

Донные отложения озер г. Якутск как динамичная геокриолого-геохимическая система

В. Н. Макаров, А. Л. Седельникова

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ vnmakarov@mpi.ysn.ru

Аннотация

Рассматриваются результаты геохимического изучения донных отложений озер г. Якутск в 1998–2021 гг. На протяжении периода мониторинга химический состав донных озерных отложений остается постоянным – сульфатным смешанным по составу катионов с преобладанием кальция, но наблюдаются существенные изменения их солености. На фоне общей тенденции понижения солености этих отложений с трендом около 0,018 %/год происходит формирование кратковременных положительных аномалий солености и продолжительные периоды опреснения. Последнее определяется снижением плотности атмосферных выпадений. При относительно постоянной величине техногенных выбросов в атмосферу города резкие изменения объемов атмосферных выпадений связаны с климатическими факторами, влияющими на динамику колебания солености донных отложений городских озер. Криогенная метаморфизация донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер: в глубокой части они мало минерализованные преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные, в мелководной более засоленные сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные.

Ключевые слова: геохимия, город, озера, донные отложения, соленость, атмосферные выпадения, криогенная метаморфизация

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690008-9).

Для цитирования: Макаров В.Н., Седельникова А.Л. Донные отложения озер г. Якутск как динамичная геокриолого-геохимическая система. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):381–392. [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381–392](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381-392)

Bottom sediments of the city lakes as a dynamic geocryological and geochemical system

V. N. Makarov, A. L. Sedelnikova

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ vnmakarov@mpi.ysn.ru

Abstract

We studied the bottom sediments of the lakes in Yakutsk in the period of 1998–2021. During the monitoring period, we observed that the chemical composition of the bottom lake sediments remained constant. The analyses showed their sulfate composition, with mixed cations, where calcium predominated, and significant changes in their salinity. Against the general background of salinity decrease in these deposits (0.018 % per year), we have noted a formation of short-term positive anomalies of salinity and long periods of desalination. The latter is determined by a decrease in the density of atmospheric fallout. Though the atmosphere in the city was under a relatively constant value of technogenic emissions, sharp changes in the volume of atmospheric precipitation were associated with the climatic factors. They affected the dynamics of salinity fluctuations in the bottom sediments of the lakes under study. Cryogenic metamorphization of the bottom sediments occurred unevenly in different parts of the lakes. In the deep parts they were poorly mineralized. Their composition was predominantly sulfate-hydrocarbonate. In the shallow parts of the lakes, they were more of saline sulfate or hydrocarbonate-sulfate composition.

Keywords: geochemistry, city, lakes, bottom sediments, salinity, atmospheric fallout, cryogenic metamorphization

Funding. This study was supported by the Complex Program of Foundation Scientific Research SB RAS (project no SB RAS AAAA-A20-120111690008-9).

For citation: Makarov V.N., Sedelnikova A.L. Bottom sediments of city lakes as a dynamic geocryological and geochemical system. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):381–392. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381-392>

Введение

Донные отложения (ДО) – донные наносы и твердые частицы, образовавшиеся и осевшие на дно водного объекта в результате внешних (атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток) и внутриводоемных физико-химических и биохимических процессов, происходящих с веществами как естественного, так и техногенного происхождения, и находящиеся во взаимодействии с водными массами [1]. Состав донных отложений отражает совокупность биологических, химических и физических процессов, происходящих в водоеме. Донные озерные отложения ярко отражают химические особенности вод и являются индикаторами их состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения. Концентрируя значительные запасы различных веществ, они способны поставлять их обратно в воду и быть вторичным источником ее загрязнения.

Донные отложения в селитебных зонах формируются под воздействием сложной совокупности техногенных и природных процессов: климатических, гидрологических, гидрогеологических, геокриологических, физических, химических, биологических и других, протекающих как в самом озере, так и на его водосборной площади [2]. Донные отложения являются неотъемлемой составляющей озерной системы и считаются более инертной средой по сравнению с водой, обладающими свойством «запоминать» как природные, так и антропогенные воздействия, оказываемые на водоем.

В донных отложениях содержится информация об изменении озерных экосистем под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов на протяжении всей истории водоема. Озерный ил формируется в озерах в течение сотен и даже тысяч лет, однако возраст донных отложений большинства крупных стоячих водоемов в районе Якутска не превышает 100 лет, так как они были проточными еще 60–70 лет назад.

Изучение донных отложений – одно из важных направлений в геохимии [3–5; и др.]. Геохимия донных отложений (ДО) малых озерных систем рассматривалась в работах российских и зарубежных ученых [4–13; и др.]. Проблемы фор-

мирования химического состава озерных систем в криолитозоне и их экологическое значение привлекали внимание якутских ученых [14–19; и др.].

Авторами впервые осуществлено комплексное геохимическое исследование системы атмосферные осадки–вода и донные отложения городских озер. Объектами исследования послужили 40 озер, занимающих около 12 % территории г. Якутск [19]. Особое внимание уделено крупным озерам города, обладающим собственными названиями, имеющим многолетнюю историю, важное культурное и рекреационное значение. Показана геохимическая неоднородность формирования химического состава ДО озер под влиянием климатических (атмосферные осадки) и мерзлотных условий.

Методы и материалы исследования

Геохимическое изучение ДО озер г. Якутск поведено авторами в 1998–2021 гг. Донные отложения отбирались в зонах аккумуляции озер, где создаются условия седиментации мелкодисперсного материала с хорошими сорбционными способностями. В пробу поступала тонкая илистоглинистая или песчаная фракция озерных отложений. Расположение точек отбора донных проб соответствовало пунктам отбора проб озерных вод.

