

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 504.06

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-130-142

EDN: VPBYGV

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР
НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ)Куликова Мария Андреевна¹, Соромотин Андрей Владимирович²^{1,2} Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия² Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Тюмень, Россия¹m.a.kulikova@utmn.ru, SPIN-код: 5830-5589, РИНЦ AuthorID: 1299274, ORCID: 0009-0004-0916-0067²a.v.soromotin@utmn.ru, SPIN-код: 6169-3090, РИНЦ Author ID: 251756, ORCID: 0000-0002-7771-4592

Аннотация. Деградация многолетнемерзлых пород приводит к изменениям в биогеохимических циклах углерода, биогенных веществ и металлов в водных системах ландшафтов вечной мерзлоты. Для анализа изменений в потоках элементов в озерных системах Арктики ключевую роль играет характеристика химического состава донных отложений. Рассмотрен гранулометрический и элементный состав донных отложений и почвообразующих пород водосборных площадей малых термокарстовых озер, расположенных в южной части Тазовского полуострова, в междуречье рек Пура и Таза (Западно-Сибирская равнина). Элементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), гранулометрический состав – методом лазерной дифракции, содержание органического углерода – методом высокотемпературного каталитического окисления. Условия в прибрежных зонах водоемов, находящиеся под воздействием криогенных процессов, приводят к изменению соотношения размерных фракций в сторону увеличения доли более крупных фракций и накоплению менее отсортированного материала. Среди породообразующих элементов почвообразующие породы и донные отложения обеднены Al, Fe, K, Na, Ca, Mg относительно верхней континентальной коры, при этом наблюдается обогащение почвообразующих пород титаном, донных отложений – общей серой. Обнаружено умеренное обогащение донных отложений кадмием и общей серой относительно верхней континентальной коры. Элементный состав донных отложений термокарстовых озер Пур-Тазовского междуречья в целом наследует состав пород их водосборных площадей и формируется в тесной связи с ними, отражая влияние преимущественно породного и литогенного факторов. Влияние фациального фактора отражается в накоплении органического вещества, общей серы и халькофильных элементов. Накопление общей серы в донных отложениях может быть результатом восстановления сульфатов в детрите. Обоеднение донных отложений относительно почвообразующих пород в отношении ряда элементов может быть обусловлено их индивидуальными химическими свойствами и формами нахождения, а также гранулометрическим составом осадков.

Ключевые слова: Западная Сибирь, термокарстовые озера, донные отложения, гранулометрия, элементный состав

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-16-00163.

Для цитирования: Куликова М.А., Соромотин А.В. Элементный состав донных отложений термокарстовых озер на севере Западной Сибири (на примере Пур-Тазовского междуречья) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 4(75). С. 130–142. DOI 10.17072/2079-7877-2025-4-130-142 EDN VPBYGV

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-130-142

EDN: VPBYGV

ELEMENTAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS OF THERMOKARST LAKES
IN THE NORTH OF WESTERN SIBERIA (THE CASE OF THE PUR-TAZ INTERFLUVE)Maria A. Kulikova¹, Andrey V. Soromotin²^{1,2} University of Tyumen, Tyumen, Russia² Earth Cryosphere Institute, Tyumen Science Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia¹m.a.kulikova@utmn.ru, SPIN-code: 5830-5589, RINTs Author ID: 1299274, ORCID: 0009-0004-0916-0067²a.v.soromotin@utmn.ru, SPIN-code: 6169-3090, RINTs Author ID: 251756, ORCID: 0000-0002-7771-4592

Abstract. The degradation of permafrost leads to changes in the biogeochemical cycles of carbon, nutrients, and metals in the aquatic systems of permafrost landscapes. The characterization of the chemical composition of bottom



© 2025 Куликова М.А., Соромотин А.В. Лицензировано по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

sediments plays a key role in analyzing changes in element fluxes in Arctic lake systems. This study deals with the granulometric and elemental composition of bottom sediments and soil-forming rocks in the catchment areas of small thermokarst lakes in the southern part of the Tazovsky Peninsula, between the Pur and Taz Rivers (West Siberian Plain). The elemental composition was determined by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), the granulometric composition – by laser diffraction, the organic carbon content – by high-temperature catalytic oxidation. The conditions in the littoral zones of water bodies under the influence of cryogenic processes lead to a change in the ratio of size fractions toward an increase in the proportion of larger fractions and accumulation of less sorted material. Among the rock-forming elements, soil-forming rocks and bottom sediments are depleted in Al, Fe, K, Na, Ca, Mg relative to the upper continental crust, while soil-forming rocks are rich in titanium and bottom sediments – in total sulfur. Bottom sediments were found to be moderately rich in cadmium and total sulfur relative to the upper continental crust. The elemental composition of bottom sediments of thermokarst lakes of the Pur-Taz interfluvium generally inherits the composition of rocks in the catchment areas and is formed in close connection with them, this demonstrating the influence of mainly rock and lithogenic factors. The influence of the facies factor is manifested in the accumulation of organic matter, total sulfur, and chalcophilic elements. The accumulation of total sulfur in bottom sediments may be the result of sulfate reduction in detritus. The depletion of bottom sediments in certain elements relative to parent rocks may be due to their individual chemical properties and forms of occurrence as well as the grain size distribution of the sediments.

Keywords: Western Siberia, thermokarst lakes, bottom sediments, granulometry, elemental composition

Funding: the research was funded by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 24-16-00163.

For citation: Kulikova, M.A., Soromotin, A.V. Elemental composition of bottom sediments of thermokarst lakes in the north of Western Siberia (the case of the Pur-Taz interfluvium). *Geographical Bulletin*. No. 4(75). Pp 130–142. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-130-142 EDN: VPBYGV

Введение

Характерной особенностью арктического ландшафта являются относительно небольшие, но многочисленные термокарстовые озера, занимающие до 40 % поверхности суши на равнинах Арктики [29]. Термокарстовое происхождение имеет абсолютное большинство озер, представляя собой заполненные водой просадочные формы рельефа, образованные в результате вытаявания голоценовых подземных льдов [5, 39, 43]. Основными источниками питания термокарстовых озер являются атмосферные осадки и пресная вода, образующаяся при сезонном оттаивании многолетнемерзлых пород [8, 9].

В силу своего генезиса они могут служить эффективными индикаторами текущих тенденций изменения климата и состояния вечной мерзлоты [36, 26]. Деградация многолетнемерзлых пород вызывает трансформации в биогеохимических циклах углерода, биогенных веществ и металлов в водных системах ландшафтов вечной мерзлоты [6, 26, 31, 36, 41, 42]. В результате термокарстовых процессов химический состав пресной воды арктических водоемов может существенно измениться вследствие миграции веществ с поверхностным стоком из мерзлых грунтов [27, 33]. Увеличение выноса различных элементов с водосбора в водоемы Арктики может быть связано с различными факторами, включая таяние вечной мерзлоты, усиленный приток воды из заболоченных территорий, увеличение паводкового стока [38]. В результате деградации вечной мерзлоты термокарстовые озера образуют своеобразные временные ловушки для тяжелых металлов [41]. Активизация экзогенных криогенных геологических процессов, таких как склоновая береговая термоденудация (оползни), термоэрозионные и термоабразионные процессы с формированием полигонального рельефа по берегам озер с глубокими межполигональными понижениями, заполненными талыми ледниковыми водами, также меняет состав озерных вод и донных отложений [2, 12].

Необходимость изучения биогеохимических процессов, происходящих в термокарстовых озерах, обусловлена и социальным фактором [25]. Термокарст, вызванный деградацией вечной мерзлоты, влияет на жизнь и хозяйственную деятельность коренных народов, поскольку оленеводы должны учитывать вероятность проявлений термокарста при выборе места стоянки и выполнении процедур выпаса. В качестве источника питьевой воды для себя и домашних северных оленей ненцы предпочитают термокарстовые озера (хасыреи) другим видам озер, считая, что вода в них чище [32].

Традиционно качество водоемов определяется на основе концентраций различных веществ, растворенных в воде, однако в большинстве озер концентрации элементов в верхней части донных отложений значительно выше, чем в водной толще, что позволяет рассматривать геохимический состав донных отложений в качестве информативного показателя качества вод [3]. Донные отложения арктических озер содержат информацию о биогеохимических процессах на водосборе и в самом водоеме [21, 26].

