ [–]	0,31	0,40	0,59	0,40	0,36	<u>0,41</u> 1,70–0,10	<u>3,50</u> 0,12
F [–]	0,22	0,23	0,23	0,26	0,23	<u>0,24</u> 1,50–0,10	<u>1,50</u> 0,16

В целом для исследуемых озерных вод суммарный объем биогенных веществ невысокий – 3,65 мг/дм³. Основной вклад вносит NO₃[–], несколько в меньшей степени NH₄⁺. Резкие колебания отмечаются в период с 2013 по 2018 гг., в остальное время показатель варьирует достаточно в узком диапазоне, достоверность подтверждается относительно невысокой величиной аппроксимации ($R^2=0,4–0,6$). В последние годы отмечается увеличение содержания биогенных веществ, в частности NO₃[–], NO₂[–] и NH₄⁺, что указывает на усиление процессов разложения органических остатков в условиях более медленного окисления ионов.

В содержании и вариации биогенных веществ важное экологическое значение играет водородный показатель pH и температура воды. Разработана классификация содержания биогенных веществ в поверхностных водах, где выделяются шесть классов. По усредненным многолетним данным городские озера относятся к умеренно загрязненным, загрязненным и грязным. Из общей картины выделяется оз. Белое, так по содержанию NH₄⁺, NO₂[–] и PO₄^{3–} оно характеризуется как грязное. Между тем, ни одно городское озеро не относится к категории очень чистых и чистых.

Анализ микроэлементного состава озерных вод г. Якутска выявил наличие водорастворимых форм Pb, Ni, Mn, Co, Cr, Zn, Cu, Fe_{общ.} (табл. 6). За все время наблюдений As и Hg в озерных водах не зафиксированы. В отдельные годы наблюдается повышение содержания некоторых микроэлементов и наоборот.

Таблица 6

Микроэлементный состав озерных вод г. Якутска

Показатель, мг/дм ³	Старичные водно-эрозионные озера			Старичные водно-эрозионные антропогенные озера		Среднее геометрическое/ max–min	ПДК _{кб} *К _{пдк}
	Сергелях, n = 63	Бтык- Кюель, n = 65	Хатынг- Юрях, n = 65	Белое, n = 67	Сайсары, n = 64		
Fe _{общ.}	0,22	0,32	0,33	0,30	0,28	<u>0,33</u> 4,42–0,01	<u>0,30</u> 1,10
Pb	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	<u>0,02</u> 0,04–0,01	<u>0,01</u> 2,00
Co	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	<u>0,02</u> 0,05–0,01	<u>0,10</u> 0,20
Cu	0,003	0,003	0,002	0,003	0,004	<u>0,002</u> 0,03–0,001	<u>1,000</u> 0,002
Zn	0,11	0,12	0,13	0,13	0,11	<u>0,12</u> 1,10–0,01	<u>1,00</u> 0,12
Mn	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	<u>0,03</u> 0,05–0,01	<u>0,1</u> 0,03
Ni	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	<u>0,03</u> 0,08–0,01	<u>0,02</u> 1,5
Cr	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	<u>0,02</u> 0,05–0,01	<u>0,5</u> 0,04
As	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,01
Hg	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,0005

Примечание: нпо – ниже предела обнаружения; жирным шрифтом выделены показатели, превышающие ПДК_{кб}; n – количество проб.

В озерных водах обнаружено высокое содержание Pb. Концентрация варьирует от 0,01 до 0,04 мг/дм³ при ПДК 0,01 мг/дм³. Миграционная активность Pb увеличивается с понижением pH. В кислых и особенно в сильнокислых водах Pb чувствует себя более свободно, чем в озерной нейтральной и слабощелочной среде. Тем не менее, в озерах Якутска отмечается увеличение его содержания и превышение ПДК в несколько раз. Это происходит за счет увеличения Pb в водах озер Белое (0,024 мг/дм³), Бтык-Кюель (0,022 мг/дм³) и Сайсары (0,020 мг/дм³). Возможно, рост связан с местоположением озер в центральной части города, где высокая антропогенная нагрузка.

