КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 14–23 **https://www.sibran.ru**

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 550.461 DOI: 10.15372/KZ20230402

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ НА ИОННЫЙ СОСТАВ МАЛЫХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

Н.Ю. Факащук[1,*], Ю.А. Дворников[2,3], О.Л. Опокина[1,4], А.В. Хомутов[1]

[1] *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия*
[2] *Российский университет дружбы народов, Аграрно-технологический институт, Агроинженерный департамент, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8, к. 2, Россия*
[3] *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Россия*
[4] *Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия*

**Автор для контакта, n.yu.fakashchuk@yandex.ru*

Гидрохимический мониторинг водных объектов позволяет получить информацию об их состоянии в изучаемый период и оценить влияние климатических факторов на режим водоема. В последнее десятилетие возрастает актуальность работ по изучению влияния криогенных процессов на ионный состав малых тундровых озер в российском Заполярье. Статистически установлено воздействие межгодовых колебаний температуры воздуха и осадков на ионный состав озер: изменяется содержание ионов NO_2, SO_4, NO_3. Активная термоденудация по берегам озер увеличивает общую минерализацию в среднем на 42.8 % и изменяет концентрацию ионов Na, Ca, Mg, K, PO_4, HCO_3.

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

Ссылка для цитирования: Факащук Н.Ю., Дворников Ю.А., Опокина О.Л., Хомутов А.В. Влияние процессов термоденудации на ионный состав малых озер Центрального Ямала // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 14–23. DOI: 10.15372/KZ20230402.

THE IMPACT OF THE PROCESSES OF THERMAL DENUDATION ON THE IONIC COMPOSITION OF SMALL LAKES IN CENTRAL YAMAL

N.U. Fakashchuk[1,*], Yu.A. Dvornikov[2,3], O.L. Opokina[1,4], A.V. Khomutov[1]

[1] *Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia*
[2] *Peoples' Friendship University of Russia, Agrarian and Technological Institute, Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, Miklukho-Maklaya St. 8, k. 2, Moscow, 117198 Russia*
[3] *Arctic and Antarctic Research Institute, Bering St. 38, Saint-Petersburg, 199397 Russia*
[4] *Tyumen Industrial University, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia*

**Corresponding author, n.yu.fakashchuk@yandex.ru*

Hydrochemical monitoring of inland waters makes it possible to obtain information about their state and to assess the influence of climatic factors on the regime of water reservoirs. In the recent decade, relevance of the research related to the impact of permafrost thaw on the state of small lakes in the Arctic has been growing. The influence of interannual fluctuations in air temperature and precipitation on the ionic composition of lakes has been statistically established for the contents of NO_2, SO_4, and NO_3 ions. Active thermodenudation on the shores of these lakes increases water mineralization levels by an average of 42.8 % and changes the concentrations of major ions Na, Ca, Mg, K, PO_4, and HCO_3.

Keywords: *thermal denudation, small tundra lakes, hydrochemistry, ionic composition, climate changes, Yamal peninsula.*

ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального изменения климата возрастает актуальность исследований, направленных на изучение трансформации территорий, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП) [*Цатуров, Клепиков, 2012; Bruhwiler et al., 2021*]. Повышение среднегодовой температуры

© Н.Ю. Факащук, Ю.А. Дворников, О.Л. Опокина, А.В. Хомутов, 2023

воздуха и величины прямой солнечной радиации [*Романенко, Шиловцева, 2016; Overland et al., 2019*], преобразование циркуляции воздушных масс [*Холопцев и др., 2020*] приводят к активизации криогенных процессов, изменению гидрологического режима поверхностных водоемов и растительного покрова.

Термоденудация – комплекс криогенных процессов разрушения пород и сноса продуктов этого разрушения [*Гляциологический словарь, 1984*]. Интенсивность термоденудации тем больше, чем выше льдистость мерзлых отложений и объемы залежеобразующих льдов [*Меняющийся климат..., 2015*]. В результате процессов термоденудации переносимый материал накапливается в понижениях рельефа, в частности в водных объектах, влияя на ионный состав воды и содержание нерастворенных частиц.

В последние годы оценкой влияния таяния ММП на изменение ионного и органического состава поверхностных вод в полярных широтах занимались научные коллективы Канады, США и России. В публикациях отмечены тренды на увеличение минерализации озер, содержания органического углерода и азота при проявлении на площади водосборов активных криогенных процессов [*Lafreniere, Lamoureux, 2013, 2019*]. В ионном составе малых озер наблюдалось увеличение доли ионов K, Na, Ca, Mg и SO_4 [*Kokelj et al., 2005; Roberts et al., 2017*]. С.В. Лойко с соавт. [*Loiko et al., 2017*] сообщают о том, что при резком таянии мерзлых торфяных почв содержание элементов CO_2, Ca, P, Si, Fe, Al и растворенного органического углерода в озерах и мелких водоемах на участке с активной термоденудацией увеличивается в несколько раз по сравнению с участками с более медленным таянием ММП. Таким образом, воды, возникающие при оттаивании ММП, обладают значительным потенциалом изменения химического состава водных объектов (озер, водотоков), в которые они впоследствии мигрируют [*Loiko et al., 2017*].

Изменения климата арктической и субарктической зон оказывают влияние на морфометрию и гидрохимию малых озер. Воздействие происходит напрямую, через изменение количества осадков и увеличение глубины сезонного протаивания пород, и опосредованно, с изменением скорости протекания криогенных процессов.

Репрезентативным регионом для мониторинговых исследований динамики ионного состава озер является север Западной Сибири. Геологическая особенность региона – наличие залежеобразующих пластовых льдов, часто залегающих близко к земной поверхности. Они обусловливают широкое распространение криогенных рельефообразующих процессов по берегам многочисленных малых озер [*Кизяков, Лейбман, 2016*]. На Центральном Ямале широко распространены термоцирки – амфитеатровидные углубления в склоне, образуемые при вытаивании мерзлого грунта и льда [*Embleton, King, 1975*].

Среди публикаций встречаются единичные работы по результатам изучения влияния активной термоденудации на гидрохимическое состояние малых озер тундры. На севере Западной Сибири такие исследования проводились для определения содержания в воде растворенного органического вещества и углерода [*Манасыпов, 2013; Дворников, 2016; Дворников и др., 2017; Трофимова и др., 2018; Агбалян, Шинкарук, 2019*]. Настоящая статья дополняет указанные выше работы информацией об изменении ионного состава озерных вод вследствие процессов термоденудации.