Для оценки изменений в потоках элементов в озерных системах Арктики решающее значение имеет характеристика химического состава донных отложений. Научных публикаций по составу седиментов арктических озер Западной Сибири крайне мало, а непосредственно по озерам термокарстового генезиса имеются единичные работы. Например, при изучении термокарстовых озер различных стадий развития в пределах Надым-Пурского междуречья выявлено накопление донными отложениями некоторых микроэлементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Sb) на ранней стадии развития озерной экосистемы в процессе диагенеза, а также выщелачивание из донных отложений других компонентов (Co, Ni, As) на всех стадиях развития экосистемы [24]. В работе Т.А. Кремлевой с соав. (2014) по результатам широкомасштабных исследований малых озер Западной Сибири установлена закономерность накопления группы микроэлементов (Cr, Cu, Ni, Sr, Ti, V, Zn, Zr, Ag) в донных осадках совместно с алюмо-

*Экология и природопользование**Куликова М.А., Соромотин А.В.*

силикатами и оксидом железа. Авторами получено математическое выражение, описывающее сорбционные процессы в системе «вода – донное отложение» для Cr, Cu, Sr, V, Zn [10]. Установлено обогащение донных осадков озер Пур-Тазовского междуречья относительно почв их водосборных площадей микроэлементами и обеднение макроэлементами, за исключением железа и алюминия [20]. При рассмотрении характера распределения органического углерода и микроэлементов в донных отложениях термокарстовых озер тундры и лесотундры по глубине установлены высокие корреляции микроэлементов (Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Pb) с содержанием органического углерода, Fe, Mn [14]. На основе анализа колонок донных отложений двух озер на территории Ямальского и Тазовского полуостровов показано, что содержание всех элементов, за исключением Hg, в донных отложениях по всей глубине колонки остается на уровне фоновых [21]. По результатам анализа содержания нефтяных углеводородов и микроэлементов в донных отложениях озер Надым-Пур-Тазовского междуречья выявлено, что основными природными факторами формирования химического состава осадков являются породный, литогенный и фациальный факторы [11]. Установлено, что содержание тяжелых металлов в донных отложениях водных объектов севера Западной Сибири в основном определяется их гранулометрией и составом подстилающих пород, в меньшей степени – обстановками осадконакопления [17].

Совместного анализа гранулометрического и геохимического составов донных отложений и почвообразующих пород в пределах водосборной площади конкретных термокарстовых озер в субарктике Западной Сибири не проводилось. Учет физических и химических свойств почвообразующих пород водосбора позволяет проанализировать особенности осадконакопления в термокарстовых озерах. В этой связи целью исследования выступает оценка современного гранулометрического и элементного составов донных отложений термокарстовых озер субарктики Западной Сибири. В ходе исследования нами решались следующие задачи: 1) проанализировать гранулометрический состав донных отложений термокарстовых озер и почвообразующих пород в пределах их водосборов; 2) провести анализ элементного состава донных отложений озер и почвообразующих пород; 3) выявить особенности накопления химических элементов в донных отложениях термокарстовых озер. Мы предполагаем, что состав донных отложений термокарстовых озер во многом определяется исходным составом субстрата и притоком обломочного материала и элементов с водосборов под действием термокарстовых процессов, а также биогеохимическими процессами в самих водоемах.

Исследованные озера расположены в перспективном нефтегазоносном районе, и полученные нами данные об элементном составе донных отложений могут рассматриваться как фоновые в последующих мониторинговых работах. В отечественной и зарубежной научной литературе неоднократно предлагалось рассматривать водные объекты как индикаторы антропогенной нагрузки при нефтедобыче [4, 11, 15, 18, 22, 34, 35, 41].

Материал и методы

Исследованные малые термокарстовые озера расположены в южной части Тазовского полуострова, в междуречье рек Пура и Таза (Западно-Сибирская равнина) (табл. 1, рис. 1). В соответствии с классификацией В.П. Иванова (1948) озера относятся к категории малых, поскольку площадь зеркала составляла от 0,04 до 0,43 км². По районированию циркумполярного арктического региона, принятому CAFF, территория исследований относится к субарктической подзоне арктической зоны. Согласно геоморфологическому районированию (по П.П. Генералову), озера приурочены к Пур-Тазовскому блоку низких морских и озерно-аллювиальных террас. Горные породы, вмещающие котловины исследованных озер, представлены озерно-аллювиальными отложениями третьей надпойменной террасы р. Таз (Ia³III), а также аллювиально-морскими отложениями четвертой морской террасы (am⁴III) разнообразного гранулометрического состава. Породы района исследований мерзлые, мономинеральные, с большой долей силикатов и кварцевых песков. Распространение многолетнемерзлых пород носит сплошной характер [1]. Котловины озер врезаны в рыхлые отложения плейстоцена и голоцена под мощным слоем торфа [5]. Берега представлены торфяными сфагновыми мхами, донные отложения озер в силу термокарстового генезиса сложены торфяным детритом, подстилаемым льдистыми минеральными песчаными и супесчаными породами.

Пробы верхнего слоя (5–20 см) минеральной части (содержание органического углерода менее 3 %) донных отложений отбирались с использованием ручного пробоотборника-бура в прибрежной части озер в 10–15 м от берега, представляющей собой зону транспорта твердых частиц в депрессионные понижения, где происходит их захоронение. Донные отложения серо-зеленого и серо-коричневого цвета, песчаного состава, с характерным сероводородным запахом. Пробы почвообразующих пород (горизонт С в интервале глубин 5–15 см) отбирались в пределах водосборной площади каждого озера с использованием ручного почвенного пробоотборника. В лаборатории образцы высушивались до воздушно-сухого состояния, после чего измельчались в фарфоровой ступке.

Содержание органического углерода (C_{орг}) определено методом высокотемпературного каталитического окисления на элементном анализаторе Vario PYRO Cube (Elementar, Германия). Концентрации элементов (Al, Fe, Na, Ca, K, Mn, Mg, Ti, P, S, Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U) определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в Аналитическом сертификационном испытательном центре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН, г. Черноголовка).

Гранулометрический состав осадков определялся методом лазерной дифракции (анализатор Beckman Coulter LS 13 320, США). Распределение частиц происходило по размерам согласно международной классификации IUSS Working Group WRB (2015) и USDA. Гранулометрические коэффициенты – средний размер зерен

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

(M_z), коэффициенты сортировки (σ), асимметрии (Sk_1), эксцесса (K_G) – определяли графическим методом [30] в программном обеспечении GRADISTAT (версия 8.0).

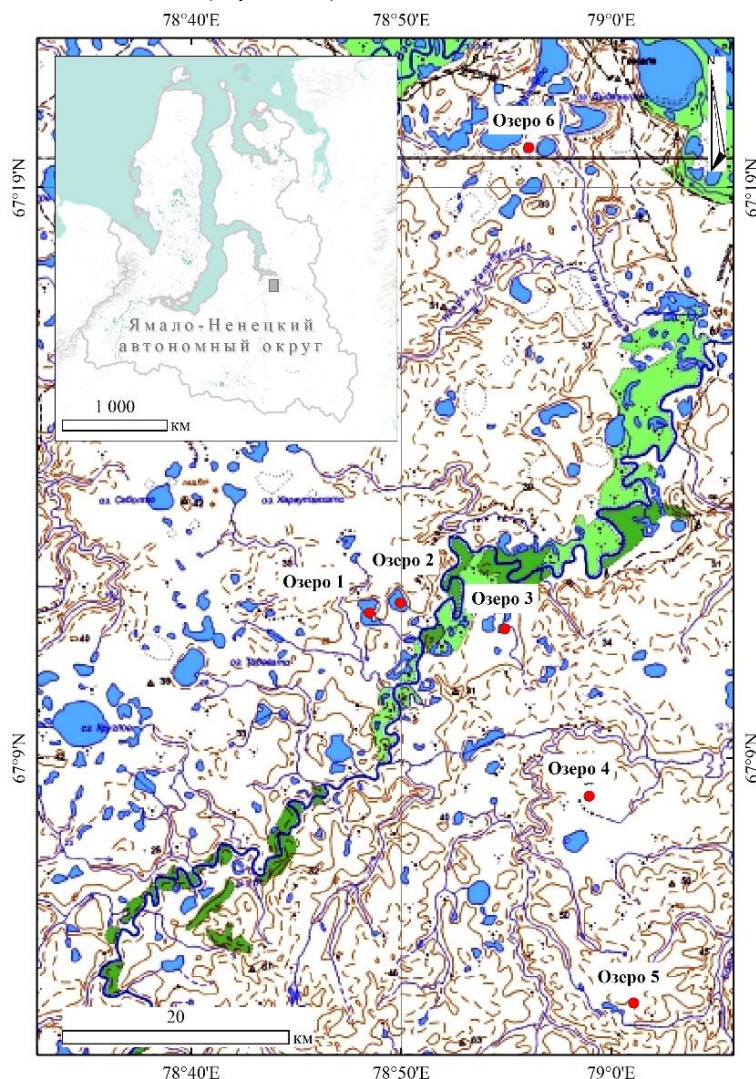


Рис. 1. Обзорная карта-схема расположения исследованных озер

Fig. 1. Overview map-scheme of the location of the studied lakes

Таблица 1
Table 1Характеристики исследованных озер
Characteristics of the studied lakes