Co, Cu, Cr распространены повсеместно и варьируют достаточно в широком диапазоне (0,001–0,05 мг/дм³). Имеют 2 (Cr) и 3 (Co, Cu) класс опасности. В целом они относятся к числу достаточно активных микро-элементов, что подтверждается их стабильным содержанием в озерных водах. Некоторое количество Co и Cr поступают в воду в процессе разложения организмов и растений, также из почв, особенно сформировавшихся на обогащенных породах (песчаники, глинистых сланцах и др.). Cu участвует в процессе фотосинтеза, влияющего на усвоение азота растениями. Вследствие

этого наблюдается зависимость его содержания от перепадов температуры воздуха и воды.

Содержание Zn в озерных водах варьирует от 0,01 до 1,10 мг/дм³. Максимальное увеличение наблюдалось в 2013 и 2020 гг., в это время средняя величина достигала 0,35–1,10 мг/дм³ соответственно. Выявлена зависимость “увеличение-увеличение”, где содержание Zn в озерных водах повышается с ростом минерализации, кроме этого, увеличение Zn приводит к возрастанию pH. Последняя зависимость подтверждается тем, что Zn свободно мигрирует в условиях нейтральной и слабощелочной среды исследуемых озерных вод.

Mn варьирует достаточно в узком диапазоне 0,01–0,05 мг/дм³. На всем протяжении исследования имеет стабильную динамику развития, характерную для озерных вод. В целом, химическая активность Mn намного выше, чем у других микроэлементов. Значительное количество поступает в процессе разложения остатков водных животных и растительных организмов, особенно сине-зеленых, диатомовых водорослей и высших водных растений [14].

Среднее содержание Ni в озерных водах Якутска составляет 0,03 мг/дм³, варьирует от 0,01 до 0,08 мг/дм³. В последние годы наблюдается увеличение концентраций, превышающих ПДК, что связано с повышением содержания биогенных веществ. Микроэлемент попадает в воду из почвы, растительных и животных организмов при их распаде. Кроме этого, наблюдается зависимость Ni от перепадов температуры воздуха. Высокие концентрации обнаружены в озерах Белое, Сайсары, Хатынг-Юрях.

Концентрация Fe_{общ.} колеблется в широком диапазоне от 0,01 до 4,42 мг/дм³. Fe_{общ.} имеет высокую миграционную способность и легко выщелачивается из горных пород. В отдельные годы отмечается превышение нормативов ПДК (2009–2011, 2016, 2018–2021). Между тем в 2015 и 2022 гг. отмечены минимальные пики – 0,03 и 0,05 мг/дм³ соответственно. На содержание Fe_{общ.} влияют химический состав воды, pH и температура воды. Все это в совокупности могло повлиять на резкие колебания в период 2011–2012 и 2015–2017 гг. Повышенная концентрация Fe_{общ.} в озерных водах ухудшает органолептические свойства, придавая воде неприятный вкус и запах, делает ее непригодной для использования даже в технических целях.

Таким образом, в отдельные годы отмечается превышение ПДК по Fe_{общ.} в 15 раз, Pb – в 4, Ni – в 4 и Zn – в 1,1 раз. Данные микроэлементы имеют 2 и 3 класс опасности, увеличение их концентрации ухудшает качество воды и возможность ее использования для питьевых и технических целей. На их содержание и миграцию оказывают влияние внутренние и внешние факторы. Внутренние факторы определяются физико-химическими особенностями элементов, а внешние – условиями среды, в которых происходит миграция. Исходя из этого, значительное повышение содержания микроэлементов в озерных водах Якутска особенно в последние годы – это отражение природных факторов, наряду с увеличивающимся антропогенным воздействием.

При рассмотрении содержания микроэлементов как факторов загрязнения озерных вод фиксируются повышенные концентрации Fe_{общ.}-Pb-Ni-Zn. Распределение их носит неравномерный характер, подчеркивающий индивидуальность каждого рассматриваемого озера. По анализу средних

значений проявляется природный фактор в формировании микроэлементного состава озерных вод – доминирование элементов группы железа, а также Pb, Ni и Zn, привносимые в озера с почвенным материалом или пылью. Между тем, высокие концентрации некоторых микроэлементов в озерах Белое и Сайсары говорят о присоединении антропогенного воздействия.