Пробы ДО отбирались при помощи лопатки и специального пробоотборника ТГ-5 на глубине 0,5–0,6 м из всех озер на расстоянии 0,5–1,5 м от берега в доступных (прибрежных) местах озер и из керна буровых скважин, пройденных со льда озер при создании в 2009–2011 гг. системы геокриологического мониторинга [19]. Масса отбираемой пробы обеспечивала получение из нее при последующей обработке выхода заданной фракции в объеме не менее 200 г.

Для оценки величины поступления вещества из атмосферы на акваторию озер использовались результаты круглогодичного мониторинга химического состава атмосферных осадков на комплексном геокриологическом стационаре Туймаада ИМЗ СО РАН. В течение всего периода наблюдений рассчитывался годовой объем атмосферных выпадений на единицу площади – плотность выпадений в г/м² или кг/км² [20].

Аналитическая обработка геохимических проб ДО и атмосферных осадков проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова, Р.М. Петухова, О.В. Шепелева) и в лаборатории Республиканского информационно-аналитического центра экологического мониторинга (РИАЦЭМ) министерства экологии РС(Я).

В озерных водах, донных отложениях и атмосферных осадках определялось содержание макрокомпонентов: SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; электропроводность, показатели pH и Eh.

Камеральные методы включали статистическую и графическую обработку данных в различных программах (Excel, статистика, Corel, SASPlanet, Surfer и другие), их интерпретацию и сравнение с актуальной литературой.

Результаты исследования

Донные отложения городских водоемов Якутска в большинстве случаев имеют песчаный со-

став с остатками детрита. Отложения, отобранные глубинными пробоотборниками и вскрытые буровыми скважинами, представлены илистым суглинком с прослоями песка мощностью 0,8–1,5 м (озера Сергелях, Теплое, Ытык-Кюель) или торфом, суглинками, пескам мощностью 1,7 м (оз. Сайсары).

Практически невозможно говорить о геохимии донных отложений, не учитывая химического состава озерных вод. Поэтому состав воды озер будет обсуждаться по мере необходимости для выяснения различных аспектов геохимии озерных отложений. Химический состав воды городских озер в начальный период наблюдений 1998–2013 гг. оставался постоянным гидрокарбонатно-хлоридным смешанным по катионам с преобладанием натрия. В последующий почти десятилетний период до 2021 г. происходило опреснение озерных вод, химический состав которых становится хлоридно-гидрокарбонатным, при сохранении соотношения катионов (табл. 1).

Химический состав донных отложений существенно отличается от озерных вод и не претерпел заметных изменений в период наблюдений.

Таблица 1

Химический состав воды и ДО городских озер в период мониторинга

Table 1

Chemical composition of water and BS in urban lakes during the monitoring period

| Проба / Sample | 1998 | 2004 | 2009 | 2013 |
|---|--|---|--|---|
| Вода / Water | <u>C1 49 C 41 S 10</u> Na61 Mg20 Ca13 K5 | <u>C1 55 C 32 S 13</u> Na62 Mg23 Ca12 K3 | <u>C 49 Cl 45 S 6</u> Na59 Mg23 Ca15 K3 | <u>C1 47 C 45 S 8</u> Na52 Mg24 Ca18 K4 |
| Донные / Bottom sediments | <u>S 40 C 34 Cl 11</u> Na+K38 Mg 32 Ca 21 | <u>S 72 C 15 Cl 13</u> Ca 37Na30Mg 27 K3 | <u>S 68 Cl 16 C 15</u> Ca38 Na36 Mg22K3 | <u>S 72 Cl 13 C 12</u> Ca 44 Na 30Mg 23 K2 |
| Минерализация, мг/л/соленость, % / Water mineraliz., mg/l / salinity, % | 909/0,079 | 799/0,158 | 775/0,096 | 601/0,108 |
| | 2015 | 2016 | 2019 | 2020 |
| Вода / Water | <u>C 58 Cl 34 S 8</u> Na54 Ca22 Mg16 K8 | <u>C 59 Cl 34 S 7</u> Na59 Ca18 Mg16 K7 | <u>C 59 Cl 34 S 6</u> Na58 Mg19 Ca16 K7 | <u>C 72 Cl 23 S 5</u> Na51 Ca22 Mg21 K7 |
| Донные / Bottom sediments | <u>S 80 Cl 14 C 5</u> Mg38 Ca37 Na25 K1 | <u>S 73 Cl 15 C 12</u> Na48 Ca 32 Mg 19 K1 | <u>S 68 Cl 16 C 15</u> Ca38 Na36 Mg22K3 | <u>S 76 Cl 12 C 12</u> Ca 44 Mg 33 Na21 K2 |
| Минерализация, мг/л/соленость, % / Water mineraliz, mg/l / salinity, % | 515/0,148 | 773/0,128 | 656/0,099 | 551/0,027 |

Примечание. В формуле Курлова C – HCO_3^- , S – SO_4^{2-} .