Шифр озера	Координаты центра	Тип отложения	Абсолютная высота уреза воды на дату съемки, м БС	Площадь акватории, км ²	Максимальная глубина, м
Озеро 1	N 67°11'41" E 78°48'29"	la ³ III	17	0,43	2,4
Озеро 2	N 67°11'52" E 78°49'57"	la ³ III	19	0,34	1,8
Озеро 3	N 67°11'23" E 78°54'56"	la ³ III	14	0,06	2,0
Озеро 4	N 67°08'18" E 78°58'57"	la ³ III	40	0,04	2,5
Озеро 5	N 67°04'28" E 79°01'04"	am ⁴ III	66	0,04	4,5
Озеро 6	N 67°20'14" E 78°56'04"	la ³ III	6	0,09	2,5

Для статистической обработки и визуализации данных использовались R версии 4.3.2 (пакеты ggplot2 (3.5.1), scatterplot3d (0.3–44), MS Excel 2019. Гипотеза о соответствии распределения нормальному закону принималась по критерию Шапиро – Уилка при уровне значимости $\alpha=0,05$. Поскольку больше половины из рассматриваемых параметров подтверждали гипотезу о нормальности распределений для представления результатов принято среднее арифметическое. Для оценки значимости различий малых выборок применялся непараметрический критерий Манна – Уитни при $\alpha=0,05$. Корреляции между параметрами оценивались на основе расчета коэффициента ранговой корреляции r-Спирмена. Иерархический кластерный анализ выполнен для определения связи между исследованными объектами методом Варда с использованием евклидова расстояния.

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

Для интерпретации геохимических данных опирались на: средние содержания элементов в верхней континентальной коре (кларки) [40], содержания элементов в донных отложениях озер тундры Западной Сибири [8].

Для характеристики степени концентрации или рассеяния химических элементов рассчитаны кларки концентрации (далее – КК) и рассеяния (далее – КР) относительно Земной коры [40] по формулам (1, 2) [7]:

$$KK = C_i / K \quad (1)$$

$$KP = K / C_i \quad (2)$$

где C_i – содержание данного элемента в изучаемом объекте; K – кларк верхней части континентальной земной коры.

Значения коэффициентов обогащения рассчитаны согласно формуле (3) [44]:

$$EF = \frac{C_x}{C_{Al}}(\text{образец}) / \frac{C_x}{C_{Al}}(\text{фон}), \quad (3)$$

где C_x (образец) – измеренная концентрация элемента в исследуемом образце; C_x (фон) – концентрация этого же элемента в фоновом образце; C_{Al} – концентрация референтного (эталонного) элемента (алюминия) в исследуемом и фоновом образцах. Интерпретация значений EF принята согласно [23], где: $EF < 1$ – нет обогащения; $1 < EF < 3$ – незначительное обогащение; $3 < EF < 5$ – умеренное обогащение; $5 < EF < 10$ – умеренно-сильное обогащение; $10 < EF < 25$ – сильное обогащение; $25 < EF < 50$ – очень сильное обогащение; $EF > 50$ – чрезвычайно сильное обогащение.

Результаты и обсуждение

Характеристика гранулометрического состава

Анализ гранулометрического состава показал, что в донных отложениях преобладает песчаная фракция (>50 мкм), в почвообразующих породах – пылеватая (2–50 мкм) (табл. 2). Песчаные и пылеватые фракции в совокупности в среднем составляют более 90 % общего содержания частиц как в донных отложениях, так и в почвообразующих породах. Содержание песчаных фракций в донных отложениях в среднем составило более половины веса проб, в то время как в почвообразующих породах процентное содержание частиц данной размерной фракции более чем в 2 раза ниже. Пылеватые фракции в почвообразующих породах в среднем составляют почти две трети общего содержания частиц (табл. 2). Сложившиеся условия осадконакопления в прибрежных частях водоемов, формирующихся преимущественно под действием криогенных процессов, приводят к изменению соотношения размерных фракций зерен в сторону накопления более крупных фракций по сравнению с почвообразующими породами.

Таблица 2

Table 2

Содержание размерных фракций и рассчитанные коэффициенты гранулометрического состава донных отложений и почвообразующих пород термокарстовых озер Пур-Тазовского междуречья (среднее(min-max))

The content of size fractions and calculated coefficients of granulometric composition of bottom sediments and soil-forming rocks of thermokarst lakes of the Pur-Taz interfluvium (mean (min-max))

Параметр		Донные отложения (n=5)	Почвообразующие породы (n=15)
Содержание размерных фракций, %	Глина (<2 мкм)*	2,21 (0,37–3,30)	9,83 (7,23–14,27)
	Пыль (2–50 мкм)*	39,06 (20,27–60,05)	67,39 (61,46–80,13)
	Песок (>50 мкм)*	58,73 (36,70–79,36)	22,79 (5,60–29,71)
Значения гранулометрических коэффициентов	Mz, φ*	2,66 (1,56–3,58)	4,10 (3,84–4,60)
	σ, φ*	1,82 (1,59–2,06)	1,48 (1,20–1,66)
	Sk1	0,06 (–0,26–0,28)	0,04 (–0,13–0,21)
	KG*	0,80 (0,69–0,90)	1,31 (1,13–1,38)

Примечание: Звездочкой (*) отмечены параметры, по которым различия между донными отложениями и почвообразующими породами достоверны при $p < 0,05$, исходя из расчета критерия Манна – Уитни.

Note: (*) indicates parameters for which the differences between bottom sediments and soil-forming rocks are significant at $p < 0.05$ based on the Mann-Whitney test.

Расчеты гранулометрических коэффициентов показали, что материал донных отложений обследованных озер слабее отсортирован, характеризуется более крупным средним размером зерен и низкими значениями эксцесса по сравнению с материалом почвообразующих пород водосборов (табл. 2). Перенос вещества и формирование несортированного смешанного осадка в донных отложениях прибрежной части термокарстовых озер в результате различных термоденудационных процессов [12] провоцирует увеличение среднего размера зерен и ухудшение сортировки. Более низкие значения эксцесса кривых распределения размерных фракций донных отложений и плохая отсортированность зерен также указывают на то, что интенсивность привноса обломочного материала превышает скорость его динамической обработки. Береговая зона озер подвержена волновому воздействию, что приводит к разрушению торфяника, эрозии, отступанию береговой линии и привносу почвообразующей породы в прибрежную часть озер вследствие бокового дренажа [2, 37].

Расчеты гранулометрических коэффициентов показали, что материал донных отложений обследованных озер слабее отсортирован, характеризуется более крупным средним размером зерен и низкими значениями эксцесса по сравнению с материалом почвообразующих пород водосборов (табл. 2). Перенос вещества и формирование несортированного смешанного осадка в донных отложениях прибрежной части термокарстовых озер

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

в результате различных термоденудационных процессов [12] ведет к увеличению среднего размера зерен и ухудшению сортировки. Более низкие значения эксцесса кривых распределения размерных фракций донных отложений и плохая отсортированность зерен также указывают на то, что интенсивность привноса обломочного материала превышает скорость его динамической обработки.



Рис. 2. Гранулометрический состав исследованных донных отложений и почвообразующих пород
Fig. 2. Granulometric composition of the studied sediments and soil-forming rocks

Береговая зона озер подвержена волновому воздействию, что приводит к разрушению торфяника, эрозии, отступанию береговой линии и привносу почвообразующей породы в прибрежную часть озер вследствие бокового дренажа [2, 37].