Анализ гидрохимических результатов и обсуждение. Анализ гидрохимических показателей выявил статистически значимые корреляционные связи в городских озерных водах Якутска. Установлена достоверная зависимость минерализации от Cl^- , HCO_3^- , жесткости, Mg^{2+} , Ca^{2+} и SO_4^{2-} ($r = 0,41\text{--}0,73$); жесткости от Mg^{2+} , Ca^{2+} ($r = 0,40; 0,46$), где r – коэффициент корреляции. Кроме этого, отмечены пары – $\text{Ca}^{2+}\text{--Mg}^{2+}$ ($r=0,64$), $\text{HCO}_3^-\text{--Cl}^-$ ($r=0,40$). Наибольшее влияние на гидрохимический состав оказывают интегральные показатели и катионно-анионный состав, чем микроэлементы. Однако данные корреляционные связи характерны в целом для городских озерных вод.

Установлена положительная связь микроэлементов в каждой исследуемой площадке: Mn-Cu ($r = 0,65$), Ni-Co ($r = 0,63$), Zn-Fe_{общ.} ($r = 0,45$), Cr-Pb ($r = 0,44$), Cu-Fe_{общ.} ($r = 0,43$). Помимо этого, выявлена отрицательная взаимосвязь: Mn-Co ($r = -0,67$), Co-Fe_{общ.} ($r = -0,56$), Ni-Zn ($r = -0,48$), Ni-Pb ($r = -0,46$), нефтепродукты-Co ($r = -0,43$), Zn-Co ($r = -0,41$). Данные элементы проявляют свои максимальные концентрации преимущественно во второй половине исследования (позднее 2014 г.), полагаем, что эти взаимосвязи зафиксированы именно в площадках исследований, а в общую выборку они не вошли.

С учетом полученных достоверных данных при помощи факторного анализа проведена классификация взаимосвязей из 27 переменных по усредненным показателям гидрохимического состава озерных вод г. Якутска (табл. 7). В результате обработки данных не произошло сокращение числа переменных. Ведущими факторами ($>0,70$) являются минерализация и жесткость, основные катионы (Ca^{2+} , Na^+ , K^+) и анионы (HCO_3^- и Cl^-). В качестве подчиненного фактора выступают Mg^{2+} , NO_2^- , Fe_{общ.} и Zn.

Главным результативным признаком при учете вариаций гидрохимического состава озерных вод является основные ионы в следующей последовательности: $\text{Ca}^{2+}\text{--Na}^+\text{--K}^+\text{--Cl}^-\text{--HCO}_3^-$. Значимая доля в факторном анализе принадлежит минерализации и жесткости воды. Подчиненным фактором выступают – Fe_{общ.}, Mg^{2+} , NO_2^- и Zn. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер Якутска. Остальные показатели ($>0,6$) можно отнести в группу случайных факторов.

На данный момент накопилось достаточное количество достоверных и комплексных анализов по экологическому состоянию поверхностных вод, которые могут охарактеризовать водоемы по признакам и критериям. Проведенный мониторинг и анализ позволил выполнить эколого-геохимическую характеристику озерных вод. На основе средних значений дана оценка санитарно-токсикологического состояния относительно культурно-бытового пользования (ПДК_{кб}) и коэффициенты относительно ПДК ($K_{\text{ПДК}}$) озерных вод г. Якутск (рис. 6), что позволяет визуализировать общую картину основных загрязнителей городских территорий г. Якутска.

Таблица 7

Факторный анализ усредненных показателей гидрохимического состава озерных вод г. Якутска

