

УДК 552.13
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5320
Шифр специальности ВАК: 1.6.4
Научная статья



Минералогия осадков и минералообразующая способность вод озера Красненькое (Северо-Минусинская котловина)

М.О. Хрущева¹✉, Е.М. Дутова^{1,2}, А.Л. Архипов¹,
Г.В. Баталова¹, А.Н. Никитенков², Н.В. Архипова¹

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ masha2904@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Современные условия осадкообразования представляют интерес, так как могут рассматриваться в качестве естественных полигонов, имитирующих фациальные условия седиментогенеза. Минералогия современных озер может применяться для контроля степени испарения и для изучения процессов эволюции рассолов, что позволит решить вопросы палеоклиматических и палеоэкологических реконструкций. Сезонные вариации природной среды отчетливо фиксируются осадками озерных систем, которые можно использовать в качестве индикаторов местного климата. **Цель.** Проведение детальной диагностики минеральных видов осадков озера Красненькое (как аналитическими методами, так и с применением физико-химических расчетов) для понимания генезиса формирующихся осадков, в частности для уточнения их гидрогенной природы. **Объект.** Озеро Красненькое, расположенное на территории Северо-Минусинской котловины, в условиях семиаридного климата. **Методы.** Методами рентгенофазового анализа установлен качественный и количественный минеральный состав осадков озера Красненькое, при этом детально рассмотрены глинистые минералы. Химический состав озерных вод определялся методами титриметрии, ионной хроматографии (макрокомпоненты) и методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (микрокомпоненты). Произведены физико-химические расчеты насыщения вод озера минералами. **Результаты и выводы.** В осадках озера Красненькое установлены минералы групп оксидов (кварц), алюмосиликатов (глинистые минералы, полевые шпаты), сульфидов (пирит), карбонатов (арагонит, кальцит, магнезиальный кальцит, доломит), сульфатов (гипс, тенардит, бёркеит) и галогенидов (галит). При этом значения физико-химических расчетов указывают также на наличие в осадках магнезита, сидерита, стронцианита, барита, ярозита и целестина. Установленные минеральные виды разделены по генетическому принципу на две ассоциации: терригенную и гидрогенную. Следует отметить, что теоретические расчеты минералообразующей способности вод показали отличную сходимость с аналитически установленным минеральным составом осадков.

Ключевые слова: Северо-Минусинская котловина, соленое озеро, рентгенофазовый анализ, минералообразующая способность вод, минеральные ассоциации

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания Министерства Науки и высшего образования РФ (проект FSWM-2025-0015).

Для цитирования: Минералогия осадков и минералообразующая способность вод озера Красненькое (Северо-Минусинская котловина) / М.О. Хрущева, Е.М. Дутова, А.Л. Архипов, Г.В. Баталова, А.Н. Никитенков, Н.В. Архипова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 127–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5320

UDC 552.13
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5320
Scientific paper



Mineralogy of sediments and mineral-forming capacity of the waters of Krasnenkoe lake (North-Minusinsk basin)

M.O. Khrushcheva¹✉, E.M. Dutova^{1,2}, A.L. Arkhipov¹,
G.V. Batalova¹, A.N. Nikitenkov², N.V. Arkhipova¹

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉masha2904@mail.ru

Abstract. Relevance. Modern sedimentation conditions are of interest because they can be considered as natural polygons simulating facies conditions of sedimentogenesis. The mineralogy of modern lakes can be used to control the degree of evaporation and study the processes of brine evolution, which will help solve the problems of paleoclimatic and paleoecological reconstructions. Seasonal variations in the natural environment are clearly recorded by sediments of lake systems, which can be used as indicators of local climate. **Aim.** Conducting a detailed diagnosis of the mineral types of sediments of Krasnenkoe lake (both analytical methods and using physicochemical calculations) to understand the genesis of the sediments formed, in particular to clarify their hydrogenous nature. **Object.** Krasnenkoe lake, located in the territory of the North-Minusinsk basin, in the conditions of a semiarid climate. **Methods.** The qualitative and quantitative mineral composition of the sediments of Krasnenkoe lake was established using X-ray phase analysis methods, with clay minerals being examined in detail. The chemical composition of the lake waters was determined using titrimetry, ion chromatography (macrocomponents) and inductively coupled plasma mass spectrometry (microcomponents). Physicochemical calculations of the saturation of the lake waters to minerals were made. **Results and conclusions.** The sediments of Krasnenkoe lake contain minerals of the oxide (quartz), aluminosilicate (clay minerals, feldspars), sulfides (pyrite), carbonates (aragonite, calcite, magnesian calcite, dolomite), sulfates (gypsum, thenardite, burkeite) and halides (halite) groups. At the same time, the values of physicochemical calculations also indicate the presence of magnesite, siderite, strontianite, barite, jarosite and celestine in the sediments. The established mineral species are divided by the genetic principle into two associations: terrigenous and hydrogenous. It should be noted that theoretical calculations of the mineral-forming capacity of waters showed excellent convergence with the analytically established mineral composition of the sediments.

Keywords: North-Minusinsk basin, salt lake, X-ray phase analysis, mineral-forming capacity of waters, mineral associations

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSWM-2025-0015).

For citation: Khrushcheva M.O., Dutova E.M., Arkhipov A.L., Batalova G.V., Nikitenkov A.N., Arkhipova N.V. Mineralogy of sediments and mineral-forming capacity of the waters of Krasnenkoe lake (North-Minusinsk basin). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 127–140. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5320

Введение

Соленые озера многих стран мира представляют весьма интересный объект для широкого спектра разнообразных научных исследований [1–3]. В России очень внимательно изучаются такие объекты в Астраханской, Волгоградской, Оренбургской, Курской областях, Алтайском крае, Республике Хакасия [4–8]. Спектр исследований весьма разнообразный. Изучается микробиота [7], вещественный состав вод и осадков озер, процессы и роль климатических, гидрологических факторов в особенностях их формирования, использование озер в рекреационных, лечебных целях, оцениваются минеральные ресурсы вод и осадков озер [1–4, 8].

Данная работа является продолжением начатых нами ранее комплексных исследований, посвящен-

ных детальной диагностике минеральных видов осадков соленых озер (озера Талое и Усколь, расположенные в Южно-Минусинской котловине Республики Хакасия), с использованием современных инструментальных методов и физико-химических расчетов минералообразующей способности озерных вод. Цель данной работы расширить исследования и изучить озеро Красненькое, находящееся в Северо-Минусинской котловине, для понимания генезиса формирующихся осадков.

Характеристика района и объекта исследования

Озеро Красненькое принадлежит группе соленых озер Северо-Минусинской котловины (Республика Хакасия), расположенных в пределах Беле-Ширинской бессточной области вблизи поселка

городского типа Ши́ра. Территориально озеро Красненькое расположено в высоких широтах (54 с.ш.), для которых характерны значительные колебания солнечной активности и сезонные вариации температур, что и повлияло на выбор данного озера в качестве объекта исследования (рис. 1). Климат района семиаридный, для него характерно жаркое, засушливое лето и холодная, морозная зима. Стоит отметить, что в степных зонах Республики Хакасия выпадает весьма незначительное количество атмосферных осадков (около 230 мм в год). Также для данного района характерна повышенная ветровая

активность, которая способствует транспортировке обломочного материала в котловину озера.

С точки зрения морфологии озеро Красненькое – это система трех водоемов: Красненькое 1, Красненькое 2 и Красненькое 3. Все три водоема имеют овальные очертания, их размеры 935×485 м, 785×360 м, 965×815 м, соответственно. В рамках данного исследования изучались твердые озерные осадки и вода озера Красненькое 2, далее Красненькое. Осадки водоема представлены современными аллювиально-делювиальными глинами и илами с обломочной составляющей [9].