Донные отложения и почвообразующие породы хорошо визуальнo дифференцируются на диаграмме гранулометрического состава (рис. 2).

Схожесть гранулометрического состава опробованных почвообразующих пород и высокое разнообразие донных отложений свидетельствуют о различиях в обстановках осадконакопления, обусловленных индивидуальными особенностями водоемов. Факторы, определяющие индивидуальные особенности осадконакопления в термокарстовых озерах при относительно однородных почвообразующих породах, нуждаются в дополнительном изучении.

Характеристика элементного состава

Концентрации исследованных породообразующих элементов в донных отложениях и почвообразующих породах представлены в табл. 3. Сопоставление концентраций породообразующих элементов в почвообразующих породах и донных отложениях с составом верхней континентальной коры [40] показало обеднение Al, Fe, K, Na, Ca, Mg. Почвообразующие породы обогащены относительно верхней континентальной коры титаном, донные отложения – общей серой. Наши данные в целом согласуются с ранними исследованиями Т.А. Кремлевой [8], за исключением общей серы, содержание которой в исследованных нами донных отложениях в разы превышает данные предыдущих исследований (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Содержание породообразующих элементов в донных отложениях и почвообразующих породах термокарстовых озер Пур-Тазовского междуречья

(числитель – среднее, знаменатель – min-max), мг/кг, n – число озер/пород

The content of major elements in bottom sediments and soil-forming rocks of thermokarst lakes of the Pur-Taz interfluvium (numerator – the average, denominator – min-max), mg/kg; n – number of lakes/rocks

Элемент	Донные отложения (наши данные), n=6	Почвообразующие породы (наши данные), n=5	Донные отложения озер тундры [31], медиана, n=8	Кларк земной коры по Rudnick, Gao (2003) [18]
Al	<u>41 576,7</u> 26 371,3-47 187,4	<u>54 981,4</u> 51 097,0-60 270,0	<u>47 858,8</u> 21 917,6-64 588,2	81 500
Fe	<u>16 495,6</u> 13 195,7-19 894,0	<u>24 432,8</u> 21 687,2-27 093,5	<u>14 420,0</u> 9 100,0-27 790,0	39 180
K	<u>11 141,6</u> 5 255,1-15 091,8	<u>14 620,9</u> 14 406,1-15 052,4	<u>16 927,7</u> 11 119,1-17 757,4	23 240
Na	<u>8 245,4</u> 4 226,6-10 778,8	<u>12 224,8</u> 11 840,2-12 552,9	<u>10 016,1</u> 5 193,5-13 503,2	24 260
Ca	<u>7 182,3</u> 5 898,5-9 458,3	<u>8 782,5</u> 7 881,7-9 552,4	<u>7 857,1</u> 4 500,0-9 571,4	25 660
Mg	<u>3 674,2</u> 2 633,3-4 652,7	<u>5 850,1</u> 5 163,8-6 581,4	<u>4 380,0</u> 1 920,0-7 440,0	14 950
Ti	<u>3 594,7</u> 1 901,0-5 648,2	<u>4 659,7</u> 4 462,1-4 859,4	<u>3 600,0</u> 2 640,0-7 620,0	3 840
S _{общ}	<u>1 088,7</u> 124,6-2 371,1	<u>77,9</u> 65,3-91,9	<u>250,0</u> 100,0-940,0	621

Средние содержания исследованных элементов в донных отложениях изучаемых озер и почвообразующих породах их водосборов образуют следующую последовательность:

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

Донные отложения

>1000 мг/кг	Al > Fe > K > Na > Ca > Mg > Ti > S
10–1000	P > Ba > Mn > Sr > Редкоземельные элементы > Zr > V > Cr > Rb > Zn > Ni > Cu > Li > Pb
0,1–10	Nb > Ga > Co > Th > U > As > Hf > Cs > Be > Sn > W > Sb > Ta > Mo > Tl > Cd > Bi
<0,1	Ag > Hg

Почвообразующие породы

>1000 мг/кг	Al > Fe > K > Na > Ca > Mg > Ti
10–1000	Mn > Ba > P > Sr > Редкоземельные элементы > Zr > V > S > Rb > Cr > Zn > Ni > Li > Cu > Pb > Co > Ga > Nb
0,1–10	Th > As > Hf > Cs > U > Be > W > Sn > Ta > Sb > Mo > Tl > Bi
<0,1	Ag > Cd > Hg

Элементы с концентрацией выше 1000 мг/кг составляют более 98 % от общего содержания всех рассмотренных элементов и формируют в донных отложениях и почвообразующих породах идентичную последовательность. Исключение составляет $S_{\text{общ}}$, содержание которой в среднем значительно выше в донных отложениях по сравнению с почвообразующими породами водосборов ($p < 0,05$). Обычно в осадках встречаются такие восстановленные виды серы, как пирит, H_2S и элементарная сера, а их сумма определяется как общая неорганическая сера [45]. Накопление $S_{\text{общ}}$ в донных отложениях может быть результатом восстановления сульфатов в детрите [28], что подтверждается нашими данными корреляции сильной степени $S_{\text{общ}}$ с содержанием органического углерода ($r_s=0,86$, $p < 0,01$). Косвенным подтверждением значительного содержания серы в донных отложениях являются процессы гниения серосодержащих белков органического вещества с образованием сероводорода (что отмечалось нами органолептически при извлечении седиментов из пробоотборника). В подледный период при дефиците кислорода активизируется процесс бактериального восстановления сульфатов до сероводорода [13]. Наличие серы на уровне породообразующих элементов в донных отложениях термокарстовых озер говорит о значительной роли биологических процессов в биогеохимических циклах озер Арктики. Значительные количества серы в исследованных нами озерах не уникальный случай. Так, преобладание сульфатов в анионном составе вод «круглых» озер в Надымском районе объясняется как наличием морских эвапоритовых отложений, так и участием цианобактерий в круговороте серы озерных экосистем [19].

Сопоставление концентраций элементов в донных осадках и почвообразующих породах с составом верхней континентальной коры (рис. 4) показало накопление в процессе современного осадкообразования Cd, $S_{\text{общ}}$, U в донных отложениях ($KK=1,39–2,47$), Ti в почвообразующих породах ($KK=1,21$), а также Sb и Ag как в донных отложениях, так и в почвообразующих породах ($KK=1,36–1,43$). Высокие концентрации Cd и Sb в донных отложениях озер ранее отмечались в пределах территории Пур-Тазовского междуречья [20]. Факторы обогащения (EF), рассчитанные относительно средних содержаний в континентальной коре, показали умеренное обогащение донных отложений Cd и $S_{\text{общ}}$ ($EF=4,8$ и $3,4$ соответственно). Нами не обнаружено обогащение никакими из исследованных элементов почвообразующих пород относительно содержаний в земной коре. Обеднение в донных отложениях озер более чем в 3 раза относительно верхней континентальной коры характерно для Mn, Tl, Ca, Mg ($KP=3,20–4,07$). Обеднение $S_{\text{общ}}$ обнаружено в почвообразующих породах ($KP=7,97$).

Средние значения кларков рассеяния всех изученных элементов в донных осадках и почвообразующих породах составляют 1,93 и 1,85 соответственно, что подтверждает высказанное ранее суждение о том, что междуречье Пура и Таза является областью рассеяния химических элементов [17].

Особенности накопления химических элементов в донных отложениях термокарстовых озер

Иерархический кластерный анализ, выполненный по данным элементного состава донных отложений исследованных озер и почвообразующих пород, разделил объекты на две группы кластеров, что говорит о закономерной трансформации изначальной структуры почвообразующих пород в процессе осадконакопления (рис. 3). Трансформация исходного субстрата происходит под влиянием совокупности разнообразных факторов – климатических, гидрологических, механических, физических, химических, биологических и других процессов [3].

Объединение различных озер в рамках одного кластера на основании данных элементного состава (ИСП-МС) может обуславливаться схожестью обстановок осадконакопления. Выделение озера 5 в отдельный кластер может объясняться как особенностями седиментогенеза, так и его расположением в пределах четвертой морской террасы на аллювиально-морских отложениях, в отличие от остальных исследованных озер, приуроченных к озерно-аллювиальным отложениям третьей надпойменной террасы.