Показатели	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
интегральные показатели			
pH	0,601	–0,095	0,126
Жесткость	0,830	0,241	0,210
Минерализация	0,913	0,220	0,125
Взвешенные вещества	–0,166	–0,039	–0,365
фактор ионного состава			
Ca ²⁺	0,796	0,551	0,169
Mg ²⁺	0,318	0,762	0,451
Na ⁺	0,767	–0,080	0,114
K ⁺	0,750	0,181	–0,281
NH ₄ ⁺	0,131	–0,049	–0,608
Ba ⁺	–0,312	0,031	0,172
Sr ⁺	–0,188	–0,012	0,050
Li ⁺	–0,034	0,055	0,338
HCO ₃ [–]	0,701	0,030	–0,150
Cl [–]	0,748	0,018	–0,019
NO ₃ [–]	0,044	0,750	0,175
SO ₄ ^{2–}	0,361	0,258	0,379
NO ₂ [–]	0,026	0,237	–0,624
PO ₄ ^{2–}	–0,178	–0,063	0,346
F [–]	–0,061	–0,078	0,149
фактор загрязнения металлами			
Fe _{общ.}	0,074	0,826	0,056
Pb	0,436	–0,252	–0,296
Co	0,216	–0,315	0,213
Cu	0,075	0,545	–0,217
Zn	0,074	–0,250	0,702
Mn	–0,236	0,001	0,233
Ni	–0,139	0,250	–0,304
Cr	–0,016	0,193	–0,289
оценка статистической значимости			
Общая дисперсия	4,315	3,001	2,285
Вклад в суммарную дисперсию, %	15,40	10,70	8,20

Оценка состояния озерной воды по каждой исследуемой площадке (табл. 8) проведена на основе анализа комплексного экологического риска, который состоит из четырех уровней, включающая характеристики $K_{ПДК}$ и K_k от “нет превышений” до “аномально высоких значений” (табл. 2). Результат характеристики – это комплексный индекс загрязнения и коэффициент эколого-геохимического риска.

В целом, эколого-геохимическая характеристика озерных вод г. Якутск оценивается достаточно разнообразно – от чистых до сильно загрязненных. Неблагополучная эколого-геохимическая обстановка наблюдается в оз. Белое, поскольку по всем перечисленным элементам отмечается загрязнение с разным уровнем риска.

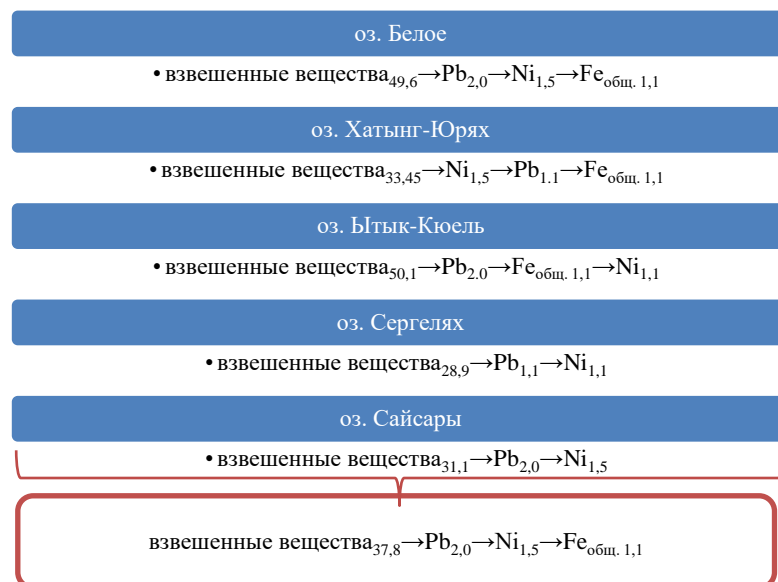


Рис. 6. Основные загрязняющие вещества в озерных водах г. Якутска.

Таблица 8

Эколого-геохимическая оценка состояния озерных вод в г. Якутска

Значение уровня	Макро- и микрокомпоненты			
	Взвешенные вещества	Fe	Pb	Ni
Уровень 1	—	—	—	—
Уровень 2	—	Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель,	Белое, Ытык-Кюель	Белое, Сайсары
Уровень 3	—	—	—	—
Уровень 4	Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары	—	—	—

Углубленное изучение по каждой исследуемой площадке дает детальную картину состояния и изменения химического состава. В связи с этим, многолетняя усредненная гидрохимическая характеристика может служить фоновым показателем озерных вод на территории г. Якутска. Путем анализа и интеграции большого массива данных разработана общая картина гидрохимического состава озер г. Якутска, которая позволяет представить комплексную оценку и динамику химического состояния озерных вод. Гидрохимический режим городских озер формируется под влиянием природных факторов, вместе с тем

увеличение антропогенного воздействия привносит свои изменения в химический состав поверхностных вод.