Целью работы является исследование гидрохимического состава малых озер центральной части п-ова Ямал на предмет его изменения под воздействием процессов термоденудации в условиях современного изменения климата.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый участок расположен в центральной части п-ова Ямал в междуречье рек Сеяхи (Мутной) и Мордыяхи в районе научно-исследовательского стационара (НИС) “Васькины Дачи” (рис. 1). Изучаемые озера находятся в пределах третьей аллювиально-морской и четвертой прибрежно-морской террас. Толщи третьей террасы включают верхненеоплейстоценовые морские ($mIII_{2-3}$) глины с переслаиванием песков и су-

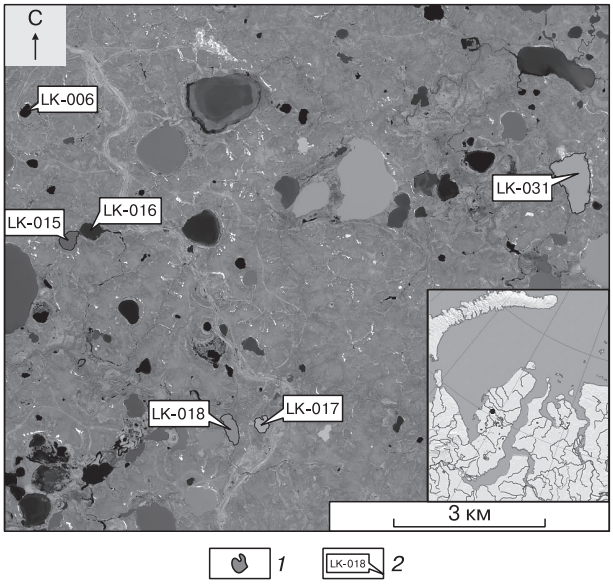

Рис. 1. Местонахождение исследуемых озер на космоснимке WorldView-2 за 10 июля 2018 г.

1 – местоположение района работ (на карте-врезке); *2* – номер озера.

глинков со среднегодовой температурой пород от –3 до –6 °С и максимальной засоленностью (D_{sal}) до 1.8 % [*Строение..., 2007*]. Четвертая терраса сложена верхненеоплейстоценовыми прибрежно-морскими отложениями (m, $pmIII_1$), представленными песками льдистыми, суглинками и супесями с максимальной мощностью до 40 м [*Баду, 2018*].

Мощность криогенной толщи в районе НИС доходит до 200 м со среднегодовыми температурами пород –3...–6 °С [*Криосфера..., 2013*]. На участке также присутствуют залежи пластового льда поздненеоплейстоценового возраста с гидрокарбонатно-натриевым и хлоридно-натриевым химическим составом [*Фотиев, 1999; Стрелецкая, Лейбман, 2002; Крицук, 2010; Криосфера..., 2013; Васильчук и др., 2018*]. Ландшафты представлены плоскими заозерными песчаными и суглинистыми равнинами с пушицево-моховыми ивняковыми, реже лишайниковыми тундрами на тундровых иллювиально-гумусовых почвах [*Атлас..., 2004*]. Заозеренность района исследования превышает 20 %, с густотой озер более 100 на 100 км^2 [*Дворников, 2016*].

В последнее десятилетие на ключевом участке наблюдается активизация криогенных процессов, как следствие изменений климата. За период 1996–2014 гг. зафиксирован рост среднегодовой температуры воздуха на 1.5 °С [*Бабкина и др., 2019*]. Наблюдается возрастание мощности сезонноталого слоя (СТС) в среднем на 20 % и его среднегодовой температуры с максимальными величинами в 2012 и 2016 гг. [*Там же*]. Увеличение глубины сезонного протаивания привело к росту частоты образования термоцирков в этом регионе.

Гидрохимический состав озер п-ова Ямал представлен в научных трудах [*Фотиев, 1999; Ермилов и др., 2002; Стрелецкая, Лейбман, 2002; Грива, 2005; Крицук, 2010; Криосфера..., 2013; Кремлева, 2015*]. С.М. Фотиев [*1999*], изучая формирование ионно-солевого состава криопэгов, приводит данные о химическом составе пресных озер полуострова. Озера гидрокарбонатные натриевые со средней минерализацией 60 мг/дм^3. В 2011–2013 гг. химический состав малых озер на п-ове Ямал был объектом исследования Т.А. Кремлевой [*2015*] при оценке устойчивости озер к антропогенным нагрузкам. Согласно ее данным, химический состав озер полуострова гидрокарбонатно-кальциевый с минерализацией 28.5 мг/дм^3 и pH = 6.5. В непосредственной близости к НИС “Васькины Дачи” гидрохимический состав малых озер был исследован в контексте выяснения причин образования воронок газового выброса. Гидрохимический состав малых озер в районе стационара хлоридно-натриевый со средней минерализацией 80 мг/дм^3 и средним pH = 7 [*Dvornikov et al., 2019*].

Для гидрохимического мониторинга влияния термоденудации на ионный состав воды выбраны пять озер: LK-006, LK-015, LK-017, LK-018, LK-031 (см. рис. 1). Четыре из них “целевые”, что означает наличие термоцирков в береговой зоне. Озеро LK-006 является фоновым, так как не имеет в своем водосборе активных термоденудационных форм рельефа и активного проявления других криогенных процессов. Целевые озера имеют различную интенсивность термоденудации для проведения сравнительного анализа.

Озеро LK-006 с площадью зеркала 0.033 км^2 и максимальной глубиной 12.6 м находится на III аллювиально-морской террасе [*Хомутов, Лейбман, 2016*]. Озеро LK-015 имеет площадь 0.099 км^2 и максимальную глубину 23.2 м. Оно находится на IV прибрежно-морской террасе. В пределах его береговой линии образовался термоцирк (ТЦ-2). Озеро имеет водный коридор с соседним озером LK-016. Из LK-016 вытекает ручей, впадающий в р. Нгэрм-Лымбадъяха. Озеро LK-017 находится в 5.2 км к юго-востоку от LK-015 на III аллювиально-морской террасе. Оно имеет максимальную глубину в 9.4 м и площадь зеркала 0.07 км^2 [*Дворников, 2016*]. В береговой зоне образовался термоцирк ТЦ-4(4а). Озеро LK-018 лежит в 50 м к западу от LK-017 и расположено в пределах того же геоморфологического уровня. Площадь озера 0.126 км^2, максимальная глубина равна 7.8 м. В пределах водосбора развивалась группа термоцирков, среди которых наиболее значительны ТЦ-5 и ТЦ-5н. Самое большое по площади озеро (0.592 км^2) LK-031 расположено в 9 км на восток от озера LK-016 на III аллювиально-морской террасе. У его берегов развивался термоцирк ТЦ-1 [*Dvornikov et al., 2016*].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В период 2014–2019 гг. на Центральном Ямале в районе НИС “Васькины Дачи” сотрудниками Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН проводился мониторинг химического состава вод малых озер. Гидрохимическое опробование воды из озер проводилось в летние периоды 2014–2019 гг. Чтобы свести к минимуму влияние сезонных колебаний, отбор проб осуществляли в конце августа или начале октября, т. е. в периоды с установившейся гомотермией вод.