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

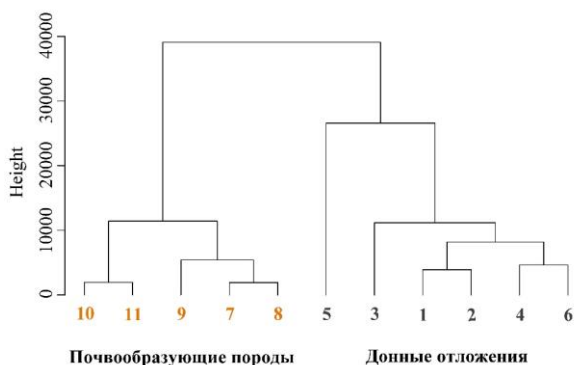


Рис. 3. Классификация донных отложений исследованных озер и почвообразующих пород водосборов по элементному составу (Метод Варда, евклидово расстояние)

Fig. 3. Classification of bottom sediments of the studied lakes and soil-forming rocks of catchments according to the elemental composition (Ward's method, Euclidean distance)

Согласно расчету критерия Манна – Уитни, концентрации большинства элементов в донных отложениях исследованных озер схожи с таковыми в почвообразующих породах ($p > 0,05$, рис. 4). Влияние почвообразующих пород на состав донных отложений также отражается в высоких коэффициентах корреляции Спирмена ($r_s = 0,98 - 0,99$, $p < 0,01$). Тем самым подтверждается наше предположение о том, что элементный состав донных отложений термокарстовых озер во многом наследуется от почвообразующих пород и формируется в тесной связи с ними. Наши данные согласуются с предыдущими исследованиями генетической связи донных отложений малых континентальных озер с почвами и породами их водосборных площадей [14, 20].

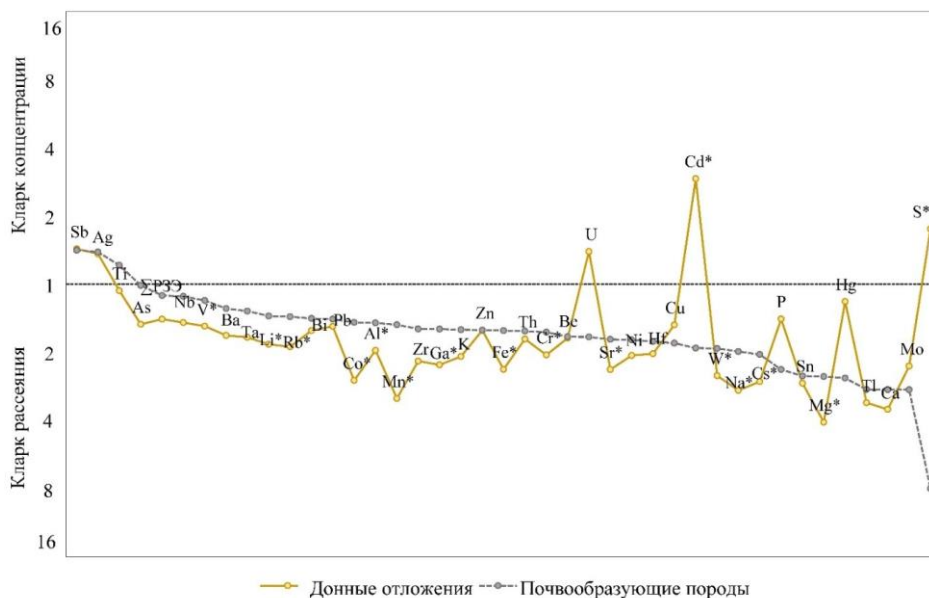


Рис. 4. Ранжированные по почвообразующим породам водосборных площадей спектры элементов в донных отложениях (кларки концентрации и рассеяния рассчитывались по отношению к кларку верхней континентальной коры [18]). Звездочкой (*) отмечены элементы, по которым выявлены достоверные различия между донными отложениями и почвообразующими породами при $p < 0,05$.

$\Sigma P3Э$ – суммарная концентрация редкоземельных элементов

Fig. 4. Spectra of elements in bottom sediments ranked by the soil-forming rocks of the catchment areas (clarkes of concentration were calculated as ratio to the clarkes of the upper continental crust [18]). Asterisk (*) indicates elements for which reliable differences between bottom sediments and soil-forming rocks were found at $p < 0,05$.

$\Sigma P3Э$ – total concentration of rare earth elements

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

Концентрации ряда элементов ($S_{\text{общ}}$, Cd, U, Hg, P, Mo, Cu, рис. 4), большинство из которых относится к халькофильным, чьи особенности накопления связаны с поступлением в составе детрита и биогеохимическими процессами в водоеме [16], в донных отложениях выше относительно почвообразующих пород.

Более низкое содержание ряда элементов (Mn, Co, Mg, Na, Fe, Ga, Sr, Rb, Li, Al, Cs, W, V, Cr, $p < 0,05$, рис. 4) в донных отложениях относительно почвообразующих пород может быть обусловлено различными факторами, препятствующими их накоплению, в частности гранулометрическим составом. Более крупный средний размер частиц донных отложений прибрежной части озер, представляющей собой зону транспорта твердых частиц в наиболее глубокие части озер, обуславливает их низкую сорбционную способность [3]. Распределение Mn, Co, Mg, Na, Fe, Ga, Sr, Rb, Li, Al, W, V хорошо отрицательно коррелирует с долей песчаной фракции (коэффициент корреляции Спирмена r_s варьирует от $-0,66$ до $-0,82$, $p < 0,05$). Ранее отмечалось, что содержание тяжелых металлов в донных осадках водных объектов севера Западной Сибири в первую очередь определяется гранулометрическим составом отложений [17].

Заключение

Анализ гранулометрического состава показал, что условия в прибрежных частях водоемов, формирующиеся под действием криогенных процессов, приводят к изменению соотношения размерных фракций в сторону накопления более крупных зерен, тем самым представляя собой зону эрозии и транспорта твердых частиц в наиболее глубокие части, где происходит их захоронение.

Анализ элементного состава показал, что состав донных отложений исследованных озер в целом наследует состав пород их водосборных площадей и формируется в тесной связи с ними, отражая преимущественное влияние породного и литогенного факторов. Содержание Cd, $S_{\text{общ}}$, U выше кларка в донных отложениях, Ti – в почвообразующих породах, Sb и Ag – как в донных отложениях, так и в почвообразующих породах.

Анализ перераспределения элементов между донными отложениями и почвообразующими породами водосборов показал, что в донных осадках термокарстовых озер может происходить накопление $S_{\text{общ}}$, Cd, U, Hg, P, Mo, Cu, отражая влияние фациального фактора, связанного с аккумуляцией органического вещества. Полученные данные по значительному накоплению $S_{\text{общ}}$ в донных отложениях термокарстовых озер требуют изучения особенностей биогеохимических процессов цикла серы. Наоборот, сложившиеся условия в водоемах и на их водосборах, в частности гранулометрический состав осадков, а также формы нахождения и индивидуальные химические свойства ряда других элементов (Mn, Co, Mg, Na, Fe, Ga, Sr, Rb, Li, Al, Cs, W, V, Cr), препятствуют их накоплению в донных отложениях термокарстовых озер.

Таким образом, наша гипотеза о накоплении химических элементов в донных отложениях под действием термокарстовых процессов подтверждается в отношении преимущественно $S_{\text{общ}}$ и халькофильных элементов. Можно предположить, что по мере развития термокарстовых процессов в субарктике с образованием новых озер будет происходить перераспределение $S_{\text{общ}}$ и халькофильных элементов с накоплением их в донных отложениях термокарстовых озер.