Достоверные результаты отмечаются по многолетней динамике изменения показателей минерализации озерных вод, прослеживается тенденция постепенного увеличения минерализации, что вполне закономерно при увеличении антропогенного пресса на озерные экосистемы. К подобным выводам пришли и сотрудники Института мерзлотоведения СО РАН, отмечающие, что на протяжении последних лет идет возрастание величины минерализации вод в озерах Якутска [15]. 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 [16, 17]. 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 к повышению засоления городских грунтов. В то же время, это увеличивает степень запыленности города в теплый период времени, когда песчано-гравийный материал скапливается по обочинам улиц.

Весомую роль в формировании химического состава озерных вод оказывает степень проточности водоема. Длина городского канала на территории города составляет примерно 22–23 км. Канал берет свое начало в 16 км от Покровского тракта, где протекает небольшая р. Шестаковка. В 80-х гг. на речке был построен шлюз-регулятор, обеспечивающий водой близлежащие водоемы, в том числе городские озера. От шлюза-регулятора берут начало три искусственно созданных русла. Два идут в села Пригородное и Хатассы, а одно через оз. Атласовское и Сергелях идет в сторону города, где условно делится на Большое и Малое кольцо.

В 90-е гг. проточность городских озер была нарушена, вследствие этого произошло ухудшение экологического состояния поверхностных озерных вод. С 2015 г. администрацией г. Якутска предпринимаются попытки по восстановлению проточности городской озерной системы. Были проведены работы по углублению дна и расширению русла. В итоге некоторая часть городского канала была восстановлена. Данная проблема также не уникальна, и с ней сталкиваются все коммунальные службы в разных регионах РФ [5].

Наиболее часто встречающимся и вносящим вклад в загрязнение озерных вод Якутска являются микроэлементы $Fe_{общ.}$, Ni, Zn и др. Коллеги из Института биологических проблем криолитозоны СО РАН выявили, что повышенная концентрация Zn 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 [18]. Подтверждена перспективность изучения влияния ионов тяжелых металлов на живые компоненты водной экосистемы городских озер Якутска, а также пригодность фитопланктона в качестве тест-объекта для исследований.

Основными поллютантами, осложняющими эколого-геохимическое состояния озерных вод Якутска, являются высокое содержание взвешенных

веществ – $Fe_{\text{общ}}$, Pb и Ni. В озерах выявлено загрязнение вод, характеризующееся аномально высокими содержаниями взвешенных веществ (превышение ПДК от 28 до 50 раз на всех исследуемых площадках), что соответствует сильному загрязнению с высоким риском. Легкое загрязнение с низким риском наблюдается по $Fe_{\text{общ}}$ (Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель), Pb (Белое, Ытык-Кюель) и Ni (Белое, Сайсары).

Заключение.

1. Воды исследуемых озер города Якутска характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом, средней минерализацией, слабощелочной средой и умеренной жесткостью. Значительные вариации анионов и катионов связаны в основном с сезонными колебаниями и проточностью городских озер. Городские озера получают питание от р. Лена, и в результате пополнения за счет речного стока наблюдается существенное изменение в гидрохимическом составе озерных вод.

2. Колебания значений жесткости, органолептических свойств и взвешенных веществ озерных вод совпадают с периодами сезонной динамики. Максимальный пик жесткости воды приходится на август, минимальный – на май. С нарастанием жизнедеятельности организмов и фотосинтетических процессов запах и цветность воды усиливается от весны до осени.

3. Минерализация озерных вод закономерно увеличивается с антропогенным воздействием. Пики минерализации зафиксированы в 2018 и 2020 гг. в озерах Хатынг-Юрях и Белое (до $930,82 \text{ мг/дм}^3$ и $910,41 \text{ мг/дм}^3$ соответственно) в связи с низким количеством атмосферных осадков в эти годы и с повышенной хозяйственной деятельностью.

4. В составе биогенных веществ доминируют NO_3^- , NH_4^+ и SO_4^{2-} . С 2014 г. фиксируется усиление процессов разложения органических остатков в условиях более медленного окисления ионов NO_3^- , NO_2^- и NH_4^+ , приводящее к ухудшению санитарного и экологического состояния водоемов.

5. Анализ содержания взвешенных веществ в исследуемых озерных водах в теплый период времени выявил трансформационные изменения, по которым озера Хатынг-Юрях и Сергелях отнесены к слабой, Ытык-Кюель – к средней, Белое и Сайсары – к сильной трансформации.