Пробоподготовка производилась в полевых условиях: пробы воды фильтровали с использованием целлюлозно-ацетатных фильтров Sartorius с размером пор 0.45 мкм. Отфильтрованные образцы (для анализа на содержание анионов и катионов отдельно) хранили в пластиковой таре объемом 50 мл при температуре 4–10 °С. Образцы на катионы подкислялись 65%-й азотной кислотой в объеме ~50 мкл. Анализы выполнялись в 2014–

2016 гг. в Российско-германской лаборатории полярных и морских исследований им. О.Ю. 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 Professonal IC Vario. Определялось содержание ионов Na, K, NH_4, Ca, Mg, Cl, NO_2, NO_3, PO_4, Br, SO_4 в растворенной форме, содержание HCO_3 и общая минерализация водного раствора определялись расчетным методом через ионный баланс [*Левченко, Макаров, 2003*].

Границы термоцирков в водосборах изучаемых озер фиксировались аэрофотосъемкой с беспилотного летательного аппарата (DJI Mavic Pro). На основе данных съемки беспилотником составляли ортофотопланы в программном комплексе (ПО) Agisoft Metashape Professional. Геометрические скорректированные ортофотопланы использовались для выделения границ термоцирков и расчета их площадей с помощью ПО ESRI ArcGIS.

Для оценки влияния погодных колебаний на ионный состав малых озер за исследуемый период использовались данные с близлежащей метеорологической станции Марресале, взятые с сайта “aisori-m.meteo.ru” [http://aisori-m.meteo.ru/waisori/]. Все метеорологические характеристики, кроме среднелетней температуры, рассчитывались по датам отбора проб, а не по календарному году.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Межгодовые колебания климатических метеорологических характеристик. Количество осадков за исследуемые периоды изменялось в пределах 210–390 мм. Минимальное значение (210 мм) зафиксировано в 2017 г., максимальное (389 мм) – в 2018 г. Аномальным за время наблюдений является 2016 год, который характеризуется не только максимальным количеством летних осадков (226 мм), но и их превышением над зимними. В том же году зафиксирована максимальная среднелетняя температура воздуха (11.1 °С), наибольшее количество дней с положительной среднесуточной температурой (163) и сумма среднесуточных положительных температур (1623 °С). Среднелетняя температура определялась по календарному лету с 1 июня по 31 августа. Все эти погодные факторы способствовали усилению термоденудационных процессов по берегам исследуемых озер в теплый период года. В 2017 г. наблюдается минимальное количество летних осадков (61 мм) и снижение среднелетней температуры до 7.4 °С.

Характеристика термоденудации. Для оценки интенсивности процесса термоденудации составлен график ежегодного прироста площадей термоцирков (рис. 2). Величины изменения площадей за год широко варьируют от 70 до 5800 м^2. Пик активности термоденудации у озер приходится на разные годы (см. рис. 2). Например, термоцирки озер LK-015, LK-018 имеют снижение прироста площади в самый жаркий и влажный 2016 год. Зависимости между динамикой площадей термоцирков и межгодовыми колебаниями погодных характеристик не наблюдается. Для рассматриваемых термоцирков темпы отступания бровки определяются в первую очередь не клима-

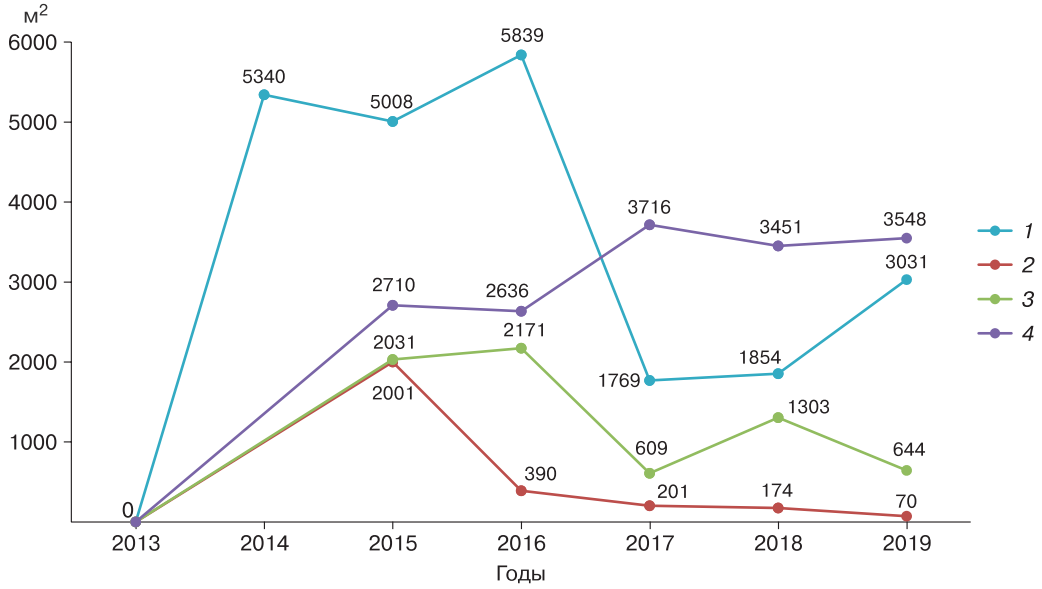

Рис. 2. Межгодовая динамика увеличения площади термоцирков за исследуемый период.

1 – ТЦ-1 (LK-031); *2* – ТЦ-2 (LK-015); *3* – ТЦ-4 и 4а (LK-017); *4* – ТЦ-5 (LK-018). Ось абсцисс – годы проведения наблюдений, ось ординат – увеличение площади термоцирка за один год, м^2.

Таблица 1.