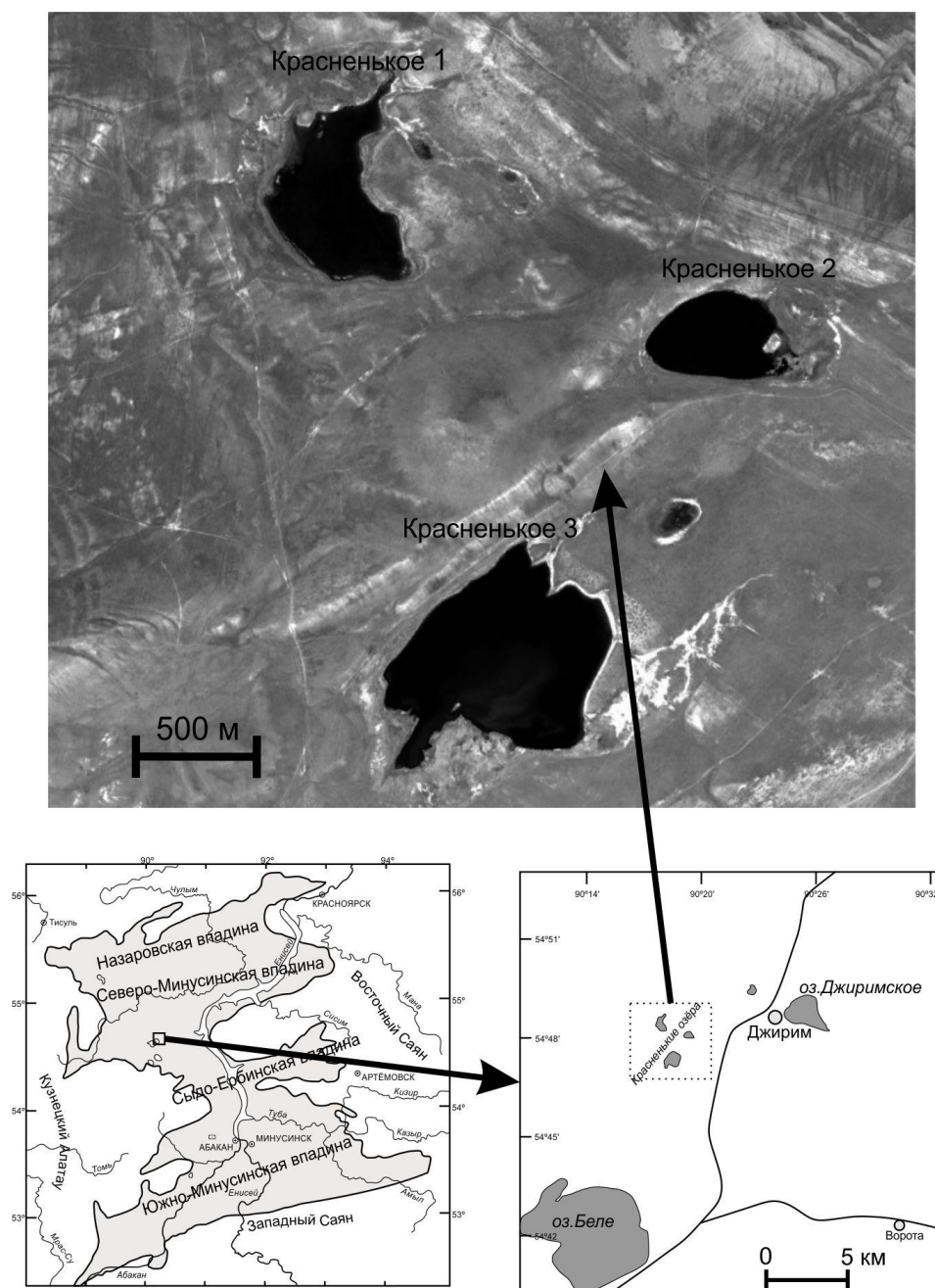


Рис. 1. Схема территориального расположения озера Красненькое
Fig. 1. Scheme of the territorial location of Krasnenskoe lake

По данным [10] средняя скорость осадконакопления в озерах Минусинской котловины 1,8–2,0 мм в год. Источником осадочного материала могут выступать подстилающие и обрамляющие отложения кохайской свиты (верхний девон), которые представлены пестроцветными алевритами, аргиллитами с маломощными прослоями и линзами песчаников, гравелитами, прослоями зеленовато-голубых известняков, мергелей и пропластками гипса [9].

Материалы и методы

Пробоотбор. Отбор проб озерных осадков осуществлялся в засушливый летний период 2024–2025 гг. с использованием пластиковой трубы диаметром 5 см путем ее вдавливания в осадки, на расстоянии около 20 м от береговой линии. В результате была получена колонка озерных отложений, которые представлены переувлажненными хемогенно-терригенными осадками (рис. 2).



Рис. 2. Колонка хемогенно-терригенных осадков озера Красненькое

Fig. 2. Column of chemogenic-terrigenous sediments of Krasnenkoe lake

Для изучения минералообразующей способности и геохимических особенностей водной среды были отобраны пробы озерных вод, а также привлекались материалы ранее проведенных исследо-

ваний подземных вод верхнедевонского водоносного комплекса [11].

Диагностика минерального состава озерных осадков. Общий минеральный состав осадков озера Красненькое определялся методами рентгенофазового анализа на дифрактометре Xpert Pro фирмы Panalytical (Нидерланды). Условия съемки: 40 кВ, 30 мА, Cu-излучение, Ni фильтр, шаг съемки 0,02 с, время в точке 0,4 с, интервал замеров 2–70° 2 θ . Обработку, расшифровку и интерпретацию проводили с использованием программного комплекса HighScore и открытой кристаллографической базы данных COD (Crystallography Open Database) по методике [12].

Диагностика глинистых минералов. Детальное определение глинистых минералов в осадках озера невозможно без дополнительной подготовки материала. Для этого путем осаждения в дистиллированной воде получали фракцию размерностью менее 10 мкм с целью концентрации глинистого компонента. Время осаждения высчитывали по формуле Стокса [13]. Полученную фракцию делили на три образца: первый – исходный, в воздушно-сухом состоянии, второй насыщали парами этиленгликоля в эксикаторе в течение 24 часов, третий образец прокаливали в муфельной печи при температуре 550 °С. Далее на покровных стеклах готовили ориентированные препараты и проводили замеры при параметрах аналогичных съемки образцов общего минерального состава. Принцип диагностики глинистых минералов основан на положении серии (001) базальных рефлексов и сопоставлении указанных выше трех состояниях ориентированных препаратов.

Определение химического состава озерных вод. Определение количественного содержания основных катионов и анионов (макрокомпонентов) озерных вод осуществлялось методами титриметрии (HCO_3^- , CO_3^{2-}) и ионной хроматографии, проводимой на приборе Dionex ICS-6000 EG (США).

Определение микрокомпонентного состава вод выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 7500сх фирмы Agilent Technologies по методике, детально описанной в работе [14]. Качество определений контролировалось стандартом High Purity CRM-TMDW Standard of Drink Water.

Аналитические работы проводились на оборудовании центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета.

Физико-химические расчеты. Для изучения минералообразующей способности водных сред использовался программный комплекс «HydroGeo» [15]. Программный комплекс позволяет моделировать термодинамические процессы растворения и

осаждения, опираясь на базу термодинамических данных, содержащую характеристики свойств обширного набора минералов, водных ионов и комплексных соединений. Программный комплекс активно используется в научных геохимических исследованиях [16–19]. Подобные расчеты применялись нами для оценки минералообразующей способности вод эфемерных озер Южно-Минусинской котловины – Талое и Усколь [20, 21].

Физико-химические расчеты для исследований процессов, происходящих в озере Красненькое, проводились применительно к средним ландшафтно-климатическим условиям района ($T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{общ}}=1\text{ атм}$). Система была охарактеризована матрицей из 20 базовых ионов, 102 компонентов водного раствора и 54 минералов.

Оценка равновесности вод с минералами производилась путем расчетов показателей состояния системы «вода–порода» (индексы насыщения). Полученные положительные значения индексов неравновесности свидетельствуют о способности системы к образованию тех или иных минералов, а отрицательные – о способности системы к их растворению.

Результаты и их обсуждение

Минералогия осадков озера Красненькое

Исходные образцы осадков озера Красненькое представлены переувлажненным хемогенно-терригенным материалом, при высушивании (при температуре $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$) которого произошло образование минералов, находящихся в водах озера в растворенном состоянии. Тем самым мы искус-

ственно завершили процесс минералообразования и получили полный набор минеральных видов, включая те, что находятся в водах в растворенном состоянии (в частности, галит).

Методами рентгенофазового анализа установлено, что осадки озера Красненькое представлены оксидами (кварц), алюмосиликатами (глинистые минералы, полевые шпаты), сульфидами (пирит), карбонатами (арагонит, кальцит, магнезиальный кальцит, доломит), сульфатами (гипс, тенардит, бёркеит) и галогенидами (галит) (табл. 1).

Оксиды и алюмосиликаты. Кварц диагностирован по серии основных пиков $d(hkl)$: $3,34\text{ \AA}$ (011), $4,25\text{ \AA}$ (100), $1,81\text{ \AA}$ (112). Его содержания варьируют от 29 до 56 %, при среднем 43 %. В целом кварц распространен в осадках озера достаточно равномерно, однако наблюдается слабый тренд к уменьшению его содержаний по мере углубления осадков. Кварц рассматривается как главный терригенный минерал осадков озера, но мы также не можем исключить его частично гидрогенное происхождение.