6. Микроэлементный состав соответствует следующей схеме: $Pb > Ni > Fe_{\text{общ}} > Zn > Mn > Cu > Co > Cr$. Превышение ПДК отмечены по Pb, Ni, $Fe_{\text{общ}}$ и Zn. Выявлена прямая и обратная связь между указанными элементами и минерализацией, водородным показателем pH и температурным режимом воздуха.

7. По результатам корреляционного и факторного анализа, на гидрохимический состав вод преимущественное влияние оказывают минерализация, жесткость воды и катионно-анионный состав.

8. Основными поллютантами, осложняющими эколого-геохимическое состояние озерных вод, являются высокое содержание взвешенных веществ – $Fe_{\text{общ}}$, Pb и Ni. В озерах выявлено загрязнение вод, характеризующееся аномально высокими содержаниями взвешенных веществ, что соответствует сильному загрязнению с высоким риском. Легкое загрязнение с низким риском

наблюдается по $Fe_{\text{общ}}$ (Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель), Pb (Белое, Ытык-Кюель) и Ni (Белое, Сайсары).

На основе проведенных исследований создана база данных (Реестр гидрохимического состава озер г. Якутска за 2009–2022 гг.), которая является удобным инструментом для сбора, систематизации, группировки и хранения материалов.

Выводы сделаны на основе многолетних исследований, проводимых с высокой частотой наблюдений, вследствие чего погрешность сводится к минимальным значениям. В результате проведенной описательной статистики рассчитаны средние значения основных показателей качества озерных вод городских территорий, которые могут быть основой для дальнейшего гидрогеохимического мониторинга поверхностных вод г. Якутска и служить фоновыми показателями.

Таким образом, в работе представлена сложная структура оценки гидрохимического состава городской озерной воды, отягощенная природными факторами, в первую очередь экстроконтинентальным климатом и многолетнемерзлыми породами в совокупности с все возрастающим влиянием антропогенного воздействия.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 01.07.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенин А.А., Белоусова Н.В. Гидрохимический словарь. Ленинград, Гидрометеиздат (1988), 238.
2. Bashir I., Lone F.A., et al. Concerns and Threats of Contamination on Aquatic. *Ecosystems Bioremediation and Biotechnology* **27** (2020), 1–26.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-35691-0_1
3. Noori R., Ansari E., et al. Hyper-Nutrient Enrichment Status in the Sabalan Lake. *Water* **13** (2021), 28–44.
<https://doi.org/10.3390/w13202874>
4. Руфова А.А., Ксенофонтова М.И. Гидрохимический состав, как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска). *Наука и образование* **2** (2015), 162–170.
5. Бобренко Е.Г., Рослякова А.Н. Источники загрязнения экосистемы озера в черте города. Электронный научно методический журнал Омского ГАУ **3** (2018).
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>
6. Lukman L. Anthropogenic Impact on Lake Ecosystem. In Book: *Science of Lakes – Multidisciplinary Approach* (ed. by A.A. Assani) (2023), 303.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.112179>
7. Lahens L., Correa J.A., et al. Influence of Anthropogenic Activities on the Trace Organic Contamination of Lakes. *Science of The Total Environment* **949** (2024), 175087.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175087>
8. *Реки и озера Якутии* (ред. В.И. Агеев). Якутск, Бичик (2007), 136.
9. Spearman C. General Intelligence. Objectively Determined and Measured. *American Journal of Psychology* **15** (1904), 201–292.
10. Иберла К. *Факторный анализ*. Москва, Статистика (1980), 398.

