

ТЕРМОДЕНУДАЦИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОХИМИИ МАЛЫХ ТУНДРОВЫХ ОЗЁР

¹Факащук Н.Ю., ²Дворников Ю.А., ¹Опокина О.Л., ^{1,3}Хомутов А.В.

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

³Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Гидрохимический мониторинг водных объектов позволяет получить информацию о состоянии водного объекта в изучаемый период и оценить роль климатических факторов в питании и режиме водоема. В последнее десятилетие возрастает актуальность работ по изучению влияния криогенных процессов на ионный состав малых тундровых озёр в российском заполярье. Целью работы является исследование ионного состава малых тундровых озёр центрального Ямала на предмет его изменения под влиянием термоденудации. Статистически установлено влияние межгодовых колебаний температуры воздуха и осадков на ионный состав озёр – изменяется содержание ионов NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HCO_3^- при уровне значимости $p = 0.05$. Активная термоденудация по берегам озёр увеличивает общую минерализацию в среднем на 42,8 % и изменяет концентрацию ионов – Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , PO_4^{3-} , HCO_3^- . При этом климатические флуктуации могут оказывать влияние на ионный состав озёр в большей степени, чем процессы термоденудации. Значительное повышение количества летних осадков и среднегодовой температуры воздуха способствует усилению вымывания из оттаявшего при термоденудации материала ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- и повышению общей минерализации малого озера.

Ключевые слова: *термоденудация, малые озера, гидрохимия, ионный состав, изменение климата, полуостров Ямал*

В условиях глобального изменения климата возрастает актуальность исследований, направленных на изучение трансформации территорий, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП) [Цатуров и др. 2012; Bruhwiler et al., 2021]. Повышение среднегодовой температура воздуха и значений прямой солнечной радиации [Романенко, Шиловцева, 2016; Overland et al., 2019], совместно с преобразованием циркуляции воздушных масс [Холощев и др., 2020], которые приводят к активизации криогенных процессов, изменению гидрологического режима поверхностных водоемов и динамике растительного покрова. Изменения климата арктической и субарктической зон оказывает влияние на морфометрию и гидрохимию малых озёр. Воздействие происходит напрямую, через изменения количества осадков и увеличение глубины сезонного протаивания и опосредованно, изменяя скорости протекания криогенных процессов.

Термоденудация – комплекс криогенных процессов разрушения пород и сноса продуктов этого разрушения [Гляциологический словарь, 1984]. Скорость термоденудации тем больше, чем выше льдистость мерзлых отложений и объемы залежеобразующих льдов [Меняющийся климат..., 2015]. В результате этих процессов переносимый материал накапливается в понижениях рельефа, в частности, в водных объектах влияя на ионный состав воды и содержание нерастворенных частиц. Целью работы является исследование гидрохимического состава малых озёр центральной части полуострова Ямал на предмет его изменения под воздействием процессов термоденудации в условиях современного изменения климата.

Исследуемый участок расположен в центральной части п-ова Ямал в междуречье рек Сеяхи (Мутной) и Мордыяхи в районе НИС «Васькины Дачи». ММП района исследования имеют мощность 200-400 м со среднегодовой температурой от -3 до -6° С и максимальную льдистость (D_{sal}) до 1,7-1,8 % [Криосфера..., 2013]. Для центральной части п-ова Ямал характерны залежи пластового льда палеоген-неогенового возраста [Соломатин и др., 1993; Стрелецкая, Лейбман, 2002; Кришук, 2010; Васильчук и др., 2018]. В последнее десятилетие, на ключевом участке найдены тренды изменения активности

криогенных процессов, как следствие, изменений климата. Наблюдается возрастание мощности сезонно-талого слоя (СТС) в среднем на 20 % и его среднегодовой температуры с максимальными величинами в 2012 и 2016 гг. [Бабкина и др., 2019]. Увеличение глубины сезонного протаивания привело к росту частоты образования термоцирков в этом регионе [Хомутов и др., 2020]. Помимо температуры пород, зафиксирован рост среднегодовой температуры воздуха на 1.5° С за период 1996-2014 гг. [Бабкина и др., 2019].