Полевые шпаты представлены альбитом и санидином. Альбит установлен по рефлексам $d(hkl)$ $3,18\text{ \AA}$ (002), $4,03\text{ \AA}$ ($\bar{2}01$), $3,21\text{ \AA}$ ($\bar{2}02$), санидин по серии отражений $d(hkl)$ $3,23\text{ \AA}$ (002), $3,33\text{ \AA}$ (220), $3,75\text{ \AA}$ ($\bar{1}30$). Содержание альбита в осадках достаточно выдержано и составляет от 7 до 24 % при среднем 12 %. Санидин встречается редко и отмечается в единичных пробах на уровне следовых концентраций (менее 1 %).

Таблица 1. Обобщенные данные минерального состава осадков озера Красненькое (по данным рентгенофазового анализа), %

Table 1. Generalized data on the mineral composition of sediments of Krasnenkoe lake (according to X-ray phase analysis), %

Группа/Group	Минеральный вид Mineral type	Химическая формула Chemical formula	Содержание/Content		
			Мин Min	Макс Max	Среднее Average
Оксиды/Oxides	Кварц/Quartz	SiO_2	29	56	43
Алюмосиликаты Aluminosilicates	Альбит/Albite	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	7	24	12
	Санидин/Sanidine	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	н.о	<1	<1
	Иллит/Illite	$\text{K}_{0.65}\text{Al}_2(\text{Al}_{0.65}\text{Si}_{3.35}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	4	11	8
	Хлорит/Chlorite	$(\text{Mg,Fe,Al,Cr,Ni,Mn})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe,Mn})_3(\text{OH})_6$	3	9	6
	Каолинит/Kaolinite	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	<1	3	1
	ССО/MLF	–	<1	4	3
Сульфиды/Sulfides	Пирит/Pyrite	$\text{Fe}(\text{S}_2)$	<1	4	3
Карбонаты Carbonates	Арагонит/Aragonite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	6	9	7
	Кальцит/Calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	5	13	8
	Магнезиальный кальцит Magnesian calcite	$(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)$	2	8	6
	Доломит/Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	<1	7	5
Сульфаты/Sulfates	Гипс/Gypsum	$\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	38	20
	Тенардит/Thenardite	$\text{Na}_2(\text{SO}_4)$	<1	<1	<1
	Бёркеит/Burkeite	$\text{Na}_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)_2$	<1	<1	<1
Галогениды/Halides	Галит/Halite	NaCl	<1	2	1

Примечание: ССО – смешанослойные образования иллит-монтмориллонитового ряда.

Note: MLF – mixed-layer formations of the illite-montmorillonite series.

Полевые шпаты – типичные терригенные минералы, которые привнесены в котловину водоема вследствие разрушения близлежащих коренных пород. Но стоит отметить, что в литературе встречаются данные, что в условиях соленых озерных систем альбит может иметь и гидрогенное происхождение [22, 23].

Особое внимание уделялось характеристике слоистых алюмосиликатов, которые представлены глинистыми минералами (каолинитом, Fe-Mg хлоритом, иллитом и смешанослойными образованиями иллит-монтмориллонитового ряда). Стоит отметить, что глинистые минералы часто используются как индикаторы характера осадконакопления в различных геологических условиях, о чем свидетельствуют научные работы [24, 25].

Рентгенографически каолинит диагностирован по серии рефлексов $d(hkl)$: 7,17 Å (002), 3,57 Å (004) и 2,38 Å (006). После прокаливании образца кристаллическая решетка каолинита разрушается и на дифрактограмме рефлексы каолинита исчезают. Минерал распространен в осадках неравномерно и отмечается в количестве от следовых содержаний до 15 %.

Fe-Mg хлорит установлен по серии отражений $d(hkl)$: 14,08 Å (001), 7,05 Å (002) и 3,53 Å (004). Для Fe-Mg хлоритов характерна высокая интенсивность (003), которая сопоставима с интенсивностями других базальных рефлексов (002) и (004). После прокаливании образца пики хлорита сохраняются, а после насыщения парами этиленгликоля не изменяют своего положения.

Термин «иллит» в данной работе используется согласно рекомендациям Номенклатурного комитета [26]. Диагностика иллита осуществлялась по набору рефлексов $d(hkl)$: 9,99 Å (002), 4,99 Å (004) и 3,35 Å (006). При насыщении образца парами этиленгликоля и при прокаливании рефлексы иллита не меняют своего положения из-за его прочной решетки, которая не способна к межпакетной адсорбции воды [27, 28].

Смешанослойные образования (ССО) иллит-монтмориллонитового ряда установлены по характерному широкому диффузному рефлексу в области углов 2θ 11,04–11,69 Å, а также по смещению пика в малоугловую область до 12,82 Å при насыщении парами этиленгликоля (рис. 3).

В осадках озера Красненькое глинистые минералы составляют значительную долю относительно других минералов, их содержание варьирует от 11 до 23 % при среднем 18 %. Накопление глинистых минералов может происходить на счет разрушения и сноса терригенных осадков в котловину водоема, за счет эпигенетического преобразования полевых шпатов в зоне миграции подземных вод, а также, согласно теории «новообразования», они могут формироваться из

озерных вод, когда под действием озерных вод водоема осуществляется частичное растворение коренных пород, при этом происходит обогащение вод микро- и макрокомпонентами, из которых могут синтезироваться глинистые минералы.

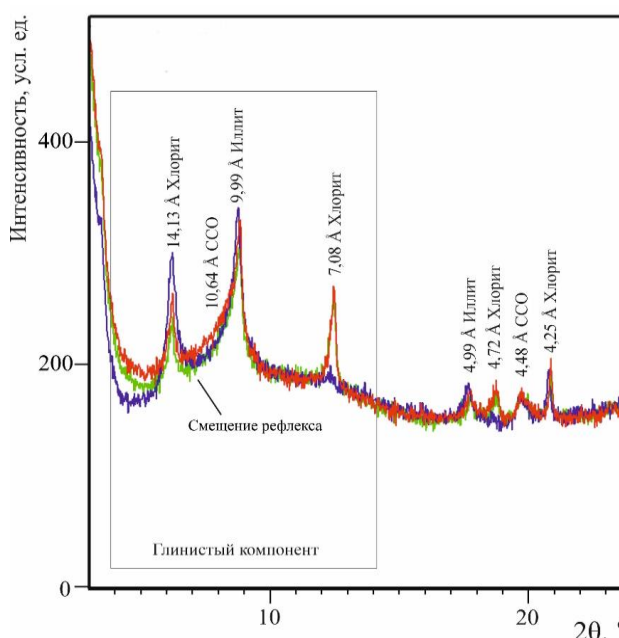


Рис. 3. Дифрактограмма глинистых минералов из осадков озера Красненькое: красным – исходная дифрактограмма, зеленым – после насыщения образца парами этиленгликоля, синим – после прокаливании образца при температуре 550 °C

Fig. 3. Diffractogram of clay minerals from sediments of Krasnenkoe lake: red – initial diffractogram, green – after saturation of the sample with ethylene glycol vapor, blue – after calcination of the sample at 550 °C

Сульфиды. Группа сульфидов представлена одним минералом – пиритом. Он установлен по серии рефлексов $d(hkl)$: 1,63 Å (131), 2,71 Å (200), 2,42 Å (210). Распространен в осадках озера в весьма незначительных концентрациях, которые не превышают 4 %. Стоит отметить, что наличие сероводорода в водоеме создает благоприятную среду для его образования.

Карбонаты. Карбонаты являются чувствительными индикаторами изменения среды минералообразования, так как для них характерен широкий спектр изоморфизма в их кристаллической решетке и существенные вариации степени порядка в структуре [29, 30]. Присутствие тех или иных карбонатных минералов и последовательность их осаднения обусловлены физико-химическими факторами осадконакопления (минерализация, соотношение Ca/Mg, величина pH и т. д.), которые зависят, как правило, от климата и рельефа местности на всем

протяжении существования озера. Минералогия карбонатов рассмотрена по положению на дифрактограммах самого интенсивного рефлекса $hkl=104$ в области углов 2θ 28–32°. Как известно, величина межплоскостного расстояния d (104) выступает мерой степени магнезиальности карбонатов кальцит-доломитового ряда [31], и, таким образом, величина d (104) кальцита составляет 3,03–3,02 Å, магнезиального кальцита 3,01–3,00 Å, а доломита – 2,90–2,89 Å. Также в осадках озера диагностирован арагонит, для него характерны рефлексы d (hkl): 3,40–3,39 Å (111), 3,28 Å (021), 2,70 Å (012).