11. Чистяков Г.Е. *Водные ресурсы рек Якутии*. Москва, Наука (1964), 256.
12. Макаров В.Н., Седелникова А.Л. *Экогеохимия городских озер Якутска*. Якутск, ИМЗ (2016), 207.
13. Саввинов Д.Д., М.П. Макарова и др. Микроэлементы в почвах пригородной зоны г. Якутска. *Наука и образование* **2** (2014), 7–10.
14. Pestryakova L.A., Gorodnichev R., et al. The Sensitivity of Diatom Taxa from Yakutian Lakes (North-Eastern Siberia) to Electrical Conductivity and Other Environmental Variables. *Polar research* **37** (2018), 1485625.
15. Даувальтер В.А. и др. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле* **66** (2020), 252–266.
16. Бакаев В.А., Савченко Н.В. Зональные особенности гидрохимического состояния малых озер Новосибирской области. *Мир науки, культуры, образования* **5** (2013), 430–435.
17. Габышев В.А., Габышева О.И. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фито-планктона озер г. Якутска и окрестностей. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики* **25** (2020), 81–91.
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6>

Ա. Ա. ՌՈՒՖՈՎԱ

ՅԱԿՈՒՏՍԿ ՔԱՂԱՔԻ ՏԱՐԱԾՔՈՒՄ ԳՏՆՎՈՂ ՔԱՂԱՔԱՅԻՆ
ԼՃԵՐԻ ՋՐԻ ԵՐԿՐԱՔԻՄԻԱ

Ա մ փ ո փ ու մ

Յակուտսկի ամենամեծ լճերի (Բելոյե, Խատինգ-Յուրյախ, Իտիկ-Կյուել, Սերգելյախ, Սախսարի) հիդրոքիմիական կազմը վերլուծվել է 2009–2023 թվականներին անցկացված համապարփակ ուսումնասիրության հիման վրա: Ուսումնասիրված լճերը հիմնականում կազմված են նատրիումի հիդրոկարբոնատից՝ միջին հանքայնացմամբ և չափավոր կոշտ ջրով: Կատիոնների ընդհանուր ծավալում հիմնական դերը ունեն Na^+ և Ca^{2+} , անիոնների ընդհանուր ծավալում՝ HCO_3^- և Cl^- : Նկատվում է հանքայնացման նվազում՝ մոտավորության ցածր հուսալիության արժեքով: Ջրի կոշտության արժեքների տատանումը անմիջականորեն կախված է Ca^{2+} , Mg^{2+} և HCO_3^- կատիոնների պարունակությունից: Կախված պինդ նյութերի պարունակության միջին արժեքները զգալիորեն ավելի բարձր են, քան գոյություն ունեցող ՄԹԿ-ները, դրանց փոփոխությունը յուրաքանչյուր լճում անհատական է, ամենաբարձրը հայտնաբերվել է Բելոյե, Սախսարի և Խատինգ-Յուրյախ լճերում: Հիդրոքիմիական ռեժիմի ձևավորման ամենակարևոր գործոնը ջրի հանքայնացումն ու կոշտությունն է: Սահմանված օրինաչափությունները ընդհանուր առմամբ բնորոշ են ամբողջ նմուշի համար, ինչը արտացոլում է քաղաքային լճերի հիդրոքիմիական ռեժիմի ձևավորման առանձնահատկությունները: Միկրոէլեմենտների կազմը բնութագրվում է Pb-ի, Ni-ի և Fetotal-ի բարձր կոնցենտրացիաներով: Էկոլոգիական և երկրաքիմիական վերլուծությունը ցույց է տվել, որ ամենաաղտոտված լճերն են Բելոյե, Սախսարի և Խատինգ-Յուրյախ լճերը:

A. A. RUFOVA

GEOCHEMISTRY OF URBAN LAKE WATERS IN THE TERRITORY
OF THE YAKUTSK CITY

Summary

The hydrochemical composition of the largest lakes in Yakutsk – Beloye, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kyuel, Sergelyakh, Saisary, was analyzed based on a comprehensive study from 2009 to 2023. The studied lakes are predominantly sodium hydrocarbonate with medium 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. A decrease in mineralization with a low approximation reliability is observed. Variation in water hardness values directly depends on the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} cations and HCO_3^- . The average value of suspended solids is significantly higher than the existing Maximum Concentration Limit (MCL), the change in their content in each lake is individual, the highest was found in lakes Beloye, Saisary and Khatyng-Yuryakh. The most significant factor in the formation of the hydrochemical regime is mineralization and water hardness. The established patterns are characteristic in general for the entire sample, which reflects the specifics of the formation of the hydrochemical regime of urban lakes. The microelement composition is characterized by an increase in the concentrations of Pb, Ni and Fe. Ecological and geochemical analysis showed that the most polluted lakes are Beloye, Saisary and Khatyng-Yuryakh.