Содержание ионов в исследуемых озерах

Дата отбора	Номер озера	Na^+		K^+		Ca^{2+}		Mg^{2+}		Cl^-		NO_2^-		PO_4^{3-}		Br^-		NO_3^-		SO_4^{2-}		HCO_3^-		pH	Общая минерализация, мг/л
		мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.	мг/л	%-экв.		
21.08.2014	LK-006	15.66	58.92	0.79	1.76	3.40	14.73	3.41	24.60	18.62	45.45	0.18	0.33	0.12	0.33	0.14	0.15	0.07	0.10	2.64	4.76	34.35	48.72	7.60	79.38
18.08.2015		9.94	51.73	0.85	2.61	3.02	18.07	2.68	26.75	12.96	43.73	0.15	0.40	0.14	0.52	0.12	0.19	0.00	0.00	2.30	5.74	25.12	49.26		57.29
15.10.2016		9.89	76.02	1.31	5.94	0.80	7.01	0.76	11.03	15.06	75.07	0.71	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.03	22.20	0.00	0.00		34.55
01.09.2017		15.25	47.70	2.31	4.20	4.90	17.60	3.94	23.30	20.20	41.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.00	0.00	1.99	3.00	47.50	56.00		97.97
22.08.2018		8.26	50.85	0.91	3.30	2.32	16.36	2.53	29.49	16.80	67.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28	3.77	12.58	29.17		44.67
07.08.2019		5.83	48.91	0.73	3.62	2.32	22.35	1.58	25.12	16.94	92.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.55	1.70	1.20	4.80	0.40	1.28		29.60
21.08.2014	LK-015	9.78	52.75	1.52	4.81	3.01	18.65	2.30	23.80	19.37	67.82	0.28	0.74	0.13	0.50	0.12	0.19	0.44	0.88	3.06	7.91	10.37	21.09	7.05	50.36
25.08.2015		9.06	33.03	1.10	2.36	10.49	43.97	2.88	20.14	13.48	31.88	0.17	0.31	0.00	0.00	0.12	0.12	0.00	0.00	2.28	3.98	46.28	63.59		85.97
16.10.2016		9.51	64.73	1.33	5.32	0.53	4.13	1.39	17.95	16.55	73.05	0.70	2.38	0.00	0.00	0.46	0.90	0.00	0.00	6.98	22.75	0.35	0.91		37.81
24.08.2017		29.38	42.40	3.51	3.00	10.43	17.30	6.86	18.70	18.94	17.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	1.94	1.30	148.74	80.90		229.94
25.08.2018		8.32	42.87	2.05	6.21	2.34	13.81	3.62	35.25	14.98	50.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.00	0.00	1.45	3.57	23.86	46.32		56.94
19.08.2019		5.13	41.20	1.02	4.80	2.89	26.63	1.80	27.37	12.68	66.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.10	0.00	0.00	1.10	4.24	9.78	29.61		34.45
22.08.2014	LK-017	68.43	64.36	3.14	1.74	11.91	12.88	11.66	21.02	109.53	66.84	0.53	0.25	0.12	0.08	0.55	0.15	0.73	0.25	16.07	7.24	70.71	25.07	7.13	293.38
26.08.2015		59.10	60.03	2.61	1.56	17.09	19.96	9.48	18.45	92.70	61.09	0.46	0.23	0.10	0.08	0.49	0.14	0.06	0.02	13.19	6.42	83.25	31.88		278.54
16.10.2016		66.81	54.86	5.33	2.57	17.40	16.39	15.46	24.02	101.08	53.83	3.37	1.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.75	13.26	101.73	31.48		346.98
28.08.2017		67.43	57.50	3.86	1.90	13.90	13.60	13.30	21.40	97.33	53.80	0.01	0.00	1.10	0.03	0.34	0.10	0.44	0.10	5.82	2.40	133.64	42.90		342.27
25.08.2018		59.36	60.49	3.07	1.84	11.63	13.59	12.34	23.79	102.78	67.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.08	0.53	0.20	13.91	6.79	65.16	25.02		269.26
24.08.2019		52.87	60.76	2.71	1.83	11.60	15.29	10.17	22.12	96.63	72.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.08	0.00	0.00	15.37	8.46	44.94	19.46		234.52
22.08.2014	LK-018	25.59	61.01	1.89	2.66	5.25	14.41	4.80	21.92	37.79	58.47	0.24	0.28	0.13	0.23	0.22	0.15	0.00	0.00	3.85	4.40	40.40	36.31	7.12	120.17
26.08.2015		17.33	56.75	1.39	2.67	3.86	14.54	4.00	25.11	26.10	55.47	0.10	0.17	0.18	0.42	0.21	0.19	0.13	0.15	2.90	4.54	31.53	38.93		87.93
16.10.2016		21.51	51.72	3.20	4.52	4.74	13.07	5.39	24.52	42.95	66.95	3.34	4.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.23	29.03	0.00	0.00		108.37
28.08.2017		37.80	54.20	2.60	2.20	11.35	18.70	8.55	23.20	45.79	42.60	0.02	0.00	0.10	0.00	1.12	0.50	1.31	0.70	6.06	4.20	96.28	52.00		211.95
25.08.2018		24.39	62.13	2.12	3.18	4.64	13.58	4.30	20.72	43.36	71.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.08	0.40	0.37	5.38	6.56	22.23	21.34		107.05
14.08.2019		9.18	53.65	1.12	3.85	2.61	17.47	2.14	23.66	21.91	82.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.11	0.08	0.17	2.50	7.00	4.42	9.74		45.40
25.08.2014	LK-031	24.35	70.76	2.21	3.78	2.45	8.18	3.10	17.28	37.19	70.11	0.20	0.29	0.12	0.26	0.45	0.37	0.10	0.10	6.34	8.82	17.86	19.56	7.35	94.37
30.08.2015		15.56	86.29	1.32	4.30	0.64	4.05	0.50	5.36	14.30	51.45	0.18	0.49	0.12	0.48	0.16	0.25	0.07	0.14	3.70	9.82	17.68	36.96		54.21
14.10.2016		17.37	62.78	2.81	1.02	4.21	4.21	3.95	27.04	25.86	60.62	1.44	2.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.52	25.13	8.48	11.56		78.63
29.08.2017		29.16	53.00	2.16	2.30	8.63	18.00	7.17	24.70	18.19	21.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.04	0.00	1.42	1.20	112.83	77.30		180.57
26.08.2018		14.29	55.32	1.81	4.12	3.35	14.90	3.45	25.30	16.99	42.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	2.92	5.42	35.58	51.91		78.47
20.08.2019		9.56	61.90	0.98	3.74	1.79	13.25	1.72	21.10	12.23	51.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.12	0.00	0.00	2.27	7.02	17.04	41.55		45.65
Среднее		25.20	56.62	2.06	3.26	6.12	15.56	5.17	22.47	37.97	57.40	0.40	0.55	0.08	0.10	0.19	0.14	0.16	0.16	6.92	8.19	42.10	33.33	7.22	127.22

тическими параметрами конкретного лета, а интенсивностью вскрытия и таяния залежи льда.