Арагонит и магнезиальный кальцит установлены только в верхней части осадков (до 4 см от поверхности) в концентрациях, не превышающих 9 %. Кальцит же отмечается по всему разрезу и характеризуется достаточно равномерным накоплением (от 5 до 13 % при среднем 8 %). Доломит распространен неравномерно, и его содержание в осадках не превышает 7 %. Происхождение кальцита в осадках озера Красненькое может быть как терригенным, так и гидрогенным. Это подтверждается химическими особенностями озерных вод и составом пород озерного ложа. Однако арагонит и доломит – это типичные гидрогенные минералы, образовавшиеся в процессе испарительного концентрирования озерных вод.

Сульфаты. В осадках озера диагностированы минералы группы сульфатов: гипс, тенардит и бёркеит. Среди них преобладает гипс, он установлен по серии рефлексов d (hkl): 7,60 Å (020), 4,28 Å ($\bar{1}21$), 3,06 Å ($\bar{1}41$). Гипс отмечается преимущественно в нижней части колонки, его концентрации меняются от 5 до 38 % при среднем значении 20 %. Также на дифрактограммах отмечаются пики тенардита d (hkl): 4,66 Å (111), 3,18 Å (131), 2,79 Å (311) и бёркеита d (hkl): 2,81 Å (022), 2,62 Å (130), 2,58 Å (200). Данные минералы зафиксированы в весьма незначительном количестве (следовые содержания).

Галогениды. Класс галогенидов представлен одним минералом – галитом. Для него характерны отражения d (hkl): 2,81 Å (200), 1,99 Å (220), 1,63 Å (222). Его концентрации весьма незначительны и не превышают 2 %. Стоит отметить, что при данном уровне солености вод озера Красненькое кристаллизации галита не происходит. Однако в лабораторных условиях после сушки увлажненных хемогенно-терригенных пород кристаллизация галита завершилась, и его удалось диагностировать в осадках.

Геохимические особенности и минералообразующая способность озерных и подземных вод

При изучении процессов образования осадков озера важно учитывать гидрогеохимические параметры озерных вод: минерализацию, баланс основ-

ных макро- и микрокомпонентов и значения pH. По соотношениям данных показателей можно установить процессы, в результате которых сформировались осадки, а также оценить минералообразующую способность вод.

Геохимические особенности и минералообразующая способность вод рассмотрена на основе данных химического состава, представленного в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав вод озера Красненькое и подземных вод района, мг/л

Table 2. Chemical composition of the waters of Krasnenskoe lake and groundwater in the region, mg/l

Компонент Component	Тип вод/Type of water	
	Озерные Lake	Подземные воды верхнедевонского комплекса Groundwater of the upper Devonian complex
pH	8,77	8,01
HCO ₃ ⁻	826	378,2
CO ₃ ²⁻	58	12
SO ₄ ²⁻	15820	404,9
Cl ⁻	1260	120,6
Минерализация Mineralization	25540	1283
Ca ²⁺	222	95,2
Mg ²⁺	532	85,1
Na ²⁺	6702	187,0
K ⁺	120	2,0
Формула Formula	SO ₄ 87 Na 83	SO ₄ 46 HCO ₃ 34 Na 41 Mg35

Из табл. 2 видно, что подземные воды, питающие озеро Красненькое, относятся к гидрокарбонатно-сульфатному типу с преобладающим магниевым-натриевым катионным составом, минерализацией 1,28 г/л и щелочным pH.

По химическому составу воды озера относятся к сульфатному типу с преобладающим натриевым катионом. Минерализация озерных вод значительно выше, чем в подземных, и составляет 25,54 г/л. Для вод озера также характерна более щелочная среда (pH=8,77). На долю сульфат иона приходится 87 мг-экв. % (в абсолютных значениях 15820 мг/л), на долю хлорид иона – 9,3 мг-экв. % (в абсолютных значениях 1260 мг/л), на долю гидрокарбонат иона – 3,6 мг-экв. % (в абсолютных значениях 826 мг/л) и на долю карбонат иона – 0,5 мг-экв. % (в абсолютных значениях 58 мг/л). Среди катионов преобладающими являются ионы натрия (83 мг-экв. %) (в абсолютных значениях 6702 мг/л) и магния (13 мг-экв. %) (в абсолютных значениях 532 мг/л), в меньших количествах отмечаются ионы кальция (3 мг-экв. %) (в абсолютных значениях 222 мг/л) и калия (0,88–0,90 мг-экв. %) (в абсолютных значениях 120 мг/л).

Анализ микрокомпонентов выявил в водах озера значительные содержания бора (10,25 мг/л), стронция (9,43 мг/л) и лития (0,45 мг/л).

Стоит отметить, что обогащение вод озера Красненькое макро- и микрокомпонентами происходит в

процессе взаимодействия в системе «вода – озерные осадки» при значительном влиянии процессов испарительного концентрирования, что также подтверждают результаты ранее проведенных исследований по аналогичным объектам [20, 21].

Таблица 3. Степень насыщения вод озера Красненькое минералами (индексы насыщения)

Table 3. Saturation degrees of various types of Krasnenkoe lake waters in relation to minerals (saturation indexes)

Минералы/Minerals	Формула/Formula	Индексы насыщения Saturation indices
Гидрооксиды/Hydroxides		
Гётит/Goethite	FeOOH	17
Лепидокрокит/Lepidocrocite	FeOOH	12
Байерит/Bayerite	Al(OH) ₃	6,8
Гиббсит/Gibbsite	Al(OH) ₃	4,2
Оксиды/Oxides		
Гематит/Hematite	Fe ₂ O ₃	38
Кварц/Quartz	SiO ₂	-0,31
Кристобалит/Cristobalite	SiO ₂	-1,6
Тридимит/Tridimite	SiO ₂	-1,20
Халцедон/Chalcedony	SiO ₂	-0,95
Силикаты и алюмосиликаты/Silicates and aluminosilicates		
Нонтронит/Nontronite	Fe _{1,65} Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	18,00
Fe-Mg монтмориллонит /Fe-Mg montmorillonite	Fe _{0,2924} Mg _{2,9} Al _{1,6984} Si _{3,9350} O ₁₀ (OH) ₂	-7,30
Монтмориллонит/Montmorillonite	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	16,00
Монтмориллонит/Montmorillonite	Ca _{0,187} Na _{0,0205} K _{0,0205} Fe _{0,141} Mg _{0,336} Al _{1,59} Si _{3,93} O ₁₀ (OH) ₂	17,00
К-монтмориллонит/K-montmorillonite	K _{0,3} Al _{1,9} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	11,00
Mg-Fe монтмориллонит/Mg-Fe montmorillonite	Mg _{0,6525} Fe _{0,335} Al _{1,47} Si _{3,82} O ₁₀ (OH) ₂	21,00
Na-Са монтмориллонит/Na-Ca montmorillonite	Na _{0,27} Ca _{0,1} K _{0,02} Fe _{0,19} Mg _{0,22} Al _{1,58} Si _{3,94} O ₁₀ (OH) ₂	18,00
Са-монтмориллонит/Ca-montmorillonite	Ca _{0,15} Al _{1,9} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	18,00
Mg-бейделлит/Mg-beidellite	Mg _{0,165} Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	18,00
Са-бейделлит/Ca-beidellite	Ca _{0,165} Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	18,00
Na-бейделлит/Na-beidellite	Na _{0,33} Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	21,00
Иллит/Illite	K _{0,63} Na _{0,017} Ca _{0,145} Fe _{0,327} Mg _{0,349} Al _{1,9} Si _{3,421} O ₁₀ (OH) ₂	28,00
К-Мг-иллит/K-Mg-illite	K _{0,6} Mg _{0,25} Al _{2,3} Si _{3,5} O ₁₀ (OH) ₂	25,00
Mg-мусковит/Mg-muscovite	KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	13,00
К-иллит/K-illite	K _{0,5} Al _{2,5} Si _{3,5} O ₁₀ (OH) ₂	25,00
Анортит/Anorthitis	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	-0,76
Калиевый полевой шпат/Potassium feldspar	KAlSi ₃ O ₈	11,00
Альбит/Albite	NaAlSi ₃ O ₈	5,10
Карбонаты/Carbonates		
Магнезит/Magnesite	MgCO ₃	2,60
Лансфордит/Lansfordite	MgCO ₃ ×5H ₂ O	-1,20
Витерит/Witherite	BaCO ₃	-7,60
Арагонит/Aragonite	CaCO ₃	3,60
Кальцит/Calcite	CaCO ₃	3,90
Доломит/Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	9,60
Сидерит/Siderite	FeCO ₃	0,65
Родохрозит/Rhodochrosite	MnCO ₃	-0,75
Стронцианит/Strontianite	SrCO ₃	1,60
Сульфаты/Sulfates		
Эпсомит/Epsomite	MgSO ₄ ×7H ₂ O	-5,70
Кизерит/Kieserite	MgSO ₄ ×H ₂ O	-60,00
Тенардит/Thenardite	Na ₂ SO ₄	-50,00
Барит/Barite	BaSO ₄	1,00
Ангидрит/Anhydrite	CaSO ₄	-1,80
Гипс/Gypsum	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0,69
Мелантерит/Melanterite	FeSO ₄ ×7H ₂ O	-15,00
Ярозит/Jarosite	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	6,10
Целестин/Celestine	SrSO ₄	2,20
Галониды/Halides		
Галит/Halite	NaCl	-9,10
Гидрогалит/Hydrohalite	NaCl×2H ₂ O	-9,00
Сильвин/Sylvinit	KCl	-12,00