Note. In the Kurlov formula C – HCO_3^- , S – SO_4^{2-}

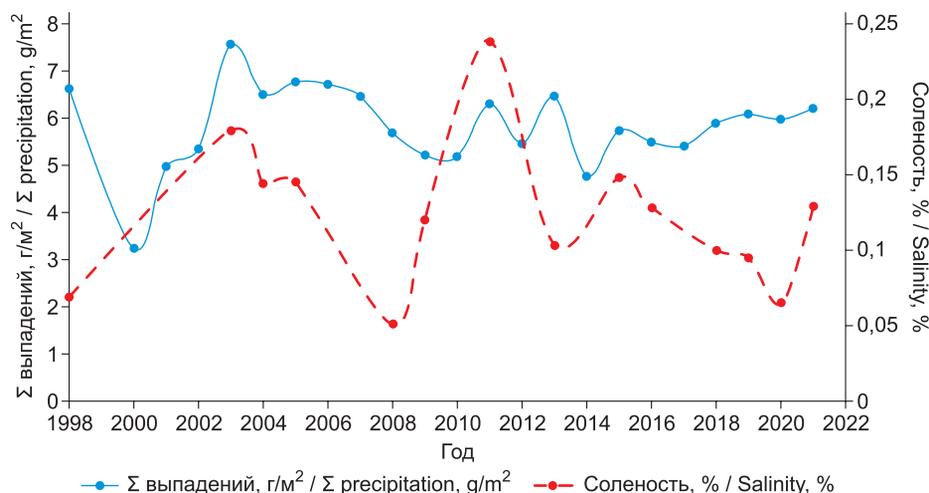


Рис. 1. Зависимость изменения солености ДО от плотности атмосферных выпадений.

Fig. 1. Dependence of BS salinity change on atmospheric fallout density.

Водорастворимая их фаза остается постоянно сульфатной смешанной по составу катионов с незначительным преобладанием кальция (см. табл. 1).

По величине рН донные осадки на протяжении почти всего мониторинга нейтральные-слабощелочные, но в последние пять лет наблюдений становятся слабокислыми (рН = 6,34–6,91), как и атмосферные осадки района [20].

Для ДО характерен следующий порядок распределения главных ионов по уменьшению концентрации: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ и $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ [19].

Наибольший размах изменения среднегодовых значений концентрации (мг-экв/100 г) – в 2–3 раза характерен для ионов: Mg^{2+} (0,301–0,932), Na^+ (0,203–0,488) и SO_4^{2-} (0,347–0,752). Стабильностью содержания в донных отложениях характеризуются гидрокарбонаты ($\text{HCO}_3^- = 0,366–0,372$ мг-экв/100г).

Донные отложения отличаются значительным диапазоном колебания среднегодовой величины солености, которая изменяется в пределах 0,042–0,236 %, при среднем значении на протяжении мониторинга 0,127 %. Примером такой контрастности являются данные за 2013 и 2020 гг., когда величина солености изменялась почти в два раза при постоянстве химического состава (табл. 2).

Несмотря на относительную стабильность химического состава и солености донных отложений (диапазон среднегодовых колебаний Dsal составляет 50–60 %), можно выделить продолжительные периоды понижения солености ДО в

озерах: семилетний (2002–2008 гг.) и десятилетний (2012–2021 гг.), которые последовали после контрастных положительных аномалий солености в 2003 и 2011 гг. Величина солености донных отложений в первый период понизилась с 0,236 до 0,042 %, их опреснение происходило постоянно, с трендом около 0,03 %/год. Во второй период соленость донных отложений понизилась на 0,175 % (с 0,24 до 0,07 %) с трендом около 0,016 %/год, т. е. примерно в два раза умереннее, чем в 2002–2008 гг.

В эти же периоды синхронно с понижением солености донных отложений снижался объем атмосферных выпадений. Особенно тесное совпадение между этими параметрами наблюдалось в 2002–2008 гг., когда за семь лет объем атмосферных выпадений уменьшился с 7,55 до 5,56 г/м² – на 26 %, с интенсивностью 0,27 г/м² год. В период 2012–2021 гг. поступление из атмосферы на поверхность оставалось практически на одном уровне в пределах 4,76–6,45 г/м², в среднем 6,06 г/м² (2011–2013 гг.) и, в отличие от первого периода, наблюдалось очень слабое понижение величины атмосферных выпадений с трендом около 0,01 г/м² (рис. 1).

Судя по изменению соотношения плотности атмосферных выпадений и величины солености ДО в озерах в 1998–2021 гг., можно полагать, что поступление осадков на поверхность акватории озер 0,05–0,09 г/м²·год приводит к засолению ДО на 0,02–0,03 %.

Изменение солености ДО озер на территории города в периоды с максимальной контрастностью

Химический состав ДО в периоды высокой контрастности солености

Chemical composition of BS during periods of high salinity contrast

| Компонент / Component | 2013 г. | | | 2020 г. | | | Среднее / Average 2013/2020 |
|---|--|----------------|------------------|--|---------------|------------------|-----------------------------------|
| | Среднее / Average | Мин. / Min. | Максим. / Max | Среднее / Average | Мин. / Min | Максим. / Max | |
| pH | 7,45 | 6,93 | 8,00 | 6,75 | 6,49 | 7,28 | 1,10 |
| Eh, мВ | 349 | 307 | 368 | 516 | 494 | 560 | 0,67 |
| Соленость, % 100 г / salinity, % 100g | 0,101 | 0,021 | 2,058 | 0,065 | 0,014 | 0,483 | 1,55 |
| мг-экв/100 г | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,751 | 0,145 | 12,594 | 0,513 | 0,064 | 3,391 | 1,46 |
| Mg ²⁺ | 0,932 | 0,014 | 9,301 | 0,301 | 0,060 | 3,109 | 3,10 |
| Na ⁺ | 0,488 | 0,074 | 8,196 | 0,203 | 0,052 | 2,826 | 2,40 |
| K ⁺ | 0,041 | 0,006 | 0,639 | 0,024 | 0,006 | 0,081 | 1,71 |
| NH ₄ ⁺ | 0,013 | 0,003 | 0,183 | 0,009 | 0,003 | 0,028 | 1,44 |
| HCO ₃ ⁻ | 0,366 | 0,106 | 1,371 | 0,372 | 0,156 | 1,340 | 0,98 |
| SO ₄ ²⁻ | 0,752 | 0,027 | 26,771 | 0,347 | 0,026 | 4,896 | 2,17 |
| Cl ⁻ | 0,280 | 0,085 | 4,225 | 0,211 | 0,073 | 1,829 | 1,33 |
| NO ₂ ⁻ | 0,003 | 0,0002 | 0,082 | 0,001 | 0,0002 | 0,014 | 3,00 |
| NO ₃ ⁻ | 0,039 | 0,003 | 0,794 | 0,014 | 0,003 | 0,087 | 2,79 |
| мг/л | | | | | | | |
| F ⁻ | 0,075 | 0,000 | 1,074 | 0,229 | 0,061 | 0,948 | 0,33 |
| Si ²⁺ | 0,005 | 0,000 | 4,389 | 0,129 | 0,021 | 1,71 | 0,04 |
| Li ⁺ | 0,003 | 0,000 | 0,045 | 0,000 | <0,001 | 0,028 | 0,003 |
| Ba ²⁺ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,048 | 0,003 | 0,185 | – |
| HPO ₄ ²⁻ | 0,222 | 0,000 | 2,824 | 0,093 | 0,00 | 0,276 | 2,39 |
| Атм. осадки, мм / atmospheric precipitation, mm | 302 | | | 216 | | | 1,4 |
| АВ, т/км ² | 6,45 | | | 5,97 | | | 1,1 |
| Химический состав / chemical composition | S 72 Cl 13 C 12 Ca 44 Na 30Mg 23 K2 | | | S 76 Cl 12 C 12 Ca 44 Mg 33 Na21 K2 | | | |