Библиографический список

1. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 303 с.
2. Данько М.М., Хомутов А.В. Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2025. Т. 30, № 1. С. 49–60. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-49-60 EDN: TTYLFO
3. Дауэальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с. ISBN: 978-5-86185-655-3 EDN: QKLCNR
4. Дауэальтер В.А., Хлопцева Е.В. Гидрологические и гидрохимические особенности озер Большеземельской тундры // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2008. Т. 11, № 3. С. 407–414. EDN: JRGMGJ
5. Земцов А.А. Озера севера Западной Сибири и генезис их котловин // Вопросы географии Сибири. 1974. С. 87–105. EDN: WVMMHF
6. Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюллетень ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.
7. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17. EDN: UCGNHL
8. Кремлева Т.А. Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: дис. ... д-ра хим. наук: 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых. М., 2015. 260 с. EDN: VHQMXP
9. Кремлева Т.А., Хорошавин В.Ю. Особенности ионного состава природных вод малых озер Западной Сибири и их классификация по кислотности и содержанию органического вещества // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. 2016. С. 153–164. EDN: YMZXOS
10. Кремлева Т.А., Шавнин А.А., Паничев С.А. Характер распределения микроэлементов в донных отложениях с низким содержанием органического вещества в озерах Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2014. № 5. С. 26–35. EDN: SIYJTV
11. Кукушкин С.Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы при освоении нефтегазоконденсатных месторождений Северо-Западной Сибири: автореф. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 – геоэкология. СПб, 2017. 25 с. EDN: ZCZZVL
12. Левочкина О.В., Лейбман М.О., Тарасевич И.И., Факашук Н.Ю., Гинзбург А.П., Данько М.М., Мареев В.А., Бурдак Д.В., Ваништейн Б.Г., Киль А.О., Семенов П.Б., Хомутов А.В. Состав отложений склонов, подверженных термоденудации, и его влияние на водные экосистемы Центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. № 11. С. 546–551. DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-546-551 EDN: COZDIT
13. Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61, № 3. С. 401–412. DOI: 10.31857/s003015742102012x EDN: AEKBFE

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

14. Манасыпов Р.М., Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н., Зиннер Н.С. Элементный состав макрофитов термокарстовых озер Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 8. С. 50–65. EDN: XWCJPF
15. Моисеенко Т.И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 261 с. EDN: TZUJIX
16. Московченко Д.В., Романенко Е.А. Особенности элементного состава почв Пур-Тазовского междуречья // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. № 103. С. 51–84. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-51-84 EDN: UXRRZO
17. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фооновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. DOI: 10.1134/s0032180x19020114 EDN: ZADGVN
18. Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р. Геоэкологическая оценка состояния термокарстовых озер Западной Сибири в зоне влияния арктического города (на примере Надыма) // Географический вестник. 2022. № 2 (61). С. 90–108. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108 EDN: PMGCYQ
19. Соромотин А.В., Алешина О.А., Шумилов М.А., Приходько Н.В., Николаенко С.А., Куликова М.А. Среда обитания и особенности развития планктонных сообществ уникальных «круглых» озер бассейна р. Надым (Западная Сибирь) // Биология внутренних вод. 2024. Т. 17, № 6. С. 930–944. DOI: 10.31857/S0320965224060078 EDN: WYFYTL
20. Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: дис. ... д-ра геол.-минер. наук: 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых. Новосибирск, 2011. 307 с. EDN: QFLSTP
21. Тацкий Ю.Г., Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В., Борисов А.П., Хорошавин В.Ю., Баранов Д.Ю. Донные отложения арктических озер Западной Сибири как индикаторы изменений окружающей среды // Геохимия. 2020. Т. 65, № 4. С. 362–378. DOI: 10.31857/S0016752520040111 EDN: XFFAFG
22. Хотьяновская Ю.В., Бузмаков С.А., Кучин Л.С. Геоэкологические закономерности трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения в карстовом районе // Географический вестник. 2023. № 1 (64). С. 127–138. DOI: 10.17072/2079-7877-2023-1-127-138 EDN: AYQMSG
23. Acevedo-Figueroa D., Jiménez B.D., Rodríguez-Sierra C.J. Trace metals in sediments of two estuarine lagoons from Puerto Rico // Environmental pollution. 2006. Vol. 141, No. 2. P. 336–342. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.08.037
24. Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Dupré B. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments // Biogeosciences. 2011. Vol. 8, No. 11. P. 3341–3358. DOI: 10.5194/bg-8-3341-2011 EDN: PEFJZL
25. Bogdanova E., Lobanov A., Andronov S.V., Soromotin A.V., Popov A., Skalny A.V., Shaduyko O., Callaghan T.V. Challenges of changing water sources for human wellbeing in the Arctic zone of Western Siberia // Water. 2023. Vol. 15, No. 8. P. 1577. DOI: 10.3390/w15081577 EDN: TKGULX
26. Bouchard F., MacDonald L.A., Turner K.W., Thienpont J.R., Medeiros A.S., Biskaborn B.K., Korosi J., Hall R.I., Pienitz R., Wolfe B.B. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution // Arctic Science. 2016. Vol. 3, No. 2. P. 91–117. DOI: 10.1139/as-2016-0022
27. Chételat J., Amyot M., Arp P., Blais J.M., Depew D., Emmerton C.A., ... & van der Velden S. Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: recent advances on its cycling and fate // Science of the total environment. 2015. Vol. 509. P. 41–66. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.151 EDN: URVARJ
28. Drevnick P.E., Muir D.C., Lamborg C.H., Horgan M.J., Canfield D.E., Boyle J.F., Rose N.L. Increased accumulation of sulfur in lake sediments of the High Arctic // Environmental science & technology. 2010. Vol. 44, No. 22. P. 8415–8421. DOI: 10.1021/es101991p EDN: OBTSNJ
29. Edwards M., Walter K., Grosse G., Plug L., Slater L., Valdes P. Arctic thermokarst lakes and the carbon cycle // Science. 2009. Vol. 17. P. 16–18. DOI: 10.22498/pages.17.1.16
30. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters // Journal of sedimentary research. 1957. Vol. 27, No. 1. P. 3–26. DOI: 10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d
31. Grosse G., Goetz S., McGuire A.D., Romanovsky V.E., Schuur E.A. Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, No. 4. P. 040201. DOI: 10.1088/1748-9326/11/4/040201 EDN: WTYGFN
32. Istomin K.V., Habeck J.O. Permafrost and indigenous land use in the northern Urals: Komi and Nenets reindeer husbandry // Polar Science. 2016. Vol. 10, No. 3. P. 278–287. DOI: 10.1016/j.polar.2016.07.002 EDN: XFOQCT
33. Kokelj S.V., Jenkins R.E., Milburn D., Burn C.R., Snow N. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // Permafrost and Periglacial Processes. 2005. Vol. 16, No. 4. P. 343–353. DOI: 10.1002/ppp.536
34. Kornienko S.G. Studying the dynamics of thermokarst lakes in the area of the Yamburg gas field using Landsat satellite data // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2023. Vol. 20, No. 5. P. 246. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260 EDN: XRQBXG
35. Kunin S., Semenova O., Callaghan T.V., Shaduyko O., Bodur V. Recording Permafrost Thaw and Thaw Lake Degradation in Northern Siberia: School Science in Action // Water. 2023. Vol. 15, No. 4. P. 818. DOI: 10.3390/w15040818 EDN: OFHACR
36. Manasypov R.M., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Auda Y., Zinner N.S., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. Biogeochemistry of macrophytes, sediments and porewaters in thermokarst lakes of permafrost peatlands, western Siberia // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 763. P. 144201. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144201 EDN: VXCHSU
37. Marsh P., Russell M., Pohl S., Haywood H., Onclin C. Changes in thaw lake drainage in the Western Canadian Arctic from 1950 to 2000 // Hydrological Processes: An International Journal. 2009. Vol. 23, No. 1. P. 145–158. DOI: 10.1002/hyp.7179 EDN: MLZBPZ
38. Moskovchenko D., Soromotin A., Khoroshavin V., Prihodko N., Kirillov V., Koveshnikov M., Pechkin A. Climate change and the Ob River: A reassessment of major and trace element fluxes to the Arctic Ocean // Water. 2024. Vol. 16, No. 15. P. 2112. DOI: 10.3390/w16152112 EDN: XYLHFP
39. Romanovskii N.N., Hubberten H.W., Gavrillov A.V., Tumskoy V.E., Tipenko G.S., Grigoriev M.N., Siegert C. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea region, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2000. Vol. 11, No. 2. P. 137–152. DOI: 10.1002/1099-1530(200004/06)11 EDN: KCZEUM
40. Rudnick R.L., Gao S. The Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. Vol. 3. P. 1–64. DOI: 10.1016/b0-08-043751-6/03016-4 EDN: VGJLOX