Для уточнения, а также для возможного расширения минеральных видов, полученных инструментальными методами, были рассчитаны индексы насыщения SI (Saturation Index) озерных вод вторичными минералами. В перечень минералов вошли уже диагностированные минеральные виды, а также наиболее часто встречающиеся во вмещающих породах водосборной территории озера. В табл. 3 приведены индексы насыщения, которые характеризуют возможность разрушения или формирования определенного минерала для каждого типа вод.

Изученные озерные воды недонасыщены относительно алюмосиликатов (анортита, Fe-Mg монтмориллонита), галоидов (галита, гидрогалита, сильвина), сульфатов (эпсомита, кизерита, тенардита, ангидрита, мелантерита), карбонатов (лансфордита, витерита, родохрозита), некоторых оксидов (кварца, кристобалита, тридимита и халцедона).

Положительные индексы насыщения указывают на равновесность озерных вод с гидроксидами (гётитом, лепидокрокитом, байеритом и гиббситом), оксидом (гематитом), алюмосиликатами

(нонтронитом, монтмориллонитами с различными преобладающими катионами, бейделитом, иллитом, калиевым полевым шпатом и альбитом), карбонатами (магнезитом, арагонитом, кальцитом, доломитом, сидеритом, стронцианитом) и сульфатами (баритом, гипсом, ярозитом, целестином).

Все упомянутые минералы способны к новообразованию из вод и выводят из них соответствующие элементы.

Кроме оценки значений индексов насыщения в программном комплексе «HydroGeo» имеется возможность получить ориентировочную величину высаженного из раствора минерала (табл. 4).

В количественном выражении преобладают минералы группы карбонатов (65,3 %) и сульфатов (33,4 %).

Проведенные физико-химические расчеты хорошо согласуются с минералогическими исследованиями, подтверждают гидрогенный механизм осадкообразования и могут использоваться в качестве основы для дальнейших исследований процессов формирования озер и их осадков.

Таблица 4. Количественная оценка высаженных из раствора минералов

Table 4. Quantitative assessment of minerals precipitated from solution

Минералы/Minerals	Формула/Formula	мг/л/mg/l (%)
Гидрооксиды/Hydroxides		
Байерит/Bayerite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	0,32
Гиббсит/Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	0,091
Итого/Total	0,4 (0,1 %)	
Силикаты и алюмосиликаты/Silicates and aluminosilicates		
Нонтронит/Nontronite	$\text{Fe}_{1,65}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,27
Монтмориллонит/Montmorillonite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,36
К-монтмориллонит/K-montmorillonite	$\text{K}_{0,3}\text{Al}_{1,9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,40
Mg-Fe-монтмориллонит/Mg-Fe-montmorillonite	$\text{Mg}_{0,6525}\text{Fe}_{0,335}\text{Al}_{1,47}\text{Si}_{3,82}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,60
Na-Ca-монтмориллонит/Na-Ca-montmorillonite	$\text{Na}_{0,27}\text{Ca}_{0,1}\text{K}_{0,02}\text{Fe}_{0,19}\text{Mg}_{0,22}\text{Al}_{1,58}\text{Si}_{3,94}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,62
Mg-бейделлит/Mg-beidellite	$\text{Mg}_{0,165}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,27
Na-бейделлит/Na-beidellite	$\text{Na}_{0,33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,22
Mg-мусковит/Mg-muscovite	$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,97
К-иллит/K-illite	$\text{K}_{0,5}\text{Al}_{2,5}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,091
Калиевый полевой шпат/Potassium feldspar	KAlSi_3O_8	0,22
Альбит/Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	0,85
Итого/Total	5,4 (1,2 %)	
Карбонаты/Carbonates		
Магнезит/Magnesite	MgCO_3	84
Арагонит/Aragonite	CaCO_3	56
Кальцит/Calcite	CaCO_3	64
Доломит/Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	89
Сидерит/Siderite	FeCO_3	1,1
Стронцианит/Strontianite	SrCO_3	1,8
Итого/Total	295,9 (65,3 %)	
Сульфаты/Sulfates		
Барит/Barite	BaSO_4	0,046
Гипс/Gypsum	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	140
Ярозит/Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	1,7
Целестин/Celestine	SrSO_4	9,5
Итого/Total	151,2 (33,4 %)	
Итого все минералы/Total all minerals	452,3 (100 %)	

Минеральные ассоциации осадков озера Красненькое

После диагностики минерального состава осадков озера Красненькое как аналитическим (рентгенофазовым) методом, так и с помощью моделирования (физико-химические расчеты), установлены следующие минеральные виды: кварц, альбит, калиевый полевой шпат (санидин), пирит, арагонит, кальцит (в том числе и магний-обогащенный кальцит), доломит, гипс, тенардит, бёркеит, галит, а также глинистые минералы, которые представлены иллитом, хлоритом, каолинитом и смешанослойными минералами иллит-монтмориллонитового ряда. По генетическому принципу установленные минералы можно разделить на две ассоциации: терригенную и гидрогенную.

Терригенная ассоциация включает в себя минералы: кварц, калиевый полевой шпат (санидин), альбит и пирит, которые образовались в результате механического разрушения подстилающих пород озера и привнесены в котловину преимущественно экзогенными процессами. Набор минералов терригенной ассоциации сопоставим с составом подстилающих пород кохайской свиты верхнего девона.

Гидрогенная ассоциация включает в себя минералы, сформировавшиеся преимущественно в процессе испарительного концентрирования. Данная ассоциация объединяет следующие минералы: арагонит, кальцит, магнезиальный кальцит, доломит, гипс, тенардит, бёркеит, галит. Также на основании данных физико-химических расчетов можно предположить наличие в осадках таких водорастворимых минералов, как: магнезит, сидерит, стронцианит, барит, ярозит и целестин, вероятно, они присутствуют в озерных осадках, но не были обнаружены аналитическими методами из-за разрешающей способности оборудования.

Полученные данные сопоставимы с результатами ранее проведенных исследований по озерам Южно-Минусинской котловины [20, 21], а также

прочими минерализованными водоемами мирового масштаба [1–8, 32–51].

Заключение

В результате проведенных исследований установлено.

- Аналитическим (рентгенофазовым) методом и с применением моделирования (физико-химические расчеты) в осадках озера Красненькое диагностированы минералы: кварц, альбит, калиевый полевой шпат (санидин), пирит, арагонит, кальцит (в том числе высокомагнезиальный), доломит, гипс, тенардит, бёркеит, галит, а также глинистые минералы (иллит, хлорит, каолинит и смешанослойные образования иллит-монтмориллонитового ряда). Физико-химические расчеты указывают на наличие в осадках магнезита, сидерита, стронцианита, барита, ярозита и целестина.
- Полученные минеральные виды разделены на две ассоциации по генетическому принципу. Терригенная включает в себя минералы, привнесенные в котловину озера экзогенными процессами, вследствие разрушения подстилающих и близлежащих горных пород. Минералы данной ассоциации не растворимы в воде. Гидрогенная ассоциация объединяет водорастворимые минералы, которые сформировались в процессе испарительного концентрирования.
- Физико-химические расчеты показали отличную сходимость с данными рентгенофазового анализа и могут применяться как взаимодополняющие методы для изучения минералогических особенностей осадков соленых озер с целью повышения точности результатов.