накопления солей: высокая соленость – 2013 г., минимальная – 2020 г., показано на рис. 2.

Опреснение ДО в 2020 г. затронуло практически все городские озера. Особенно заметно уменьшение солености ДО в центральной и южной частях Якутска: озера Сергелях, Хомустах, Ытык-Кюель.

Изменение плотности атмосферных выпадений оказывает определяющее влияние не только на химический состав воды озер, как было отмечено авторами ранее [18], но и на минерализа-

цию ДО, с характерными контрастными межгодовыми флуктуациями.

По данным ЯУГМС, выбросы в атмосферу стационарными источниками загрязнения воздуха, расположенными на территории города, в период 1998–2020 гг. равномерно снижались (рис. 3) с трендом около 0,1 тыс. т в год: от 12,6 тыс. т (среднее в 1998–2002 гг.) до 10,3 (среднее в 2016–2020 гг.).

При равномерном уровне техногенных выбросов в атмосферу наблюдаемые в ходе мо-

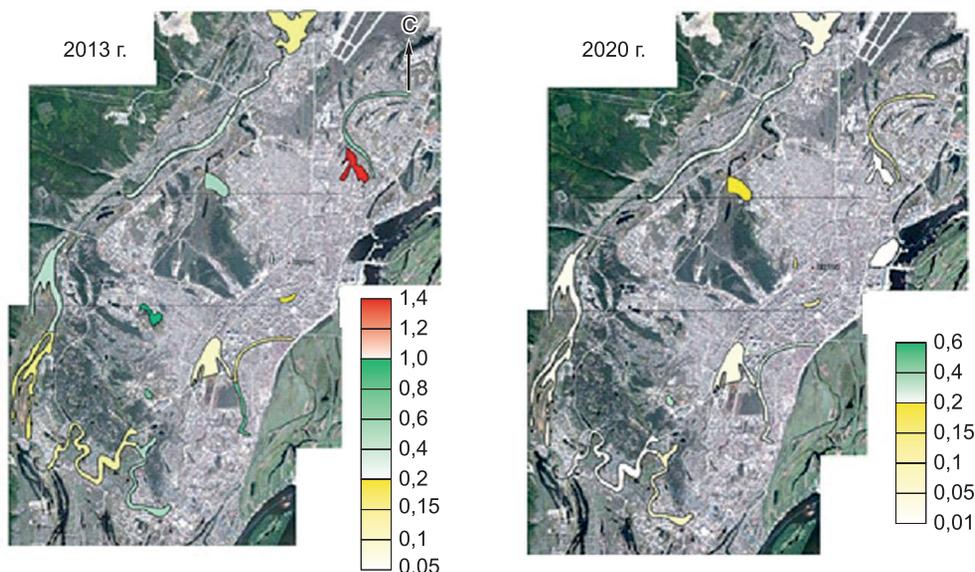


Рис. 2. Изменение солености ДО городских озер, % (г/100 г).

Fig. 2. Change in salinity of BS in urban lakes, % (g/100 g).

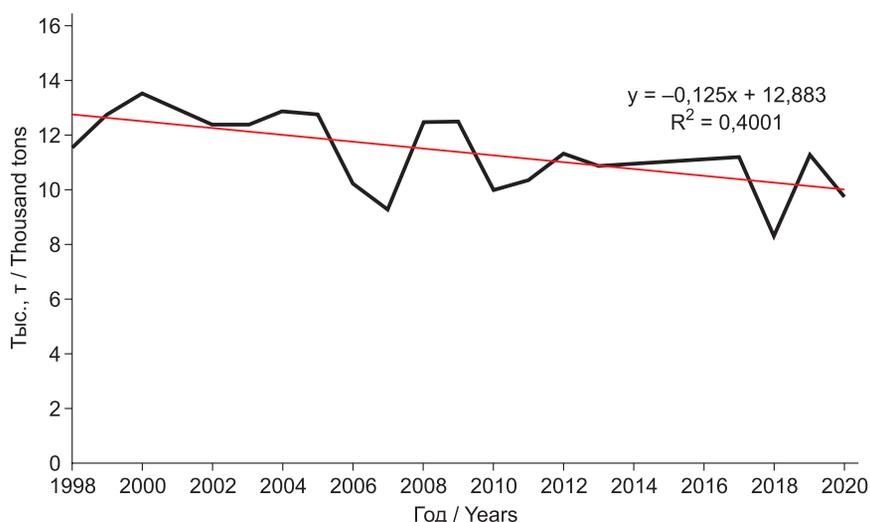


Рис. 3. Выбросы в атмосферу Якутска стационарными источниками загрязнения воздуха.