Химический состав озер. По результатам химического анализа, в составе вод изучаемых озер преобладают ионы хлора и натрия (табл. 1). Такой химический состав обусловлен двумя факторами: близостью Карского моря, а именно, переносом морских аэрозолей в глубь континента на расстояние 100–150 км [*Ермолов и др., 2014; Котова, Шевченко, 2014*]; развитием озерных котловин в засоленных морских отложениях. Среди катионов отмечено более высокое содержание магния по сравнению с кальцием, что, вероятно, связано с криогенным концентрированием вод при ежегодном образовании ледового покрова на водоемах [*Анисимова, 1981*]. Вторые по процентному содержанию анионы – гидрокарбонаты (32 %-экв.); содержание сульфат-иона менее 10 %-экв. Содержание NO_2, NO_3, PO_4, Br составляет менее 1 %-экв. По средним значениям pH (7.6–7.9) воды озер относятся к слабощелочным (см. табл. 1). Средняя минерализация воды фонового озера LK-006 не превышает 70 мг/дм^3, в то время как у озер с термоцирками она составляет 90–300 мг/дм^3.

Межгодовые колебания гидрохимического состава в изучаемых озерах имеют существенные различия (рис. 3). Общая минерализация воды наиболее ярко изменялась в годы с наибольшими метеорологическими флуктуациями – 2016 и 2017 гг. Содержание натрия и хлорид-иона во всех озерах до 2016 г. подобно (см. рис. 3). В последующие годы происходило уменьшение концентрации хлорид-иона во всех озерах, за исключением озера LK-017. Содержание кальция в озерах LK-006 и LK-015 в 2016 г. снижалось, в то время как для остальных озер характерен его рост. В следующем году происходило его увеличение во всех озерах, кроме LK-017. Изменения содержания Mg идентичны динамике Ca и общей минерализации. Межгодовые колебания сульфат- и гидрокарбонат-ионов в целом схожи. Для HCO_3 отмечен рост в LK-015 в 2015 г. и в LK-017 в 2016 г. Отличие от общей динамики SO_4 имеет озеро LK-017 в 2018 г., где наблюдается повышение концентрации иона. В динамике калия озера, по характеру изменений, образуют две группы: 1) озера LK-006 и LK-015; 2) LK-017, LK-018 и LK-031. Средняя массовая концентрация ионов NO_2 выше, чем ионов NO_3 (см. табл. 1). Нитрит-ион распределен во всех озерах абсолютно идентично с выраженным положительным пиком в 2016 г.

Связь динамики концентрации ионов с флуктуациями метеорологических параметров. Для определения влияния погодных характеристик использовались данные содержания ионов у фонового озера LK-006. Наиболее сильно химический состав озера изменялся в 2016 и 2017 гг. (см. рис. 3), что совпадает с периодом наибольших погодных флуктуаций. В условно “жаркий и влажный” 2016 год происходит уменьшение общей минерализации, Ca, Mg, PO_4, HCO_3, NO_3, Br в водах фонового озера. Такое падение концентрации – результат разбавления вод озера при увеличении количества летних осадков. Существует и “зеркальная” тенденция для Cl, K, SO_4, NO_2 (см. рис. 3). Наиболее вероятное объяснение повышения содержания этих ионов – вымывание из оттаявших пород, слагающих водосбор [*Лейбман, Кизяков, 2007*] и(или) поступление их с летними атмосферными осадками [*Фотиев, 1999; Ермилов и др., 2002*]. В “засушливом” 2017 году имеет место ярко выраженное увеличение содержания ионов Na, Cl, K, Mg, Ca, HCO_3 и минерализации (см. рис. 3). При малом количестве осадков происходит уменьшение объема воды в озере и, как следствие, увеличение содержания растворенных ионов.

Дополнительно по данным табл. 1 проведен корреляционный анализ между содержанием ионов в озерах и погодными изменениями (табл. 2). Найдены значимые зависимости для NO_2, SO_4, NO_3 с уровнем статистической значимости $p \leqslant 0.05$. Вид графиков межгодовой динамики концентрации вышеперечисленных ионов (см. рис. 3) подтверждает значения корреляции из табл. 2. Содержание нитрит-иона растет при более теплом и влажном лете, как результат привноса органического вещества в воду озер. Количество летних осадков имеет значимую зависимость (0.51) с сульфат-ионом. Рост содержания нитрат-иона в 2017 г., вероятно, обусловлен окислением нитрит-иона, активно поступавшего в 2016 г.

Влияние термоденудации на гидрохимию озер. Ниже представлен сравнительный анализ межгодовой динамики содержания ионов между фоновым и целевым озерами с учетом изменения интенсивности термоденудации. Озеро LK-015 имеет схожую межгодовую динамику содержания ионов и общей минерализации с фоновым озером LK-006 (см. рис. 3). Различия между ними ярко проявились только в 2015 г. для Ca, Mg и HCO_3 и общей минерализации, когда у термоцирка ТЦ-2 выявлен наибольший прирост площади (2001 м^2 за два года). Динамика Na, Ca, Mg, HCO_3, K и общей минерализации в озере LK-017 сильно отличается от фонового. Озеро имеет наибольшую минерализацию (235–347 мг/л), что, вероятно, связано с развитием термоцирков до начала периода гидрохимического мониторинга и возможного антропогенного влияния при строительстве железной дороги Обская–Бованенково. Максимальная минерализация приходится на тот же период, что и пик термоденудации ТЦ-4(4а), т. е. 2015–2016 гг. (см. рис. 2). Различия в динамике содержания ионов при сравнении с LK-006 наиболее ярко проявились в 2016 г. у ионов Na, Ca, Mg, K и Cl (см. рис. 3). Отмечено сходство в рас-