Таким образом, проведенные исследования могут стать основой для дальнейшего изучения минералого-геохимических особенностей и процессов, происходящих в минерализованных водоемах, с целью понимания их природы и условий образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замана Л.В., Вахнина И.Л. Гидрохимия соленых озер юго-восточного Забайкалья в фазу аридизации климата в начале XXI века // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11-4. – С. 608–612.
2. Ураноносность высокоминерализованных озер Северо-Западной Монголии / В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, Н.З. Ляхов, С.Л. Шварцев, С. Ариунбилэг, М.Н. Колпакова, С.С. Шацкая, Л.Э. Чупахина, Л.В. Куйбида, Е.Н. Мороз // Докл. РАН. – 2011. – Т. 437. – № 1. – С. 85–89.
3. Шварцев С.Л., Ван Я. Геохимия содовых вод межгорного бассейна Датун провинция Шаньси, Северо-Западный Китай // Геохимия. – 2006. – № 10. – С. 1097–1109.
4. Современное гидрологическое состояние озера Баскунчак / Ш.Р. Поздняков, Е.В. Иванова, А.Е. Лапенков, А.В. Гузева, А.В. Ревунова // Известия АО РГО. – 2020. – № 4 (59). – С. 58–67.
5. Лысенко Т.М. Растительные сообщества засоленных почв озера Эльтон и его окрестностей (Волгоградская область) // Самарская Лука. – 2008. – Т. 17. – № 1 (23). – С. 98–104.
6. Литовский В.В. Гравиогеография соленых озер Урала и сопредельных территорий: II. Северный и Западный Казахстан, Оренбуржье. Особенности геохимии и генезиса // Географический вестник. – 2018. – № 3 (46). – С. 5–15.
7. Соловьянова Н.А., Емельянова Е.К., Андреева И.С., Микробиологические особенности соленых озер Кулундинской озерной системы // Вестник Нижневартского государственного университета. – 2022. – № 1 (57). – С. 4–15.
8. Химический состав соленых озер Северо-Минусинской котловины, Хакасия / Н.В. Гусева, Ю.Г. Копылова, А.А. Хвашевская, И.В. Сметанина // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 163–168.

9. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N-46-XIX (Усть-Бурь). Объяснительная записка / А.Д. Котельников, Н.А. Макаренко, А.Г. Дербан, И.В. Котельникова, А.Н. Филимонов, Ф.Р. Сатаев, А.И. Третьяк, О.А. Кренида, Т.В. Козулина. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. – 330 с.
10. Rogozin D.Yu. Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. – Красноярск: Изд-во: ИФ СО РАН, 2018. – 241 с.
11. Покровский Д.С. и др. Подземные воды Республики Хакасия и водоснабжение населения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2001. – 300 с.
12. СТО ТГУ МИ.207-2024. Горные породы, минералы, руды. Методика количественного анализа фазового состава порошковых моно- и полиминеральных фаз рентгенографическим методом. Введ. 2024-12-03. – Томск: ТГУ, 2024. – 13 с.
13. Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра. Ленинградское отделение, 1983. – 359 с.
14. Kamenov G.D. ICP-MS and material analysis // *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*. – 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1002/9781119188230.saseas0315
15. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // *Известия Томского политехнического университета*. – 2002. – Т. 305. – № 6. – С. 348–365.
16. Природно-техногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области / И.В. Вологодина, Е.М. Дутова, Д.С. Покровский, И.В. Радюк // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. – 2015. – Т. 3. – С. 58–72.
17. Гидрогенное концентрирование золота в аллювиальных россыпях Егорьевского района (Салаир) / Е.М. Дутова, М.Б. Букаты, А.И. Недолыко, Д.С. Покровский, С.Л. Шварцев // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47. – № 3. – С. 364–376.
18. Термодинамическая модель сорбции двухвалентных тяжелых металлов кальцитом в природно-техногенных обстановках / О.Л. Гаськова, М.Б. Букаты, Г.П. Широнова, В.Г. Кабанник // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – № 2. – С. 115–126.
19. Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk / A.I. Karmalov, E.M. Dutova, I.V. Vologdina, D.S. Pokrovsky, V.D. Pokrovskiy, K.K. Kuzevanov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2016. – № 012032.
20. Taloe – sedimentation in an Intermittent Lake (Russian Federation, Republic of Khakassia) / M.O. Khrushcheva, E.M. Dutova, P.A. Tishin, A.L. Arkhipov, A.N. Nikitenkov, A.I. Chernyshov // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11. – № 5 (522). – 19 p. DOI: 10.3390/min11050522. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/5/522> (дата обращения: 25.08.2025).
21. Минералогические особенности осадков соленого озера Усколь (Республика Хакасия) / М.О. Хрущева, Е.М. Дутова, П.А. Тишин, А.Н. Никитенков, А.И. Чернышов, А.Л. Архипов // *Геосферные исследования*. – 2021. – № 2. – С. 29–43. DOI: 10.17223/25421379/19/3.
22. Борзенко С.В. Основные условия формирования химического состава вод соленых и солоноватых озер Восточного Забайкалья // *Геохимия*. – 2020. – Т. 65. – № 12. – С. 1212–1230.
23. Borzenko S.V. Principal parameters controlling water composition in saline and brackish lakes in Eastern Transbaikalia // *Geochemistry International*. – 2020. – Vol. 58. – № 12. – P. 1356–1373.
24. Генетическая информативность глинистых минералов осадков озера Усколь (республика Хакасия) / М.О. Хрущева, П.А. Тишин, Т.С. Небера, А.И. Чернышов, А.Л. Архипов // *Записки Российского минералогического общества*. – 2020. – Т. 149. – № 5. – С. 99–111.
25. Крупская В.В., Крылов А.А., Соколов В.Н. Глинистые минералы как индикаторы условий осадконакопления на рубежах мел-палеоцен-эоцен на хребте Ломоносова (Северный Ледовитый океан) // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2011. – № 2 (88). – С. 23–35.
26. Bailey S.W., Brindle G.W., Fanning D.S. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983 // *Clay and Clay minerals*. – 1984. – Vol. 32. – P. 239–240.
27. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. – М.: Наука, 1991. – 176 с.
28. Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И. Глинистые минералы в почвах. – Тула: Гриф и К, 2005. – 336 с.
29. Карбонаты: минералогия и химия / под ред. Р.Дж. Ридера. – М: Мир, 1987. – 494 с.
30. Реконструкция климата голоцена на основе карбонатной осадочной летописи малого соленого озера Верхнее Белое (Западное Забайкалье) / Э.П. Солотчина, Е.В. Скляров, П.А. Солотчин, Е.Г. Вологина, В.Н. Столповская, О.А. Склярова, Н.Н. Ухова // *Геология и геофизика*. – 2012. – Т. 53 (12). – С. 1756–1775.
31. Goldsmith J.R., Graf D.L. Relation between lattice constants and composition of Ca-Mg carbonates // *Amer. Miner.* – 1958. – Vol. 43. – P. 84–101.
32. Ходяков Г.С., Юдкин Ю.П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
33. The evolution of alkaline, saline ground- and surface waters in the southern Siberian steppes / D. Banks, V.P. Parnachev, B. Frengstad, W. Holden, O.V. Karnachuk, A.A. Vedernikov // *Applied Geochemistry*. – 2004. – Vol. 19. – № 12. – P. 1905–1926.
34. Diversity of actinobacteria in sediments of Qaidam Lake and Qinghai Lake, China / J. Wu, Z. Peng, T.-W. Guan, H. Yang, X. Tian // *Archives of Microbiology*. – 2021. – Vol. 203. – P. 2875–2885.
35. Гаськова О.Л., Страховенко В.Д., Овдина Е.А. Состав рассолов и минеральная зональность донных отложений содовых озер Кулундинской степи (Западная Сибирь) // *Геология и Геофизика*. – 2017. – Т. 58. – № 10. – С. 1514–1527.
36. Сульфатные минеральные озера Западного Забайкалья: условия образования, химический состав воды и донных отложений / А.М. Плюснин, З.И. Хажеева, С.С. Санжанова, Е.Г. Перязева, Н.А. Ангахаева // *Геология и геофизика*. – 2020. – Т. 61. – № 8. – С. 1055–1073.
37. Abdi L. Sedimentology, mineralogy, and geochemistry of the Late Quaternary Meyghan Playa sediments, NE Arak, Iran: palaeoclimate implications / L. Abdi, H. Rahimpour-Bonab, M. Mirmohammad-Makki, J. Probst, S.R. Langeroud // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1–18.
38. Olson K.J., Demicco R.V., Lowenstein T.K. Seasonal dynamics of evaporite mineral precipitation, dissolution, and back-reactions in shallow and deep hypersaline lakes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2023. – № 351. – P. 51–65.