Химический состав малых тундровых озёр полуострова изучался при освоении месторождений углеводородов. С.М. Фотиев приводит осредненные данные, согласно которым, озёра гидрокарбонатные натриевые со средней минерализацией в 60 мг/дм³ [Фотиев, 1999]. В 2011-2013 гг. химический состав малых озёр на п-ове Ямал был объектом исследования Т.А. Кремлевой при оценке устойчивости озёр к антропогенным нагрузкам [Кремлева, 2015]. Согласно её данным химический состав озёр полуострова гидрокарбонатно-кальциевый с минерализацией 28.5 мг/дм³ и рН= 6.5. Гидрохимический состав малых озёр в районе стационара хлоридно-натриевый со средней минерализацией в 80 мг/дм³ и рН = 7 [Dvornikov et al., 2019].

В период 2014-2019 гг. на центральном Ямале в районе научно-исследовательского стационара (НИС) «Васькины Дачи» сотрудниками Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН проводился мониторинг химического состава вод малых озёр. Для оценки влияния климатических колебаний на ионный состав малых озёр, за исследуемый период, использовались данные с близлежащей метеорологической станции «Марресале».

Гидрохимическое опробование воды из озёр проводилось в летне-осенний период 2014-2019 гг. Пробоподготовка проводилась в полевых условиях: пробы воды фильтровались с использованием целлюлозно-ацетатных фильтров Sartorius с размером пор 0,45 мкм. Отфильтрованные образцы (для анализа на содержание анионов и катионов отдельно) хранились в пластиковой таре объемом 50 мл при температуре 4-10°С. Образцы на катионы подкислялись 65% азотной кислоты в объеме ~50 мкл. Анализы выполнялись в 2014-2016 гг. в лаборатории Отто-Шмидта ААНИИ (г. Санкт-Петербург) на ион-хроматографе Methrom 761 Compact IC, в 2017-2019 гг. – в химической лаборатории «ФГБУ ВНИИОкеангеология» г. Санкт-Петербург на ион-хроматографе Methrom 940 Professional IC Vario. Определялось содержание ионов Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, Br⁻, SO₄²⁻ в растворенной форме, содержание HCO₃⁻ и общая минерализация водного раствора определялись расчетным методом через ионный баланс. Границы термоцирков в водосборах изучаемых озёр фиксировали методом аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (DJI Mavic Pro).

На основе данных с м.с. «Марресале» составлена диаграмма межгодовой изменчивости температуры воздуха и атмосферных осадков (Рис. 1).

Годовое количество осадков за исследуемый период изменяется в пределах 210-390 мм. Минимальное значение зафиксировано в 2017 г. – 210 мм, максимальное в 2018 г. – 389 мм. Аномальным за время наблюдений является 2016 г., который характеризуется не только максимальным количеством летних осадков (226 мм), но и их превышением над зимними. В том же году, зафиксирована максимальная среднегодовая температура (-3.4°С) и наибольшее количество теплых дней (163). Все эти климатические факторы способствовали активизации термоденудационных процессов по берегам исследуемых озёр в теплый период года [Хомутов и др., 2020]. В 2017 г. наблюдается минимальное количество летних осадков (61 мм) и снижение среднегодовой температуры до -7.8°С (см. Рис. 1).

Для оценки интенсивности процесса термоденудации составлена диаграмма ежегодного прироста площадей термоцирков (Рис. 2).