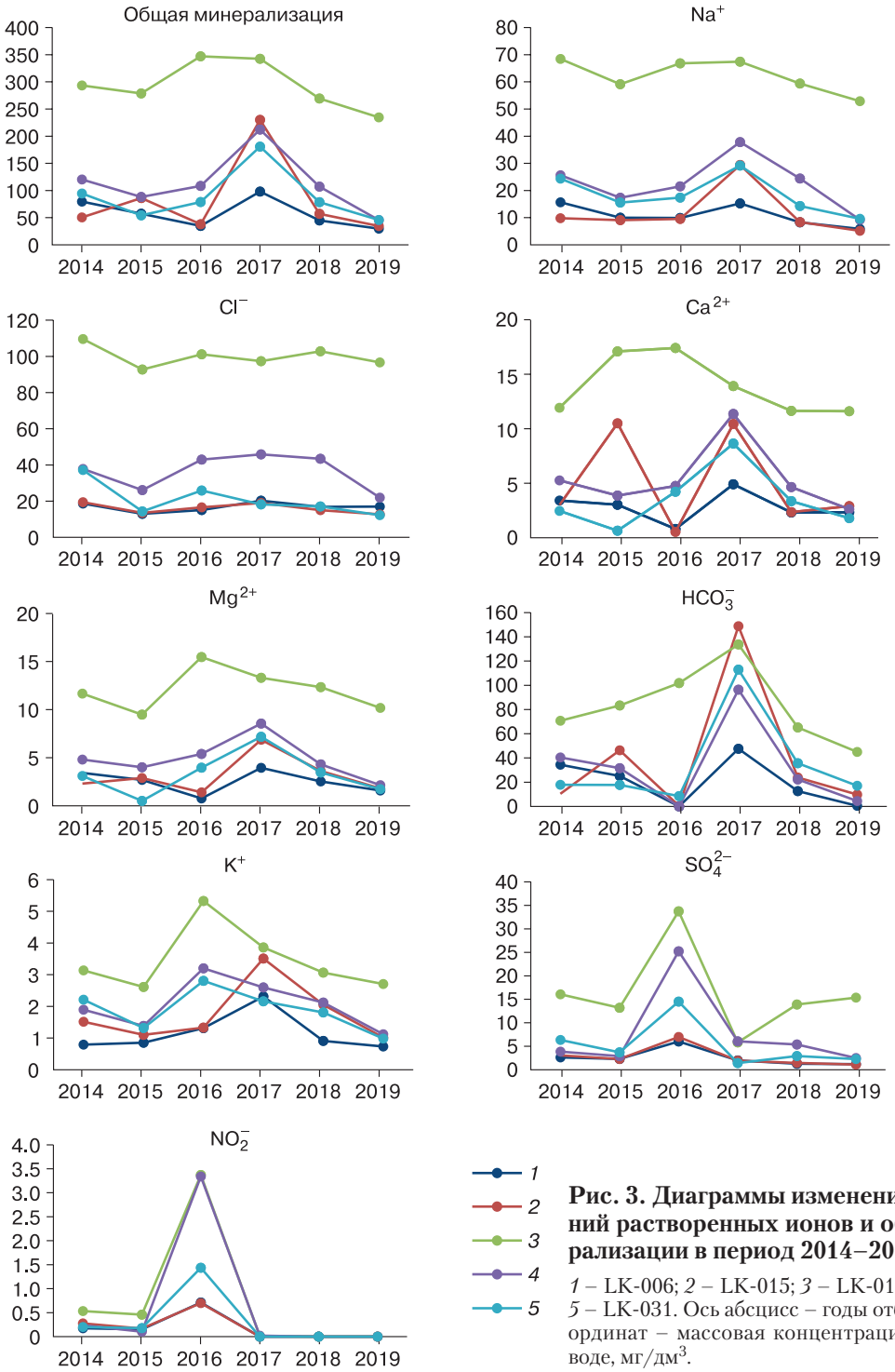

Рис. 3. Диаграммы изменения содержаний растворенных ионов и общей минерализации в период 2014–2019 гг.

1 – LK-006; *2* – LK-015; *3* – LK-017; *4* – LK-018; *5* – LK-031. Ось абсцисс – годы отбора проб, ось ординат – массовая концентрация вещества в воде, мг/дм^3.

пределении химических элементов по годам между озерами LK-018 и LK-031. Отличия от фонового озера установлены для Ca, Mg и общей минерализации (см. рис. 3). Содержание Mg и K во всех озерах изменяется синхронно, предположительно у этих элементов имеется общий источник поступления – надмерзлотные воды.

Различия в ионном составе между фоновым и целевыми озерами существуют для следующих элементов: Na, Ca, Mg, HCO_3, SO_4, Cl. В целом за период наблюдений выраженной связи между приростом площади термоцирков и изменением в гидрохимии озер не обнаружено. Она существует для некоторых озер в отдельные годы. Наиболее

Таблица 2. **Корреляционная матрица химических элементов и метеорологических характеристик за 2014–2019 гг. (метод Ч. Спирмена)**

Показатель	Na	K	Ca	Mg	Cl	NO_2	Br	NO_3	SO_4	Общая минерализация
Сумма среднесуточных положительных температур	–0.18	–0.13	–0.20	–0.31	–0.15	**0.55**	–0.18	–0.35	0.30	–0.28
Среднелетняя температура	0.04	0.27	0.06	0.04	–0.04	0.16	–0.32	**–0.38**	0.14	0.01
Количество теплых дней	–0.03	0.14	–0.03	–0.01	–0.11	**0.37**	–0.32	**–0.39**	0.28	–0.03
Сумма летних осадков	–0.04	–0.05	–0.15	–0.18	–0.03	**0.83**	–0.08	–0.25	**0.51**	–0.12

Примечание. Выделенные полужирным шрифтом коэффициенты корреляции статистически значимы при уровне значимости $p = 0.05$.

ярко ионный состав целевых озер изменялся в период 2016–2017 гг., во время наибольших межгодовых колебаний метеорологических характеристик.

ВЫВОДЫ

В результате гидрохимического мониторинга малых озер Центрального Ямала связи между изменением метеорологических параметров и скорости прироста площадей термоцирков не обнаружено. Установлено влияние межгодовых флуктуаций метеорологических параметров на ионный состав озер, которое выражается в изменении содержания ионов NO_2, SO_4, NO_3. Термоденудация оказывает влияние на гидрохимию малых озер центральной части п-ова Ямал, которое выражается в изменении общей минерализации и концентрации ряда ионов – Ca, Mg, Na, HCO_3, SO_4, Cl в разные годы. Изменение количества летних осадков влияет на содержание ионов Na, Ca, Mg, HCO_3, SO_4 и общую минерализацию вод малых тундровых озер.

Благодарности. *Авторы выражают благодарность А.А. Четверовой (Российско-германская лаборатория полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта ААНИИ, г. Санкт-Петербург) и П.Б. Семенову (ФГБУ “ВНИИОкеангеология” им. И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург) за проведение аналитических лабораторных работ.*

База данных гидрохимических параметров мониторинга создана и развивается в рамках проектов госзадания ТюмНЦ СО РАН (№ АААА-А19-119071990006-3), гранта Президента РФ (№ МК-2842.2022.1.5) и Программы стратегического академического лидерства РУДН. Работа выполнена по госзаданию № 121041600042-7.