39. Brine geochemical changes and salt crust evolution of Lake Urmia in Iran / M. Alkhayer, M.K. Eghbal, N. Hamzehpour, R. Rahnemaie // *Catena*. – 2023. – Vol. 231. – № 107310. – P. 1–17.
40. Does climate change lead to potash deposits? A perspective of Lop Nur Salt Lake, China / J. Luo, M. He, H. Chang, Y. Cheng // *Quaternary International*. – 2024. – № 692. – P. 56–72.
41. Research on mineral resources and environment of salt lakes in Qinghai province based on System Dynamics Theory / R. Kong, F. Xue, J. Wang, H. Zhai, L. Zhao // *Resources Policy*. – 2017. – № 52. – P. 19–28.
42. Deng Y., Chai G., Zhang Y. Research progress on lithium extraction from salt-lake brine // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2025. – № 148. – P. 92–108.
43. Spatial distribution, sediment–water partitioning, risk assessment and source apportionment of heavy metals in the Golmud River–Dabson Salt Lake ecosystem / Y. Wang, J. Zhang, Q. Yan, J. Guo, G. Liu, H. Hu, Y. Zhao // *Environmental Research*. – 2025. – № 268. – № 120792.
44. Transformation of clay minerals in salt-affected soils, Pantanal wetland, Brazil / G.R.P. Andrade, S.A.C. Furquim, T.T.V. Nascimento, A.C. Brito, G.R. Camargo, G.C. Souza // *Geoderma*. – 2020. – № 371. – № 114380.
45. Mg recovery from salt lake brine into forsterite refractory materials via precipitation – calcination process / Y. Zhang, Y. Hu, L. Wang, W. Sun // *The Nonferrous Metals Society of China*. – 2024. – № 34. – P. 694–708.
46. Extracting water body data based on SDWI and threshold segmentation: a case study in permafrost area surrounding Salt Lake in Hoh Xil, Qinghai–Tibet Plateau, China / Q. Du, G. Li, D. Chen, S. Qi, Y. Zhou, F. Wang, Y. Cao // *Research in Cold and Arid Regions*. – 2023. – № 15. – P. 202–209.
47. Formation and diagenesis of authigenic silicates in the Late Paleozoic alkaline lake deposits, Junggar Basin, NW China / C. Li, P. Guo, K. Zhong, J. Xu, H. Wen // *Sedimentary Geology*. – 2023. – № 458. – № 106531.
48. Химический состав воды озера Баскунчак / Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Фёдоров, Б.В. Талпа и др. // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2024. – № 12 (150). DOI: 10.60797/IRJ.2024.150.143. URL: <https://research-journal.org/archive/12-150-2024-december/10.60797/IRJ.2024.150.143> (дата обращения: 15.09.2025).
49. Горохова О.Г., Зинченко Т.Д. Альгоценозы планктона и бентоса высокоминерализованных рек-притоков озера Эльтон // *Аридные экосистемы*. – 2020. – Т. 28. – № 4. – С. 201–210.
50. Гидрохимия и геохимическая типизация соленых озер степной части Алтайского края / М.Н. Колпакова, С.В. Борзенко, В.П. Исупов, С.С. Шацкая, С.Л. Шварцев // *Вода: химия и экология*. – 2015. – № 1. – С. 11–16.
51. Сезонная изменчивость седиментационных потоков в соленом меромиктическом озере Шира (Хакасия) / В.В. Бабич, А.В. Дарьин, И.А. Калугин, Т.И. Маркович, В.В. Зыков, Д.Ю. Рогозин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 22–34.

Информация об авторах

Мария Олеговна Хрущева, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; masha2904@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1398-9466>

Екатерина Матвеевна Дутова, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30; профессор кафедры природопользования Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36; dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

Александр Леонидович Архипов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; alexlarhipov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0266-4276>

Галина Владимировна Баталова, лаборант центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; gala.batalova2016@yandex.ru

Алексей Николаевич Никитенков, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30; corestone@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

Архипова Наталия Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии Национального исследовательского Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; arhipovanv@ggf.tsu.ru

Поступила в работу: 19.09.2025

Поступила после рецензирования: 25.09.2025

Принята к публикации: 06.10.2025

REFERENCES

1. Zamana L.V., Vakhnina I.L. Hydrochemistry of salt lakes of southeastern Transbaikalia during the climate aridization phase at the beginning of the 21st century. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, no. 11-4, pp. 608–612. (In Russ.)
2. Isupov V.P., Vladimirov A.G., Lyakhov N.Z., Shvartsev S.L., Ariunbileg S., Kolpakova M.N., Shatskaya S.S., Chupakhina L.E., Kuibida L.V., Moroz E.N. Uranium content of highly mineralized lakes in northwestern Mongolia. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 437, no. 1, pp. 85–89. (In Russ.)

3. Shvartsev S.L., Wang Ya. Geochemistry of soda waters of the Datong intermountain basin, Shanxi province, Northwest China. *Geochemistry*, 2006, no. 10, pp. 1097–1109. (In Russ.)
4. Pozdnyakov Sh.R., Ivanova E.V., Lapenkov A.E., Guzeva A.V., Revunova A.V. Current hydrological state of Lake Baskunchak. *Bulletin of the Russian Geographical Society*, 2020, no. 4 (59), pp. 58–67. (In Russ.)
5. Lysenko T.M. Plant communities of saline soils of Lake Elton and its environs (Volgograd region). *Samara Luka*, 2008, vol. 17, no. 1 (23), pp. 98–104. (In Russ.)
6. Litovsky V.V. Graviographic geography of salt lakes of the Urals and adjacent territories: II. Northern and Western Kazakhstan, Orenburg region. Features of geochemistry and genesis. *Geographical Bulletin*, 2018, no. 3 (46), pp. 5–15. (In Russ.)
7. Solovianova N.A., Emelyanova E.K., Andreeva I.S., Microbiological features of salt lakes of the Kulunda lake system. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 2022, no. 1 (57), pp. 4–15. (In Russ.)
8. Guseva N.V., Kopylova Yu.G., Khvashevskaya A.A., Smetanina I.V. Chemical composition of salt lakes of the North Minusinsk Basin, Khakassia, *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 163–168. (In Russ.)
9. Kotelnikov A.D., Makarenko N.A., Derban A.G., Kotelnikova I.V., Filimonov A.N., Satayev F.R., Tretyak A.I., Krenida O.A., Kozulina T.V. *State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200,000. 2nd ed. Minusinsk Series. Sheet N-46-XIX (Ust-Byur). Explanatory Note*. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2018. 330 p. (In Russ.)
10. Rogozin D.Yu. *Meromictic lakes of the North Minusinsk Basin: stratification patterns and ecology of phototrophic sulfur bacteria*. Krasnoyarsk, Institute of Physics SB RAS Publ., 2018. 241 p. (In Russ.)
11. Pokrovsky D.S. *Groundwater of the Republic of Khakassia and water supply of the population*. Tomsk, NTL Publ. House, 2001. 300 p. (In Russ.)
12. STO TSU MI.207-2024. *Rocks, minerals, ores. Methodology for quantitative analysis of the phase composition of powder mono- and polymineral phases by the X-ray diffraction method*. Introd. 2024-12-03. Tomsk, TSU Publ., 2024. 13 p. (In Russ.)
13. *X-ray analysis of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)* Ed. by V.A. Frank-Kamenetsky. Leningrad, Nedra. Leningrad branch Publ., 1983. 359 p. (In Russ.)
14. Kamenov G.D. ICP-MS and material analysis. *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1002/9781119188230.saseas0315
15. Bukaty M.B. Development of software for solving hydrogeological problems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 6, pp. 348–365. (In Russ.)
16. Vologdina I.V., Dutova E.M., Pokrovsky D.S., Radyuk I.V. Natural and man-made mineral formations at water intakes of Tomsk region. *Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2015, vol. 3, pp. 58–72. (In Russ.)
17. Dutova E.M., Bukaty M.B., Nedolivko A.I., Pokrovsky D.S., Shvartsev S.L. Hydrogenous concentration of gold in alluvial placers of Yegoryevsky district (Salair). *Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 364–376. (In Russ.)
18. Gaskova O.L., Bukaty M.B., Shironosova G.P., Kabannik V.G. Thermodynamic model of sorption of divalent heavy metals by calcite in natural and technogenic settings. *Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 2, pp. 115–126. (In Russ.)
19. Karmalov A.I., Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Pokrovskiy V.D., Kuzevanov K.K. Hydrogeochemical Characteristics of Water Intakes from Groundwater Sources in Seversk. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. no. 012032.
20. Khrushcheva M.O., Dutova E.M., Tishin P.A., Arkhipov A.L., Nikitenkov A.N., Chernyshov A.I. Taloe – sedimentation in an Intermittent Lake (Russian Federation, Republic of Khakassia). *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 5 (522), 19 p.m. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/5/522> (accessed 25 August 2025). DOI: 10.3390/min11050522.
21. Khrushcheva M.O., Dutova E.M., Tishin P.A., Nikitenkov A.N., Chernyshov A.I., Arkhipov A.L. Mineralogical features of sediments of the salt lake Uskol (Republic of Khakassia) *Geosphere Research*, 2021, no. 2, pp. 29–43. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/19/3.
22. Borzenko S.V. Basic conditions for the formation of the chemical composition of waters in salt and brackish lakes in Eastern Transbaikalia. *Geochemistry*, 2020, vol. 65, no. 12, pp. 1212–1230. (In Russ.)
23. Borzenko S.V. Principal parameters controlling water composition in saline and Brackish Lakes in Eastern Transbaikalia. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 1356–1373.
24. Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Nebera T.S., Chernyshov A.I., Arkhipov A.L. Genetic information content of clay minerals in sediments of Lake Uskol (Republic of Khakassia). *Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2020, vol. 149, no. 5, pp. 99–111. (In Russ.)
25. Krupskaya V.V., Krylov A.A., Sokolov V.N. Clay minerals as indicators of sedimentation conditions at the Cretaceous-Paleocene-Eocene boundaries on the Lomonosov Ridge (Arctic Ocean). *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2011, no. 2 (88), pp. 23–35. (In Russ.)
26. Bailey S.W., Brindley G.W., Fanning D.S. Report of the clay minerals society nomenclature committee for 1982 and 1983. *Clay and Clay minerals*, 1984, vol. 32, pp. 239–240.
27. Drits V.A., Kossovskaya A.G. *Clay minerals: micas, chlorites*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 176 p. (In Russ.)
28. Sokolova T.A., Dronova T.Ya., Tolpeshta I.I. *Clay minerals in soils*. Tula, Grif i K Publ., 2005. 336 p. (In Russ.)
29. *Carbonates: mineralogy and chemistry*. Ed. by R.J. Reeder. Mpscpw, Mir Publ., 1987. 494 p. (In Russ.)
30. Solotchina E.P., Sklyarov E.V., Solotchin P.A., Vologina E.G., Stolpovskaya V.N., Sklyarova O.A., Ukhova N.N. Reconstruction of the Holocene climate based on the carbonate sedimentary record of the small salt lake Verkhnee Beloe (Western Transbaikalia). *Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53 (12), pp. 1756–1775. (In Russ.)
31. Goldsmith J.R., Graf D.L. Relation between lattice constants and composition of Ca-Mg carbonates. *American Mineralogist*, 1958, vol. 43, pp. 84–101
32. Khodyakov G.S., Yudkin Yu.P., Khodyakov G.S. *Sedimentation analysis of highly dispersed systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 192 p. (In Russ.)
33. Banks D., Parnachev V.P., Frengstad B., Holden W., Karnachuk O.V., Vedernikov A.A. The evolution of alkaline, saline ground- and surface waters in the southern Siberian steppes, *Applied Geochemistry*, 2004, vol. 19, no. 12, pp. 1905–1926.