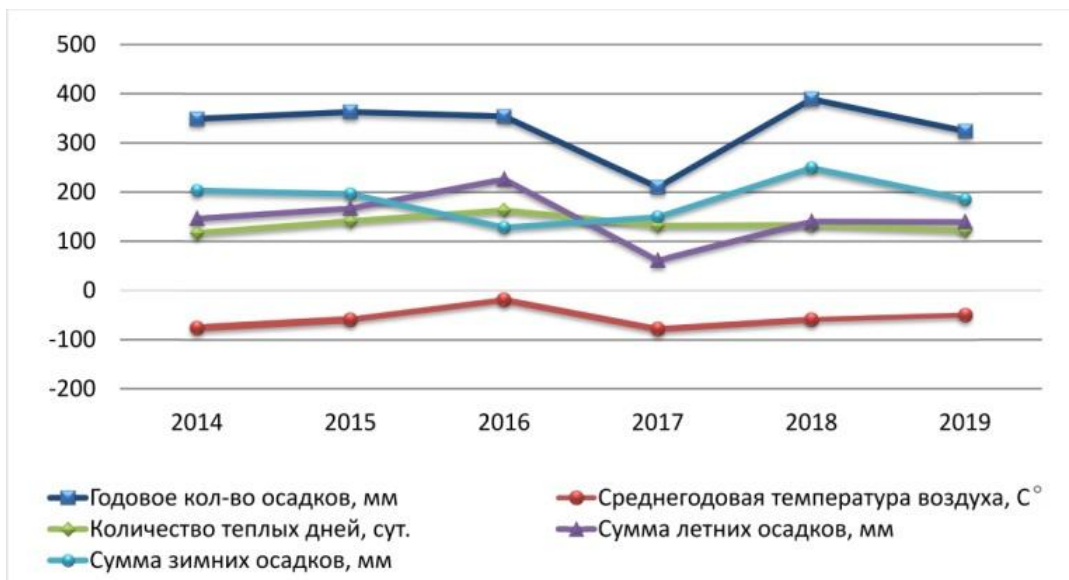


Рис. 1 Межгодовая изменчивость климатических характеристик по данным с м.с. «Марресале» за 2014-2019 гг. Примечание: Для улучшения визуализации данных среднегодовая температура воздуха указана в (Тх10) °С. Годовые значения параметров высчитывались между датами отбора проб озерной воды.



Рис. 2. Межгодовая динамика увеличения площади термоцирков за исследуемый период (м²).

Величины изменения площадей широко варьируют от 70 до 5800 м². У ТЦ-1 пик активности приходится на 2014-2016 гг. Термоцирк ТЦ-2 у озера «LK-015» начал затухать после 2015 г. с приростом площади термоцирка менее 500 м²/год. Термоцирки озера «LK-017» имеют положительную динамику до 2016 г., ТЦ-4 развивался до 2015 г., затем на нем возник ТЦ-4а, который за 2016 г. увеличился на 2171 м² [Хомутов и др., 2020]. Наиболее активная термоденудация происходила у берегов озера №18. Группа термоцирков (ТЦ-5, ТЦ-5н), начиная с 2016 г., имела ежегодный прирост площади свыше 2500 м². Пик активности термоденудации у озёр приходится на разные годы (см. Рис. 2). Зависимости между динамикой изменения площадей термоцирков (см. Рис 2) и межгодовыми колебаниями климатических характеристик (см. Рис. 1) не наблюдается. Можно сделать

закключение, что для рассматриваемых термоцирков темпы отступления бровки определяются не климатическими параметрами, а льдистостью отложений.

Для определения влияния климатических характеристик использовались данные содержания ионов у фонового озера «LK-006». Наиболее ярко химический состав озера изменялся в 2016 и 2017 гг., что совпадает с периодом наибольших климатических флуктуаций (см. Рис. 1). Проведен корреляционный анализ между содержанием ионов в озёрах и характеристиками климата. Найдены значимые зависимости для NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HCO_3^- с уровнем статистической значимости $p \leq 0.05$. Таким образом, климатические флуктуации оказывают прямое влияние на ионный состав озёр при аномальных изменениях температуры атмосферного воздуха и (или) годового количества осадков.

Для поиска зависимостей между интенсивностью термоденудации и величиной минерализации в озёрах использовались данные морфометрических характеристик озёр и термоденудационные характеристики термоцирков. Наибольшее потенциальное влияние термоденудация оказывает на озёра «LK-017» и «LK-018». Этот вывод подтверждается и величиной средней минерализации двух озёр, т.к. только у них она превышает значение в 100 мг/л.

Различия в ионном составе между фоновыми и целевыми озерами существуют для следующих элементов – Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Cl^- . Указать однозначно источник поступления этих ионов затруднительно, т.к. эти ионы характерны для всех типов природных вод. В целом, за период наблюдений, выраженной связи между приростом площади термоцирков и изменением в гидрохимии озёр не обнаружено. Она существует для отдельных озёр в отдельные годы: 2015 г. у «LK-015»; 2016 и 2018 гг. для «LK-017»; 2016 г. у «LK-018» и «LK-031». Наиболее ярко «химия» целевых озёр изменялась в период 2016-2017 гг., во время наибольших межгодовых колебаний метеорологических характеристик (см. Рис. 1). Авторы предполагают, что изменения количества атмосферных осадков явилось главным фактором изменения содержания ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , NH_4^+ , Cl^- в целевых озёрах.

Выводы. Результатом гидрохимического мониторинга малых озёр центрального Ямала стали следующие выводы. Связи между изменением метеорологических параметров и скорости прироста площадей термоцирков не обнаружено. Установлено влияние межгодовых флуктуаций климатических параметров на ионный состав озёр – изменяется содержание ионов NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HCO_3^- . Термоденудация оказывает влияние на гидрохимию малых озёр центральной части п-ова Ямал, которое выражается в изменении общей минерализации и концентрации ряда ионов – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Cl^- . Повышение количества летних осадков способствует усилению вымывания Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- из талых отложений и увеличению общей минерализации вод малых тундровых озёр.