Fig. 3. Emissions into the atmosphere of Yakutsk from stationary sources of air pollution.

ниторинга периодические резкие колебания величины солености донных озерных отложений Якутска могут быть обусловлены климатическими факторами – региональным переносом воздушных масс.

Опреснение донных отложений озер города сопровождается понижением концентрации ионов хлора, натрия и магния. Между соленостью донных отложений и содержанием этих ионов наблюдается высокая значимость корреляционных связей.

Донные отложения водоемов формируются главным образом из материала, поступающего с территории водосбора с атмосферными осадками и образующегося в самом водоеме, следовательно, химический состав донных отложений является характеристикой этих показателей.

По химическому составу дождевые воды мало минерализованные, слабокислые, гидрокарбонатно-кальциевые с относительно высоким содержанием азотистых соединений. Для большинства компонентов диапазон колебаний

концентрации в период май–сентябрь изменяется в пределах от 2–3 единиц (основные катионы и анионы) до одного порядка – для соединений азота и даже двух – для стронция и фосфатов.

По химическому составу снежный покров хлоридно-гидрокарбонатный преимущественно кальциевый, слабощелочной pH = 7,30 (табл. 3).

Расчеты плотности атмосферных выпадений (Pn) в холодное и теплое время года показали, что объем «теплых» выпадений на два порядка выше, чем «холодных». Поэтому химический состав озерных вод на территории города определяется главным образом поступлением слабоминерализованных гидрокарбонатно-кальциевых дождевых вод. Плотность выпадений

сульфатов составляет от 6 до 10 % от общего объема поступления из атмосферы.

На химический состав растворимой части донных осадков большое влияние оказывают мерзлотные условия, существующие на дне озер. Криогенная метаморфизация ДО протекает наиболее интенсивно в береговой мелководной зоне с высокой динамикой температуры (от –2,6 в марте до 2,2 °С в октябре) в отличие от более глубокой части озер. В зимний период температура воды в более глубоководной части городских озер от +0,6 до +1,9 °С, а температура ДО озер не опускается ниже +2,1 °С (табл. 4).

На состав ДО и воды влияют криогенные физико-химические процессы, действующие в

Таблица 3

Химический состав атмосферных осадков на территории Якутска

Table 3

The chemical composition of atmospheric precipitation on the territory of Yakutsk

| Вид осадков / Precipitation | Минерализация, г/л / Mineralization, g/l | Химический состав / Chemical composition | pH | Pn, мг/(м ² ·сут) / mg/(m ² /day) |
|-----------------------------|--|---|------|---|
| Дождь / Rain | 0,025 | C 73 Cl 12 S 9 NO ₃ ⁻ 4 NO ₂ 2 | 6,13 | 10,80 |
| | | Ca 49 K 18 Na 13Mg 11 NH ₄ 9 | | |
| Снег / Snow | 0,041 | C 67 Cl 20 S 9 NO ₃ 3 NO ₂ 1 | 7,30 | 0,173 |
| | | Ca 52 Mg 19 Na 16 NH ₄ 12 K 1 | | |

Таблица 4

Температура придонной воды и ДО озер

Table 4

Bottom water temperature and BS lakes

| Озеро / Lake | Вода, донные отложения / Water, bottom sediments | Глубина, м / Depth, m | t, °C | Источник / Source |
|-------------------------|--|-----------------------|---------|--|
| Бтык-Кюель / Ytyk-Kyuol | Вода | 2,0 | 1,9 | по данным В.В. Куницкого, И.В. Дорофеева, И.И. Сыромятникова |
| | Ил (илистый суглинок) темно-серый, с горизонтальной и волнистой слоистостью за счет прослоев песка, озерный, талый | 3,0 | 3,2 | |
| | | 4,0 | 3,8 | |
| Теплое / Teploe | Вода | 3,0 | 1,6 | |
| | Суглинок (ил) черный, с тонкими прослоями песка и сильным гнилостным запахом, талый | 4,0 | 2,1 | |
| | Супесь темно-серая, тяжелая, с тонкими прослоями мелкого песка, талая | 5,0 | 2,4 | |
| Сергелях / Sergelyakh | Вода | 2,0 | 0,6 | |
| | Суглинок коричневый, пластичный, талый | 3,0 | 2,5 | |
| | Супесь темно-серая, легкая, слабо заиленная, с небольшими прослоями коричневого суглинка, талая | 4,0 | 3,3 | |
| Сайсары / Saisar | Вода (ноябрь–март) | 5,0 | 2,2–3,2 | [21] |