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

41. Szumińska D., Koziol K., Chalov S.R., Efimov V.A., Frankowski M., Lehmann-Konera S., Polkowska Ż. Reemission of inorganic pollution from permafrost? A freshwater hydrochemistry study in the lower Kolyma basin (North-East Siberia) // *Land Degradation & Development*. 2023. Vol. 34, No. 17. P. 5591–5605. DOI: 10.22541/au.167155205.57797751/v1 EDN: QCBFRK
42. Vonk J.E., Tank S.E., Bowden W.B., Laurion I., Vincent W.F., Alekseychik P., ... Wickland K.P. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12, No. 23. P. 7129–7167. DOI: 10.5194/bg-12-7129-2015 EDN: WRQFLX
43. Walter K.M., Edwards M.E., Grosse G., Zimov S.A., Chapin F.S. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation // *Science*. 2007. Vol. 318, No. 5850. P. 633–636. DOI: 10.1126/science.1142924 EDN: LKTRST
44. Zoller W.H., Gladney E.S., Duce R.A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole // *Science*. 1974. Vol. 183, No. 4121. P. 198–200. DOI: 10.1126/science.183.4121.198
45. Zopfi J., Böttcher M.E., Jørgensen B.B. Biogeochemistry of sulfur and iron in Thioploca-colonized surface sediments in the upwelling area off central Chile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Vol. 72, No. 3. P. 827–843. DOI: 10.1016/j.gca.2007.11.031 EDN: KEPIGL

References

1. *Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous District* (2004). Omsk: Omsk Cartographic Factory (in Russian)
2. Danko, M.M., Khomutov, A.V. (2025). Pervy'e rezultaty` monitoringa razvitiya poligonal'nogo rel'efa v zone vzaimodeystviya torfyanik–ozero na severe Pur-Tazovskogo mezhdurech'ya v 2021–2023 gg (First results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the north of the Pur-Taz interfluvium in 2021–2023). *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*, 30(1), Pp. 49–60. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-49-60 (in Russian)
3. Dauwalter, V.A. (2012) *Geocology of lake bottom sediments*. Murmansk: Izd-vo MSTU (in Russian)
4. Dauwalter, V.A., Khloptseva, E.V. (2008). Gidrologicheskie i gidroximicheskie osobennosti ozer Bol'shezemel'skoj tundry` (Hydrological and hydrochemical features of lakes in Bolshezemel'skaya tundra). *Bulletin of Murmansk State Technical University*, 11(3), Pp. 407–414. (in Russian)
5. Zemtsov, A.A. (1974). Oзера severa Zapadnoj Sibiri i genezis ix kotlov (Lakes in the north of Western Siberia and the genesis of their basins), *Voprosy geografii Sibiri*, Pp. 87–105 (in Russian)
6. Ivanov, P.V. (1948). Klassifikaciya ozer po velichine i po ix srednej glubine (Classification of lakes by size and by their average depth). *Bulletin of LSU*, No.21, Pp. 29–36 (in Russian)
7. Kasimov, N. S., Vlasov, D. V. (2015). Klarki ximicheskix e`lementov kak e`talony` sravneniya v e`kogeoximii (Clarks of chemical elements as standards of comparison in ecogeochemistry). *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, No.2, Pp. 7–17. (in Russian)
8. Kremleva, T.A. (2015) *Geochemical factors of stability of water systems to anthropogenic loads*. Moscow. (In Russian)
9. Kremleva, T.A., Khoroshavin, V.Y. (2016). Osobennosti ionnogo sostava prirodny`x vod maly`x ozer Zapadnoj Sibiri i ix klassifikaciya po kislotnosti i soderzhaniyu organicheskogo veshhestva (Features of ionic composition of natural waters of small lakes in Western Siberia and their classification by acidity and organic matter content). *Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments*, Pp. 153–164. (in Russian)
10. Kremleva, T.A., Shavnin, A.A., Panichev, S.A. (2014). Harakter raspredeleniya mikroelementov v donny`x otlozheniyax s nizkim soderzhanie organicheskogo veshhestva v ozerax Zapadnoj Sibiri (Character of trace elements distribution in bottom sediments with low organic matter content in lakes of Western Siberia). *Bulletin of Tyumen State University, Ecology and Nature Management*, No.5. Pp. 26–35. (in Russian)
11. Kukushkin, S.Y. (2017) *Indicators of anthropogenic load on natural-territorial complexes in the development of oil and gas condensate fields in North-West Siberia*. St. Petersburg. (in Russian)
12. Levochkina, O.V., Leibman, M.O., Tarasevich, I.I., Fakashchuk, N.Yu., Ginzburg, A.P., Danko, M.M., Mareev, V.A., Burdak, D.V., Vanshtein, B.G., Kil, A.O., Semenov, P.B., Khomutov, A.V. (2024). Sostav otlozhenij sklonov, podverzhennykh termodenudacii, i ego vliyaniye na vodnye ehkositemy Central'nogo Yamala (Composition of sediments of slopes subjected to thermodenudation and its influence on aquatic ecosystems of the Central Yamal). *Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and Northwest Russia*, No.11, Pp. 546–551 DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-546-551. (in Russian)
13. Losyuk, G.N., Kokryatskaya, N.M., Krasnova, E.D. (2021). Serovodorodnoye zarazhenie pribrezhnykh ozer na raznykh stadiyakh izolyacii ot Belogo morya (Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White Sea). *Oceanology*. No.61(3), pp. 401–412. DOI: 10.31857/s003015742102012x (in Russian)
14. Manasypov R. M., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Zinner N. S. (2018). Ehlementnyj sostav makrofitov termokarstovykh ozer Zapadnoj Sibiri (Elemental composition of macrophytes of thermokarst lakes of Western Siberia). *Izvestia Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*, No.329(8), Pp. 50–65 (in Russian)
15. Moiseenko, T.I. (1997) *Theoretical bases of rationing of anthropogenic loads on Subarctic water bodies*, Apatity: Publishing house of KSC RAS (In Russian)
16. Moskovchenko, D.V., Romanenko, E.A. (2020). Osobennosti ehlementnogo sostava pochv Pur-Tazovskogo mezhdurech'ya (Features of elemental composition of soils of the Pur-Taz interfluvium). *Bulletin of the VV Dokuchaev Soil Institute*, No.103, Pp. 51–84 (in Russian)
17. Opekunova M. G., Opekunov A. Yu., Kukushkin S. Yu., Ganul A. G. (2019). Fonovoe soderzhanie khimicheskikh ehlementov v pochvakh i donnykh osadkakh severa Zapadnoj Sibiri (Background content of chemical elements in soils and bottom sediments of the north of Western Siberia). *Soil Science*, No.4. Pp. 422–439. DOI: 10.1134/s0032180x19020114 (in Russian)
18. Soromotin, A.V., Prikhodko, N.V., Sizov, O.S., Daizel, A.V., Kudryavtsev, A.A., Zakirova, M.R. (2022). Geoehologicheskaya ocenka sostoyaniya termokarstovykh ozyor Zapadnoj Sibiri v zone vliyaniya arkticheskogo goroda (na primere Nadyma) (Geoeological assessment of thermokarst lakes in Western Siberia in the zone of influence of an Arctic city (on the example of Nadym)). *Geographical Bulletin*. 2 (61), pp. 90–108. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108 (in Russian)
19. Soromotin, A.V., Alyoshina, O.A., Shumilov, M.A., Prikhodko, N.V., Nikolaenko, S.A., Kulikova, M.A. (2024). Sreda obitaniya i osobennosti razvitiya planktonnykh soobshchestv unikalnykh "kruglykh" ozer bassejna R. Nadym (Zapadnaya Sibir) (Habitat and peculiarities of development of planktonic communities of unique "round" lakes of the Nadym River basin (Western Siberia)). *Inland Water Biology*, No.17(6), pp. 930–944. DOI: 10.31857/S0320965224060078 (in Russian)
20. Strakhovenko, V.D. (2011) *Geochemistry of bottom sediments of small continental lakes of Siberia*. Novosibirsk (in Russian)
21. Tsiy, Y.G., Moiseenko, T.I., Razumovsky, L.V., Borisov, A.P., Khoroshavin, V.Y., Baranov, D.Y. (2020). Donnye otlozheniya arkticheskikh ozer Zapadnoj Sibiri kak indikatory izmeneniy okruzhayushchej sredy (Bottom sediments of Arctic lakes of Western Siberia as indicators of environmental changes). *Geochemistry*, No.65(4), Pp. 362–378. DOI: 10.31857/S0016752520040111 (in Russian)

Экология и природопользование

Куликова М.А., Соромотин А.В.