Работа выполнена по госзаданию № 121041600042-7.

ЛИТЕРАТУРА

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А. и др. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99-109.

Гляциологический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1984.

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю., Васильчук А.К., Гаранкина Е.В., Чижова Ю.Н., Шоркунов И.Г. — Изотопно-геохимический состав пластовых ледяных залежей на междуречье рек Мордыяха и Сеяха (Мутная), Центральный Ямал // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 50 - 75. doi: 10.7256/2453-8922.2018.1.25833.

Кремлева Т.А. Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: диссертация ... доктора химических наук: 25.00.09 Ин-т геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Москва, 2015. 260 с.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 томах. Т.2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения / Под общ.ред. Ю.Б.Баду, Н.А.Гафарова, Е.Е.Подборного. Т. 2. ООО Газпром Экспо, Москва, 2013. С. 391–411.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.

Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики: сб. ст. / отв. ред. С.А. Сократов. М.: Лига-Вент, 2015. 128 с.

Романенко Ф. А., Шиловцева О.А. Изменения климата в Арктике, катастрофические природные процессы и динамика рельефа на Земле Франца-Иосифа // Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики. Под ред. С.А. Сократова. М.: Лига-Вент, 2016. С. 170-196.

Соломатин В.И., Коняхин М.А., Николаев В.И., Михалев Д.В. Условия залегания и состав пластовых льдов на полуострове Ямал // Материалы гляциологических исследований. 1993. Вып. 77. С. 139–147.

Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 15–24.

Фотиев С. М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. II. № 2. С. 40 - 66.

Холопцев А.В., Подпорин С.А., Кононова Н.К. Ледяной покров Арктики и меридиональные составляющие атмосферной циркуляции в северном полушарии Земли // Сложные системы. 2020. № 2 (35). С. 4-10.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Дворников Ю.А. и др., Термоцирки Карского региона: полевые и дистанционные методы исследований // Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск (Россия), 28-30 сентября 2020 г. // Я.: Издательство и типография ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. 2020. С. 196-200.

Цатуров Ю.С., Клепиков А.В. Современное изменение климата Арктики: результаты нового оценочного доклада Арктического совета // Арктика: экология и экономика. 2012 №4(8). С. 76-81.

Bruhwiller, L., Parmentier, F.J.W., Crill, P. et al. The Arctic Carbon Cycle and Its Response to Changing Climate // Current Climate Change Reports. 2021. Vol. 7. P. 14–34. doi: 10.1007/s40641-020-00169-5.

Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al., Gas-emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes // Permafrost and Periglacial Processes. 2019. Vol. 30. Is. 3. P. 146-162. doi: 10.1002/ppp.2014

Overland J.E., Hanna E., Hanssen-Bauer I. et al. Surface air temperature. In J. Richter-Menge, M. L. Druckenmiller, & M. Jeffries (Eds.), Arctic Report Card. 2019.

THERMODENUDATION AS A FACTOR OF HYDROCHEMISTRY FORMATION SMALL TUNDRA LAKES

¹Fakashchuk N.U., ²Dvornikov Yu.A., ¹Opokina O.L., ^{1,3}Khomutov A.V.

¹ Institute of Earth Cryosphere, Tyumen, Russia

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

³ Tyumen State University, 625003, Tyumen, Russia

Hydrochemical monitoring of inland waters allows to assess their conditions and to estimate the impact of climate change. During the last decade, relevance of the research related to the impact of permafrost thaw on the state of small lakes in the Arctic has been growing. This study aims to investigate the impact of thermodenudation on the ionic composition of small tundra lakes in Yamal peninsula. The influence of interannual fluctuations in air temperature and precipitation on the ionic composition of lakes has been statistically established - the content of NO_2^- , Br^- , NO_3^- , HCO_3^- at the level of significance $p = 0.05$. Active thermodenudation on the shores of these lakes leads to the uptake of mineralization levels by an average of 42.8% and changes the concentration of major ions Na, Ca, Mg, K, PO_4 , HCO_3 . Herewith, the climatic fluctuations can have a greater impact on the ionic composition compared to thermodenudation. Significant increase in precipitation and annual air temperatures intensifies the thawing processes within retrogressive thaw slumps and leads to the increase in mineralization of small lakes, Ca, Mg, NH_4 и HCO_3 ions in particular.

Keywords: *thermodenudation, small tundra lakes, hydrochemistry, climate changes, Yamal, retrogressive thaw slump*