Химический состав ДО в глубоководной и береговой зонах городских озер

Table 5

The chemical composition of BS in the deep and coastal zones of city lakes

| Скважина глубина, м / Well depth, m) | pH | Eh, mv | Ед. изм. / un rev | Содержание катионов / Content of cations | | | | | Содержание анионов / Content of anions | | | | Соленость / Salinity) |
|--|------|-----------|-------------------------|---|------------------|-----------------|----------------|------------------------------|---|-------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| | | | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | NH ₄ ⁺ | HCO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | |
| Белое | | | | | | | | | | | | | |
| скв. 25 (well 25) 0,4 | 8,00 | 399 | МГ-ЭКВ | 2,345 | 3,389 | 10,435 | 0,336 | 0,161 | 1,240 | 8,998 | 5,527 | 0,273 | 32,704 |
| | | | % | 14 | 20 | 63 | 2 | 1 | 8 | 56 | 34 | 2 | 1,006 |
| Берег (Shore) 0,2 | 6,91 | 431 | МГ-ЭКВ | 0,214 | 0,191 | 0,150 | 0,018 | 0,003 | 0,215 | 0,208 | 0,100 | 0,037 | 1,136 |
| | | | % | 37 | 33 | 26 | 3 | 0 | 38 | 37 | 18 | 7 | 0,031 |
| Сергелях | | | | | | | | | | | | | |
| скв. 62 (well 62) 2,2 | 6,27 | 490 | МГ-ЭКВ | 0,146 | 0,092 | 0,148 | 0,008 | 0,014 | 0,210 | 0,171 | 0,124 | 0,003 | 0,916 |
| | | | % | 36 | 23 | 36 | 2 | 3 | 39 | 32 | 23 | 5 | 0,027 |
| Берег (Shore) 0,2 | 7,18 | 422 | МГ-ЭКВ | 1,233 | 0,793 | 0,307 | 0,023 | 0,011 | 0,385 | 1,875 | 0,058 | 0,040 | 4,725 |
| | | | % | 52 | 34 | 13 | 1 | 1 | 16 | 79 | 2 | 2 | 0,146 |
| Теплое | | | | | | | | | | | | | |
| скв. 61 (well 61) 4,5 | 6,73 | 443 | МГ-ЭКВ | 0,409 | 0,294 | 0,833 | 0,084 | 0,064 | 0,316 | 0,686 | 0,779 | 0,055 | 3,520 |
| | | | % | 24 | 18 | 50 | 5 | 3 | 17 | 37 | 42 | 3 | 0,105 |
| Берег (Shore) 0,2 | 7,01 | 414 | МГ-ЭКВ | 0,532 | 0,298 | 0,087 | 0,033 | 0,008 | 0,304 | 0,563 | 0,053 | 0,048 | 1,926 |
| | | | % | 56 | 31 | 9 | 3 | 1 | 31 | 58 | 6 | 5 | 0,056 |
| Ытык-Кюель | | | | | | | | | | | | | |
| Скв. 1 (well 1) 0,5 | 6,80 | 427 | МГ-ЭКВ | 0,145 | 0,109 | 0,274 | 0,048 | 0,107 | 0,244 | 0,171 | 0,115 | 0,005 | 1.218 |
| | | | % | 21 | 16 | 40 | 7 | 16 | 46 | 32 | 22 | 0,2 | 0,034 |
| Берег (Shore) 0,2 | 6,51 | 466 | МГ-ЭКВ | 0,509 | 0,347 | 0,087 | 0,011 | 0,003 | 0,154 | 0,781 | 0,025 | 0,060 | 1,977 |
| | | | % | 53 | 36 | 9 | 1 | 0 | 15 | 76 | 2 | 6 | 0,060 |

озерном режиме. Криогенная метаморфизация растворимой фазы ДО озер детально рассмотрена [14, 17].

Криогенная метаморфизация растворимой фазы донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер: более интенсивна в береговой зоне, подверженной значительным температурным колебаниям, и менее заметна в глубоководной части озер, где температурные флуктуации значительно меньше. Различия процессов криогенной метаморфизации отражаются на изменении химического состава ДО в различных частях озер (табл. 5).

По расположению точек химического состава донных осадков на диаграмме (рис. 4) можно по-

лучить представление об источниках и характере изменения их солевого состава.

Основная масса донных отложений глубокой части озер, на глубине от 2 до 3,6 м, слабкокислые (pH = 6,27–6,80), мало минерализованные (Dsal от 0,027 до 0,105 %), преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные с содержанием соединений азота (в среднем мг-экв.): NO₃⁻ – 0,021, NH₄⁺ – 0,062 (табл. 6).

Значительная часть донных осадков мелководной прибрежной части озер смешанные по химическому составу, но тяготеют к гипсовому типу. Они более засолены (Dsal 0,253 %) и отличаются значительным диапазоном колебания величины солености, которая изменяется в пределах