Литература

Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В. Химический состав вод малых озер нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири // Успехи соврем. естествознания, 2019, № 7, с. 45–51.

Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука, 1981, 152 с.

Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / Под ред. И.Л. Левинзона, С.И. Ларина и др. Омск, Омская картограф. ф-ка, 2004, 303 с.

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.

Баду Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М., Науч. мир, 2018, 232 с.

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Д.Ю. и др. Изотопно-геохимический состав пластовых ледяных залежей на междуречье рек Мордыяха и Сеяха (Мутная), Центральный Ямал // Арктика и Антарктика, 2018, № 1, с. 50–75.

Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л., Гидрометеоиздат, 1984, 564 с.

Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. Томск, Изд-во Том. ун-та, 2005, 330 с.

Дворников Ю.А. Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворенному органическому веществу: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень, 2016, 176 с.

Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б. и др. Термоденудация на Ямале – источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 33–42.

Ермилов О.М. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне / О.М. Ермилов, Г.И. Грива, В.И. Москвин. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002, 147 с.

Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана, 2014, т. 27, № 9, с. 790–800.

Кизяков А.И., Лейбман М.О. Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 45–58.

Котова Е.И., Шевченко В.П. Влияние дальнего атмосферного переноса на формирование ионного состава атмосферных осадков и снежного покрова прибрежной зоны западного сектора Российской Арктики // Фундам. исслед., 2014, № 12, с. 2310–2314.

Кремлева Т.А. Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: Дис. ... д-ра хим. наук. М., 2015, 260 с.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал: в 3 т. Т. 2. Криосфера Бованенковского неф-

тегазоконденсатного месторождения / Под ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М., ООО "Газпром Экспо", 2013, 424 с.

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

Левченко Г.П. Методы химического анализа природных вод: Метод. указания / Г.П. Левченко, В.Н. Макаров. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003, 86 с.

Лейбман М.О. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова / М.О. Лейбман, А.И. Кизяков. М., Тип. Россельхозакадемии, 2007, 206 с.

Манасыпов Р.М. Биогеохимические особенности экосистем термокарстовых озер субарктики Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2013, 23 с.

Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики / 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. М., Лига-Вент, 2016, с. 170–196.

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.

Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Под ред. Е.М. Чувилина. М., ГЕОС, 2007, 137 с.

Трофимова Т.П., Жирков И.И., Жирков К.И. и др. Современное состояние озер бассейна реки Яны // Вестн. Северо-вост. федерального ун-та им. М.К. Аммосова. Сер. Науки о Земле, 2018, № 2 (10), с. 32–40.

Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40–65.

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. Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре Центрального Ямала // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 49–60.

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.

Bruhwiler L., Parmentier F.J.W., Crill P. et al. The Arctic Carbon Cycle and its response to changing climate // Current Climate Change Rep., 2021, vol. 7, p. 14–34. – https://doi.org/10.1007/s40641-020-00169-5

Dvornikov Y., Leibmann M., Heim B. et al. Geo-database and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the Vaskiny Dachi research station, Yamal, Russia // Polarforschung, 2016, vol. 85, p. 107–115.

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 // Permafr. Periglac. Process., 2019, vol. 30 (3), p. 146–162.

Embleton C.M. Periglacial geomorphology / C.M. Embleton, C.A. King. London, Edward Arnold, 1975, 279 p.

Kokelj S.V., Jenkins R.E., Milburn D. et al. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // Permafr. Periglac. Process., 2005, vol. 16, p. 343–353. – https://doi.org/10.1002/ppp.536

Lafrenière M.J., Lamoureux S.F. Thermal perturbation and rainfall runoff have greater impact on seasonal solute loads than physical disturbance of the active layer // Permafr. Periglac. Process., 2013, vol. 24, p. 241–251. – https://doi.org/10.1002/ppp.1784

Lafreniere M.J., Lamoureux S.F. Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes // Earth-Sci. Rev., 2019, vol. 191, p. 212–223.

Loiko S.V., Pokrovsky O.S., Raudina T.V. et al. Abrupt permafrost collapse enhances organic carbon, CO_2, nutrient and metal release into surface waters // Chem. Geol., 2017, vol. 471, p. 153–165.

Overland J.E., Hanna E., Hanssen-Bauer I. et al. Surface air temperature // Arct. Rep. Card, 2019, vol. 2019, p. 5–10.

Roberts K.E., Lamoureux S.F., Kyser T.K. et al. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of High Arctic Lakes // Sci. Rep., 2017, vol. 7 (1), 13292. DOI: 10.1038/s41598-017-13658-9.

URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/ (дата обращения: 15.06.2023).

References

Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V. Chemical composition of waters of small lakes of oil and gas producing regions of the North of Western Siberia. Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Successes of modern natural science], 2019, No. 7, p. 45–51.

Anisimova N.P. Kriogidrogeokhimicheskiye osobennosti merzloy zony [Cryohydrogeochemical features of the frozen zone]. Novosibirsk, Nauka, 1981, 152 p. (in Russian).

Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Atlas of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug]. I.L. Levinsohn, S.I. Larin (Eds.). Omsk, Omsk Cartographic Factory, 2004, 303 p. (in Russian).

Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A. et al. Activation of cryogenic processes in the territory of Central Yamal as a result of regional and local changes in climate and thermal state of rocks. Russ. Meteorol. and Hydrol., 2019, vol. 44, No. 4, p. 99–109.

Badu Y.B. Kriogennaya tolshcha gazonosnykh struktur Yamala. O vliyanii gazovykh zalezhey na formirovaniye i razvitiye kriogennoy tolshchi [Cryogenic formation of Yamal gas-bearing structures. On the influence of gas deposits on the formation and development of the cryogenic stratum]. Moscow, Nauchnyi mir, 2018, 232 p. (in Russian).

Vasilchuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasilchuk D.Yu. et al. Isotope-geochemical composition of formation ice deposits between the rivers Mordyakha and Seyakha (Mutnaya), Central Yamal. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2018, No. 1, p. 50–75.

Glyatsiologicheskiy slovar [Glossary of Glaciology]. V.M. Kotlyakov (Ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 564 p. (in Russian).

Griva G.I. Geoekologicheskiye usloviya razrabotki gazovykh mestorozhdeniy Yamala [Geoecological conditions for the development of gas fields in Yamal]. Tomsk, Izd-vo TGU, 2005, 330 p. (in Russian).

Dvornikov Yu.A. Processes of thermal denudation in cryolithozone and their indication by dissolved organic matter: Dissertation PhD. Tyumen, 2016, 176 p. (in Russian).

Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Heim B. et al. Thermodenudation on Yamal peninsula as a source of the dissolved organic

matter increase in thaw lakes. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 2, p. 28–37.

Ermilov O.M., Griva G.I., Moskvin V.I. Vozdeystviye obyektov gazovoy promyshlennosti na severnyye ekosistemy i ekologicheskaya stabilnost geotekhnicheskikh kompleksov v kriolitozone [Impact of gas industry facilities on northern ecosystems and ecological stability of geotechnical complexes in the cryolithic zone]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2002, 147 p. (in Russian).

Ermolov Yu.V., Makhatkov I.D., Khudyaev S.A. Background concentrations of chemical elements in the snow cover of the central sector of Western Siberia. Optics of the Atmosphere and Ocean, 2014, vol. 7, No. 6, p. 636–642.

Kizyakov A.I., Leibman M.O. Cryogenic relief-formation processes: a review for 2010–2015 publications. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 4, p. 40–52.

Kotova E.I., Shevchenko V.P. Influence of long-range atmospheric transport on formation of ionic composition of atmospheric precipitation and snow cover in coastal zone of western Russian Arctic. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental Research], 2014, No. 12, p. 2310–2314.

Kremleva T.A. Geochemical factors of stability of water systems to anthropogenic loads: Doctoral dissertation. Moscow, 2015, 260 p. (in Russian).

Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal. T. 2. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya. [Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula: in 3 volumes. Vol. 2. Cryosphere of the Bovanenkovsky oil-gas-condensate field]. Yu.B. Badu, N.A. Gafarova, E.E. Podbornoy (Eds.). Moscow, Gazprom Expo, 2013, 424 p. (in Russian).

Kritsuk L.N. Podzemnyye l'dy Zapadnoy Sibiri [Underground ice of Western Siberia]. Moscow, Nauchnyi mir, 2010, 352 p. (in Russian).

Levchenko G.P., Makarov V.N. Metody khimicheskogo analiza prirodnykh vod: Metodicheskiye ukazaniya [Methods of chemical analysis of natural waters: Methodological guidelines]. Yakutsk, Izd-vo IMZ SO RAN, 2003, 86 p. (in Russian).

Leibman M.O., Kizyakov A.I. Kriogennyye opolzni Yamala i Yugorskogo poluostrova [Cryogenic landslides of Yamal and the Ugra Peninsula]. Moscow, Printing House of the Russ. Agricultural Academy, 2007, 206 p. (in Russian).

Manasypov R.M. Biogeochemical Features of Thermokarst Lake Ecosystems of the Subarctic of Western Siberia: Autoreferat Ph.D dissertation. Tomsk, 2013, 23 p. (in Russian).

Menyayushchiysya klimat i sotsial'no-ekonomicheskiy potentsial Rossiyskoy Arktiki [Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic]. S.A. Socratov (Ed.). Moscow, League-Vent, 2015, 128 p. (in Russian).

Romanenko F.A., Shilovtseva O.A. Climate change in the Arctic, catastrophic natural processes and relief dynamics on Franz Josef Land. In: Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic. Moscow, League-Vent, 2016, p. 170–196 (in Russian).

Streletskaya I.D., Leibman M.O. Cryogeochemical interrelation of massive ground ice, cryopegs, and enclosing deposits of Central Yamal. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2002, vol. VI, No. 3, p. 15–24.

Stroyeniye i svoystva porod kriolitozony yuzhnoy chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Structure and Properties of Cryolithic Rocks in the Southern Part of the Bovanenkovsky Gas-Condensate Field]. E.M. Chuvilin (Ed.). Moscow, GEOS, 2007, 137 p. (in Russian).

Trofimova T.P., Zhirkov I.I., Zhirkov K.I. et al. The current state of the lakes of the Yana River basin. Vestnik Severo-Vostochnogo Federal'nogoUniversiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle [Bulletin Ammosov Northeastern Federal University. Ser.: Earth Sciences], 2018, No. 2 (10), p. 32–40.

Fotiev S.M. The regularities in the formation of natural waters of ionic-salt composition, Yamal peninsula. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 2, p. 40–65.

Kholoptsev A.V., Podporin S.A., Kononova N.K. Arctic ice cover and meridional components of atmospheric circulation in the Northern Hemisphere of the Earth. Slozhnyye sistemy [Complex Systems], 2020, No. 2 (35) p. 4–10.

Khomutov A.V., Leibman M.O. Rating of cryogenic translational landsliding hazard in the tundra of Central Yamal. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 2, p. 45–54.

Tsaturov Yu.S., Klepikov A.V. Modern climate change in the Arctic: the results of the new assessment report of the Arctic Council. Arktika: Ekologia i Ekonomika [Arctic: ecology and economy], 2012, No. 4 (8), p. 76–81.

Bruhwiler L., Parmentier F.J.W., Crill P. et al. The Arctic Carbon Cycle and its response to changing climate. Current Climate Change Rep., 2021, vol. 7, p. 14–34.

Dvornikov Y., Leibmann M., Heim B. et al. Geo-database and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the Vaskiny Dachi research station, Yamal, Russia. Polarforschung, 2016, vol. 85, p. 107–115.

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. Permafr. Periglac. Process., 2019, vol. 30 (3), p. 146–162.

Embleton C.M., King C.A. Periglacial geomorphology. London, Edward Arnold, 1975, 279 p.

Kokelj S.V., Jenkins R.E., Milburn D. et al. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada. Permafr. Periglac. Process., 2005, vol. 16, p. 343–353.

Lafrenière M.J., Lamoureux S.F. Thermal perturbation and rainfall runoff have greater impact on seasonal solute loads than physical disturbance of the active layer. Permafr. Periglac. Process., 2013, vol. 24, p. 241–251.

Lafreniere M.J., Lamoureux S.F. Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. Earth-Sci. Rev., 2019, vol. 191, p. 212–223.

Loiko S.V., Pokrovsky O.S., Raudina T.V. et al. Abrupt permafrost collapse enhances organic carbon, CO_2, nutrient and metal release into surface waters. Chem. Geol., 2017, vol. 471, p. 153–165.

Overland J.E., Hanna E., Hanssen-Bauer I. et al. Surface air temperature. Arct. Rep. Card, 2019, vol. 2019, p. 5–10.

Roberts K.E., Lamoureux S.F., Kyser T.K. et al. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of High Arctic Lakes. Scientific Rep., 2017, vol. 7 (1), 13292.

URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/ (last visited: 15.06.2023).

Поступила в редакцию 23 марта 2022 г.,
после доработки – 24 мая 2023 г.,
принята к публикации 28 июня 2023 г.