22. Khotyanovskaya, Y.V., Buzmakov, S.A., Kuchin, L.S. (2023). Geoekologicheskie zakonomernosti transformacii prirodnoj sredy pri ehkspluatatsii nefryanogo mestorozhdeniya v karstovom rajone (Geoeological regularities of natural environment transformation during oil field exploitation in a karst area). *Geographical Bulletin*, 1(64). Pp. 127–138 DOI: 10.17072/2079-7877-2023-1-127-138. (in Russian)
23. Acevedo-Figueroa D., Jiménez B.D., Rodríguez-Sierra C.J. Trace metals in sediments of two estuarine lagoons from Puerto Rico // *Environmental pollution*. 2006. T. 141. № 2. – C. 336-342. doi: 10.1016/j.envpol.2005.08.037.
24. Audry S., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Kirpotin S. N., Dupré B. Organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lake sediments // *Biogeosciences*. 2011. T. 8. № 11. C. 3341-3358. doi: 10.5194/bg-8-3341-2011.
25. Bogdanova E., Lobanov A., Andronov S. V., Soromotin A.V., Popov A., Skalny A. V., Shadyko O., Callaghan T. V. Challenges of changing water sources for human wellbeing in the Arctic zone of Western Siberia // *Water*. 2023. T. 15. № 8. C. 1577. doi: 10.3390/w15081577.
26. Bouchard F., MacDonald L. A., Turner K. W., Thienpont J. R., Medeiros A. S., Biskaborn B. K., Korosi J., Hall R.I., Pienitz R., Wolfe B. B. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution // *Arctic Science*. 2016. T. 3. № 2. C. 91-117. doi: 10.1139/as-2016-0022.
27. Chételat J., Amyot M., Arp P., Blais J. M., Depew D., Emmerton C. A., ... & van der Velden S. Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: recent advances on its cycling and fate // *Science of the total environment*. 2015. T. 509. C. 41-66. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.151.
28. Drevnick P. E., Muir D. C., Lamborg C. H., Horgan M. J., Canfield D. E., Boyle J. F., Rose, N. L. Increased accumulation of sulfur in lake sediments of the High Arctic // *Environmental science & technology*. 2010. T. 44. № 22. C. 8415-8421. doi: 10.1021/es101991p.
29. Edwards M., Walter K., Grosse G., Plug L., Slater L., Valdes P. Arctic thermokarst lakes and the carbon cycle // *Science*. 2009. T. 17. C. 16-18. doi: 10.22498/pages.17.1.16.
30. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters // *Journal of sedimentary research*. 1957. T. 27. № 1. C. 3-26. doi: 10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d.
31. Grosse G., Goetz S., McGuire A. D., Romanovsky V. E., Schuur E. A. Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system // *Environmental Research Letters*. 2016. T. 11. № 4. C. 040201. doi: 10.1088/1748-9326/11/4/040201.
32. Istomin K.V., Habeck J.O. Permafrost and indigenous land use in the northern Urals: Komi and Nenets reindeer husbandry // *Polar Science*. 2016. T. 10. № 3. C. 278-287. doi: 10.1016/j.polar.2016.07.002.
33. Kokelj S. V., Jenkins R. E., Milburn D., Burn C. R., Snow, N. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. T. 16. № 4. C. 343-353. doi: 10.1002/ppp.536.
34. Kornienko S.G. Studying the dynamics of thermokarst lakes in the area of the Yamburg gas field using Landsat satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2023. T. 20. № 5. C. 246. doi: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-246-260.
35. Kunin S., Semenova O., Callaghan T. V., Shadyko O., Bodur V. Recording Permafrost Thaw and Thaw Lake Degradation in Northern Siberia: School Science in Action // *Water*. 2023. T. 15. № 4. C. 818. doi: 10.3390/w15040818.
36. Manasypov R. M., Pokrovsky O. S., Shirokova L. S., Auda Y., Zinner N. S., Vorobyev S. N., & Kirpotin S. N. Biogeochemistry of macrophytes, sediments and porewaters in thermokarst lakes of permafrost peatlands, western Siberia // *Science of the Total Environment*. 2021. T. 763. C. 144201. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144201.
37. Marsh P., Russell M., Pohl S., Haywood H., Onclin C. Changes in thaw lake drainage in the Western Canadian Arctic from 1950 to 2000 // *Hydrological Processes: An International Journal*. 2009. T. 23. № 1. C. 145-158. doi: 10.1002/hyp.7179.
38. Moskovchenko D., Soromotin A., Khoroshavin V., Prikhodko N., Kirillov V., Koveshnikov M., Pechkin A. Climate change and the Ob River: A reassessment of major and trace element fluxes to the Arctic Ocean // *Water*. 2024. T. 16. № 15. C. 2112. doi: 10.3390/w16152112.
39. Romanovskii N. N., Hubberten H. W., Gavrillov A. V., Tumskoy V. E., Tipenko G. S., Grigoriev M. N., & Siegert C. Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea region, Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2000. T. 11. № 2. C. 137-152. doi: 10.1002/1099-1530(200004/06)11:2<137::aid-ppp345>3.3.co;2-c.
40. Rudnick R.L., Gao S. The Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*. 2003. T. 3, C. 1-64. doi: 10.1016/b0-08-043751-6/03016-4.
41. Szumińska D., Kozioł K., Chalov S. R., Efimov V. A., Frankowski M., Lehmann-Konera S., Polkowska Ż. Reemission of inorganic pollution from permafrost? A freshwater hydrochemistry study in the lower Kolyma basin (North-East Siberia) // *Land Degradation & Development*. 2023. T. 34. № 17. C. 5591-5605. doi: 10.22541/au.167155205.57797751/v1.
42. Vonk J. E., Tank S. E., Bowden W. B., Laurion I., Vincent W. F., Alekseychik P., ... Wickland K. P. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems // *Biogeochemistry*. 2015. T. 12. № 23. C. 7129-7167. doi: 10.5194/bg-12-7129-2015.
43. Walter K. M., Edwards M. E., Grosse G., Zimov S. A., Chapin F. S. Thermokarst lakes as a source of atmospheric CH₄ during the last deglaciation // *Science*. 2007. T. 318. № 5850. C. 633-636. doi: 10.1126/science.1142924.
44. Zoller W.H., Gladney E.S., Duce R.A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole // *Science*. 1974. T. 183. № 4121. C. 198-200. doi: 10.1126/science.183.4121.198.
45. Zopf J., Böttcher M.E., Jørgensen B.B. Biogeochemistry of sulfur and iron in Thioploca-colonized surface sediments in the upwelling area off central Chile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. T. 72. № 3. C. 827-843. doi: 10.1016/j.gca.2007.11.031.

Статья поступила в редакцию: 20.05.25, одобрена после рецензирования: 08.07.25, принята к опубликованию: 12.12.25.

The article was submitted: 20 May 2025; approved after review: 8 July 2025; accepted for publication: 12 December 2025.

*Экология и природопользование**Куликова М.А., Соромотин А.В.*

Информация об авторах

Мария Андреевна Куликова

Аспирант, инженер-исследователь, научно-исследовательский институт экологии и рационального использования природных ресурсов, Тюменский государственный университет; 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6

e-mail: m.a.kulikova@utmn.ru

Андрей Владимирович Соромотин

Доктор биологических наук, доцент, директор научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов, Тюменский государственный университет; 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6

e-mail: a.v.soromotin@utmn.ru

Information about the authors

Maria A. Kulikova

Postgraduate Student, Research engineer, Research Institute of Ecology and Rational Use of Natural Resources, University of Tyumen; 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia

Andrey V. Soromotin

Doctor of Biological Sciences, Director of the Research Institute of Ecology and Rational Use of Natural Resources, University of Tyumen; 6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia

Вклад авторов

Куликова М.А. – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, подготовка графических материалов.

Соромотин А.В. – идея, сбор материала, научное редактирование текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Maria A. Kulikova – the idea; material collection and processing; writing of the article; preparation of the graphic materials.

Andrey V. Soromotin – the idea; material collection; scientific editing of the text.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.