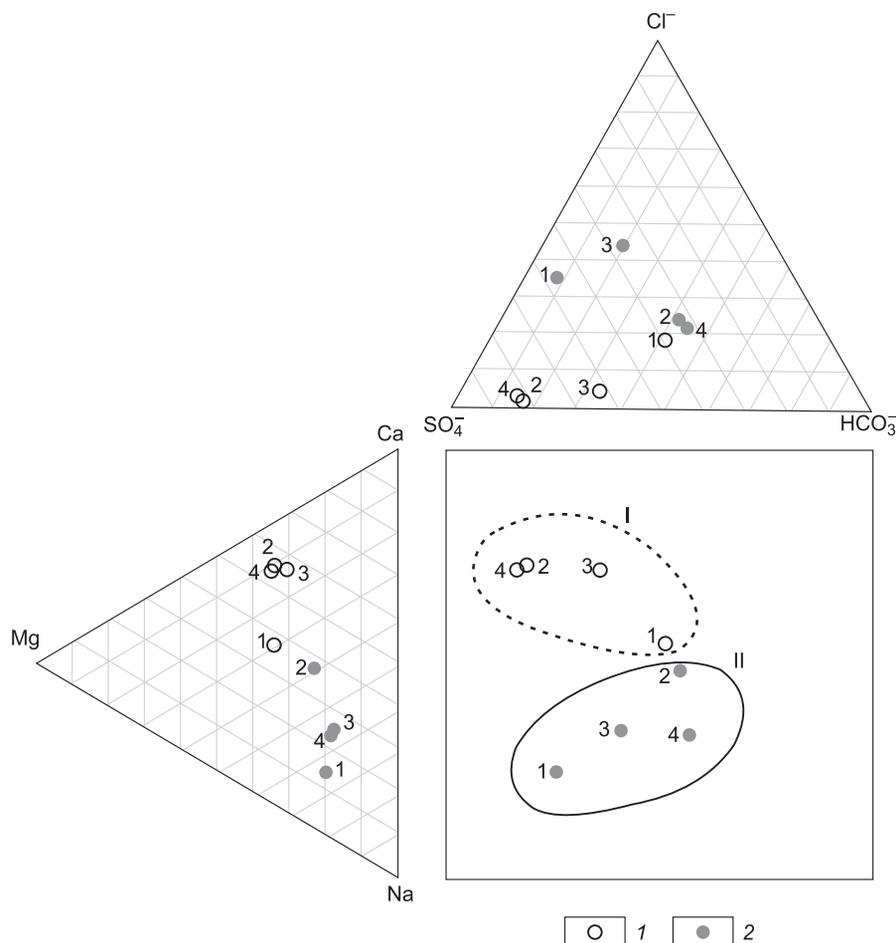


Рис. 4. Изменение химического состава донных отложений. Береговая (I) и глубоководная (2) зоны озер: 1 – Белое, 2 – Сергелях, 3 – Теплое, 4 – Ытык-Кюель.

Fig. 4. Changes in the chemical composition of BS. Coastal (I) and deep-water (2) zones of lakes: 1 – Beloe, 2 – Sergelakh, 3 – Teploe, 4 – Ytyk-Kyuel.

двух математических порядков – 0,021–2,058 %. По химическому составу сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные смешанные по составу катионов с преобладанием кальция, слабощелочные (в среднем $pH = 7,45$), с высоким содержанием соединений азота, особенно нитратов (в среднем мг-экв.): $NO_3^- = 0,116$, $NH_4^+ = 0,034$. Повышенные содержания NO_3^- в донных отложениях прибрежной части озер указывают на их давнее загрязнение, так как они представляют собой конечную ступень в цепи бактериальных процессов окисления аммония до нитратов (нитрификации в аэробных условиях).

Наблюдается накопление сульфатов в ДО городских озер на общем фоне преимущественно бессульфатных озер Центральной Якутии. Высокие концентрации сульфатов особенно характерны для береговых мелководных частей озер, где

зимой промерзают ДО и вода. Присутствие сульфатов в иловых растворах озерных осадков может указывать на мелководность или повышенную минерализацию озера в период седиментации осадков [17], т. е. после ликвидации проточности городских водоемов в середине XX в.

Заключение

На протяжении геохимического мониторинга (1998–2021 гг.) химический состав донных отложений остается постоянным – сульфатным смешанным по составу катионов с преобладанием кальция. Установлена общая тенденция понижения их солёности с трендом около 0,018 %/год. На фоне общей направленности к понижению солёности наблюдается формирование кратковременных положительных аномалий последней с продолжительными периодами опреснения дон-

Химический состав ДО глубоководной и береговой зон городских озер

Table 6

Chemical composition of BS in the deep-water and coastal zones of city lakes

| Озера / Lakes | Химические параметры / Chemical parameters | Сергелях / Sergelyakh | Теплое / Teploe | Ытык-Кюель / Ytyk-Kyuel |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Глубокие, малокриогенные / Deep, low cryogenic | Химический состав / Chemical composition | C 39 S 32 Cl 23 Na36 Ca36 Mg23 K2 | Cl 42 S 39 C 17 Na50Ca24 Mg18 K3 | C 46 S 32 Cl 22 Na40 Ca21Mg16 K7 |
| | Соленость, % / Salinity, % | 0,027 | 0,105 | 0,034 |
| Береговые, криогенные / Coastal, cryogenic | Химический состав / Chemical composition | S 79 C 16 Cl 2 Ca 52Mg 34 Na13K1 | S 58 C 31 Cl 6N3 Ca56Na31 Mg 9 K3 | S 76 C 15 Cl 2 Ca 53 Mg 36 Na 9 K1 |
| | Соленость, % / Salinity, % | 0,146 | 0,056 | 0,060 |

ных осадков, которые сопровождаются уменьшением плотности атмосферных выпадений. При относительно постоянной величине техногенных выбросов в атмосферу города резкие изменения объемов атмосферных выпадений определяются климатическими факторами, влияющими на динамику колебания солености донных отложений.

Основной источник питания городских озер – слабоминерализованные гидрокарбонатно-кальциевые дождевые воды, плотность атмосферных выпадений которых на два порядка выше, чем в холодное время года. Плотность выпадений сульфатов составляет от 6 до 10 % от общего объема поступления макрокомпонентов в летний период.

Криогенная метаморфизация донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер. Она более интенсивна в береговой зоне, подверженной значительным температурным колебаниям, и менее заметна в глубоководной части озер, где температурные флуктуации значительно меньше. Различия процессов криогенной метаморфизации отражаются на изменении химического состава донных отложений в различных частях озер: в глубокой части они мало минерализованные (Dsal от 0,027 до 0,105 %), преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные, слабокислые (pH = 6,27–6,80), в

мелководной прибрежной части более засолены (Dsal 0,253 %) сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные, слабощелочные.