34. Wu J. Peng Z., Guan T.-W., Yang H., Tian X. Diversity of actinobacteria in sediments of Qaidam Lake and Qinghai Lake, China. *Archives of Microbiology*, 2021, vol. 203, pp. 2875–2885.
35. Gaskova O.L., Strakhovenko V.D., Ovdina E.A. Composition of brines and mineral zoning of bottom sediments of soda lakes in the Kulunda steppe (Western Siberia). *Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 10, pp. 1514–1527. (In Russ.)
36. Plyusnin A.M., Khazheeva Z.I., Sanzhanova S.S., Peryazeva E.G., Angakhaeva N.A. Sulphate mineral lakes of Western Transbaikalia: formation conditions, chemical composition of water and bottom sediments. *Geology and Geophysics*, 2020, vol. 61, no. 8, pp. 1055–1073. (In Russ.)
37. Abdi L., Rahimpour-Bonab H., Mirmohammad-Makki M., Probst J., Langeroud S.R. Sedimentology, mineralogy, and geochemistry of the Late Quaternary Meyghan Playa sediments, NE Arak, Iran: palaeoclimate implications. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, pp. 1–18.
38. Olson K.J., Demicco R.V., Lowenstein T.K. Seasonal dynamics of evaporite mineral precipitation, dissolution, and back-reactions in shallow and deep hypersaline lakes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, no. 351, pp. 51–65.
39. Alkhayer M., Eghbal M.K., Hamzehpour N., Rahnemaie R. Brine geochemical changes and salt crust evolution of Lake Urmia in Iran. *Catena*, 2023, vol. 231, no. 107310
40. Luo J., He M., Chang H., Cheng Y. Does climate change lead to potash deposits? A perspective of Lop Nur Salt Lake, China. *Quaternary International*, 2024, no. 692, pp. 56–72.
41. Kong R., Xue F., Wang J., Zhai H., Zhao L. Research on mineral resources and environment of salt lakes in Qinghai province based on System Dynamics Theory. *Resources Policy*, 2017, no. 52, pp. 19–28.
42. Deng Y., Chai G., Zhang Y. Research progress on lithium extraction from salt-lake brine. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2025, no. 148, pp. 92–108.
43. Wang Y., Zhang J., Yan Q., Guo J., Liu G., Hu H., Zhao Y. Spatial distribution, sediment–water partitioning, risk assessment and source apportionment of heavy metals in the Golmud River-Dabson Salt Lake ecosystem. *Environmental Research*, 2025, no. 268, 120792.
44. Andrade G.R.P., Furquim S.A.C., Nascimento T.T.V., Brito A.C., Camargo G.R., Souza G.C. Transformation of clay minerals in salt-affected soils, Pantanal wetland, Brazil. *Geoderma*, 2020, no. 371, 114380.
45. Zhang Y., Hu Y., Wang L., Sun W. Mg recovery from salt lake brine into forsterite refractory materials via precipitation – calcination process. *The Nonferrous Metals Society of China*, 2024, no. 34, pp. 694–708.
46. Du Q., Li G., Chen D., Qi S., Zhou Y., Wang F., Cao Y. Extracting water body data based on SDWI and threshold segmentation: a case study in permafrost area surrounding Salt Lake in Hoh Xil, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Research in Cold and Arid Regions*, 2023, no. 15, pp. 202–209.
47. Li C., Guo P., Zhong K., Xu J., Wen H. Formation and diagenesis of authigenic silicates in the Late Paleozoic alkaline lake deposits, Junggar Basin, NW China. *Sedimentary Geology*, 2023, no. 458, 106531.
48. Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Talpa B.V. Chemical composition of Lake Baskunchak water. *International Research Journal*, 2024, no. 12 (150). (In Russ.) Available at: <https://research-journal.org/archive/12-150-2024-december/10.60797/IRJ.2024.150.143> (accessed 15 September 2025). DOI: 10.60797/IRJ.2024.150.143
49. Gorokhova O.G., Zinchenko T.D. Algocenoses of plankton and benthos of highly mineralized rivers-tributaries of Lake Elton. *Arid ecosystems*, 2020, vol. 28, no. 4, pp. 201–210. (In Russ.)
50. Kolpakova M.N., Borzenko S.V., Isupov V.P., Shatskaya S.S., Shvartsev S.L. Hydrochemistry and geochemical typification of salt lakes in the steppe part of the Altai Territory. *Water: chemistry and ecology*, 2015, no. 1, pp. 11–16. (In Russ.)
51. Babich V.V., Dar'in A.V., Kalugin I.A., Markovich T.I., Zykov V.V., Rogozin D.Yu. Seasonal variability of sedimentation flows in the saline meromictic Lake Shira (Khakassia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 22–34. (In Russ.)

Information about the authors

Maria O. Khrushcheva, Cand. Sc., Research Fellow, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. masha2904@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1398-9466>

Ekaterina M. Dutova, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dutova@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-6685>

Alexander L. Arkhipov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. alexlarhipov@gmail.com

Galina V. Batalova, Laboratory Assistant, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gala.batalova2016@yandex.ru

Aleksey N. Nikitenkov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. corestone@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8539-1420>

Natalia V. Arkhipova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. arhipovanv@ggf.tsu.ru

Received: 19.09.2025

Revised: 25.09.2025

Accepted: 06.10.2025