Список литературы / References

- ГОСТ 57567-2017. Качество воды. Определение гидроморфологических показателей состояния рек. М.: Стандартинформ; 2017. 20 с.
[GOST 57567-2017. Water quality. Determination of hydromorphological indicators of the state of rivers. Moscow: Standartinform, 2017. 20 p. (In Russ.)]
- Субетто Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им А. И. Герцена; 2009. 339 с.
[Subetto D.A. Bottom sediments of lakes: Paleolimnological reconstructions. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im A. I. Gertsena; 2009. 339 p. (In Russ.)]
- Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра; 1972. 288 с.
[Perelman A. I. Geochemistry of elements in the zone of hypergenesis. Moscow: Nedra; 1972. 288 p. (In Russ.)]
- Canfield T.J., Dyer F.J., Fairchild J.F. et al. Assessing Contamination in Great lakes Sediments Using Benthic Invertebrate Communities and the Sediment Quality Triad Approach. *J. Great Lakes Res.* 1996;22(3): 565–583.
- Frey D.G. *Limnology in North America*. Univ of Wisconsin Press; 1963, 734 p.
- Freeze R.A. Theoretical analysis of regional groundwater flow. *Canada Inland Waters. Sci., Ser. 3;* 1969:147 p.

7. Hansen K. The general limnology of arctic lakes as illustrated by examples from Greenland. *Medd. om Gronland*. 1967;178(3):1–77.
8. Поликарпочкин В.В. *Вторичные ореолы и потоки рассеяния*. Новосибирск: Наука;1976. 407 с.
[Polikarpochkin V.V. *Secondary halos and scattering fluxes*. Novosibirsk: Nauka;1976. 407 p. (In Russ.)]
9. Тарновский А.А. *Геохимия донных отложений современных озер*. Л.: Изд-во ЛГУ;1980. 172 с.
[Tarnovsky A.A. *Geochemistry of bottom sediments of modern lakes*. Leningrad: Izd-vo LGU;1980. 172 p.]
10. Hakanson L., Jansson M. *Principles of lake sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag;1983. 316 p.
11. Мизандронцев И.В. *Химические процессы в донных отложениях водоемов*. Новосибирск: Наука;1990. 176 с.
[Mizandrntsev I.V. *Chemical processes in bottom sediments of water bodies*. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p. (In Russ.)]
12. Линник П.Н. Донные отложения водоемов как потенциальный источник вторичного загрязнения водной среды соединениями тяжелых металлов. *Гидробиол. журн.* 1999;35(2):97–109. (In Russ.)
[Linnik P.N. Bottom sediments of water bodies as a potential source of secondary pollution of the aquatic environment with heavy compounds metals. *Gidrobiologicheskii Zhurnal*. 1999;35(2):97–109. (In Russ.)]
13. Даувальтер В. А. *Геоэкология донных отложений озер*. Мурманск: Изд-во МГТУ;2012.242 с.
[Dauvalter V. A. *Geoecology of bottom sediments of lakes*. Murmansk: Izd-vo MGTU;2012.242 p. (In Russ.)]
14. Анисимова Н.П. *Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии)*. М.: Наука; 1971. 195 с.
[Anisimova N.P. *Formation of the chemical composition of underground waters of taliks (on the example of Central Yakutia)*. Moscow: Nauka; 1971. 195 p. (In Russ.)]
15. Макаров В.Н. *Геохимический атлас Якутска*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1985. 65 с.
[Makarov V.N. *Geochemical atlas of Yakutsk*. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR; 1985. 65 p.]
16. Руфова А.А. *Гидрохимический состав городских озер. Прикладная экология г. Якутска: сборник научных трудов*. Новосибирск: Наука;2017. С. 64–70.
[Rufova A.A. *Hydrochemical composition of urban lakes. Applied Ecology of Yakutsk*. Novosibirsk: Nauka; 2017:64–70. (In Russ.)]
17. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. *Криогидрогеохимические исследования в Центральной Якутии*. Новосибирск: ГЕО; 2014. 185 с.
[Anisimova N.P., Pavlova N.A. *Cryohydrogeochemical research in Central Yakutia*. Novosibirsk: GEO; 2014. 185 p. (In Russ.)]
18. Макаров В.Н., Седельникова А.Л. *Экогеохимия городских озер Якутска*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2016. 210 с.
[Makarov V.N., Sedelnikova A.L. *Ecogeochemistry of urban lakes of Yakutsk*. Yakutsk: IMZ SO RAN; 2016. 210 p. (In Russ.)]
19. Сыромятников И.И., Куницкий В.В. Строение озерных отложений культурного слоя на территории города Якутска. *Криосфера Земли*. 2019;13(4):16–25. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(16-25).
[Syromyatnikov I.I., Kunitsky V.V. The structure of lacustrine deposits of the cultural layer on the territory of the city of Yakutsk. *Earth's Cryosphere*. 2019;13(4):16–25. (In Russ.). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(16-25)]
20. Макаров В. Н. *Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН; 2007. 88 с.
[Makarov V.N. *Geochemical monitoring of atmospheric precipitation in Central Yakutia*. Yakutsk: Izd-vo In-ta merzlotovedeniya SO RAN; 2007. 88 p.]
21. Пестрякова Л. А. *Диатомовые комплексы озер Якутии*. Якутск: Изд-во ЯГУ; 2008. 197 с.
[Pestryakova L.A. *Diatom complexes of lakes of Yakutia*. Yakutsk: Izd-vo YGU; 2008. 197 p. (In Russ.)]

Об авторах

МАКАРОВ Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

СЕДЕЛЬНИКОВА Алена Леонидовна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-5241-844X>, e-mail: chizuk82@mail.ru

Аффилиация

Институт мерзлотоведения СО РАН, 677007, г. Якутск, ул. Мерзлотная 36, Российская Федерация.

About the authors

MAKAROV, Vladimir Nikolaevich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

В. Н. Макаров, А. Л. Седельникова ♦ Донные отложения озер г. Якутск...

SEDELNIKOVA, Alena Leonidovna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-5241-844X>, e-mail: chizuk82@mail.ru

Affiliation

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677007, Russian Federation.

Поступила в редакцию / Submitted 27.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 23.06.2022

Принята к публикации / Accepted 05.07.2022