

## МИНЕРАЛОГИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

УДК 552.13

### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДКОВ СОЛЕНОГО ОЗЕРА УСКОЛЬ (РЕСПУБЛИКА ХАКАСИЯ)

М.О. Хрущева<sup>1</sup>, Е.М. Дутова<sup>1,2</sup>, П.А. Тишин<sup>1</sup>, А.Н. Никитенков<sup>2</sup>,  
А.И. Чернышов<sup>1</sup>, А.Л. Архипов<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Рассматриваются минералогические особенности осадков соленого озера Усколь. Методом рентгенофазового анализа диагностированы минеральные виды, относящиеся к группам оксидов, алюмосиликатов, карбонатов, сульфатов и галоидов. По генезису полученные минералы разделены на две ассоциации: терригенную и гидрогенную. Установлен порядок осаждения минералов гидрогенной ассоциации из озерных вод. Данные подтверждаются физико-химическими расчетами минералообразующей способности водных сред озера.

**Ключевые слова:** Южно-Минусинская котловина, рентгенофазовый анализ, соленые озера, минералообразование, гидрогенные минералы

#### Введение

Вопросам изучения соленых озер посвящено множество работ [Базарова и др., 2011; Zamana, Borzenko, 2010; Attia, 2013; Kolpakova et al., 2019, 2020; Strakhovenko et al., 2020]. Достаточно часто осящаются вопросы формирования различных типов озер, факторы образования эвапоритовых осадков и соляных месторождений [Валяшко, 1962; Чарыкова, Чарыков, 2003; Borzenko, Shvartsev, 2019; Sinha, Raymahashay, 2004; Warren, 2006; Borzenko, 2020]. Встречаются работы, результаты которых направлены на изучение эволюции рассолов, особенностей изменения палеоклимата различных территорий [Солотчина и др., 2012; Chao et al., 2009; Roop et al., 2015; Richoz et al., 2017; Abdi et al., 2018]. При изучении современных литературных данных отмечается, что наиболее часто в публикациях встречаются данные по химическому составу вод соленых озер, накоплению и распределению микро- и макрокомпонентов в озерных водах различных типов, в том числе и водоемов Республики Хакасия [Рогозин, 2018; Parnachev et al., 1999; Parnachev, Degermendzhy, 2002; Banks et al., 2001, 2004, 2008].

Целью данной работы является детальная диагностика минеральных видов соленых озер (на примере озера Усколь), с использованием современных инструментальных методов, а также установление последовательности формирования минералов и оценка степени влияния подземных и поверхностных вод на накопление минералов разных групп – оксидов, алюмосиликатов, карбонатов, сульфатов и галоидов.

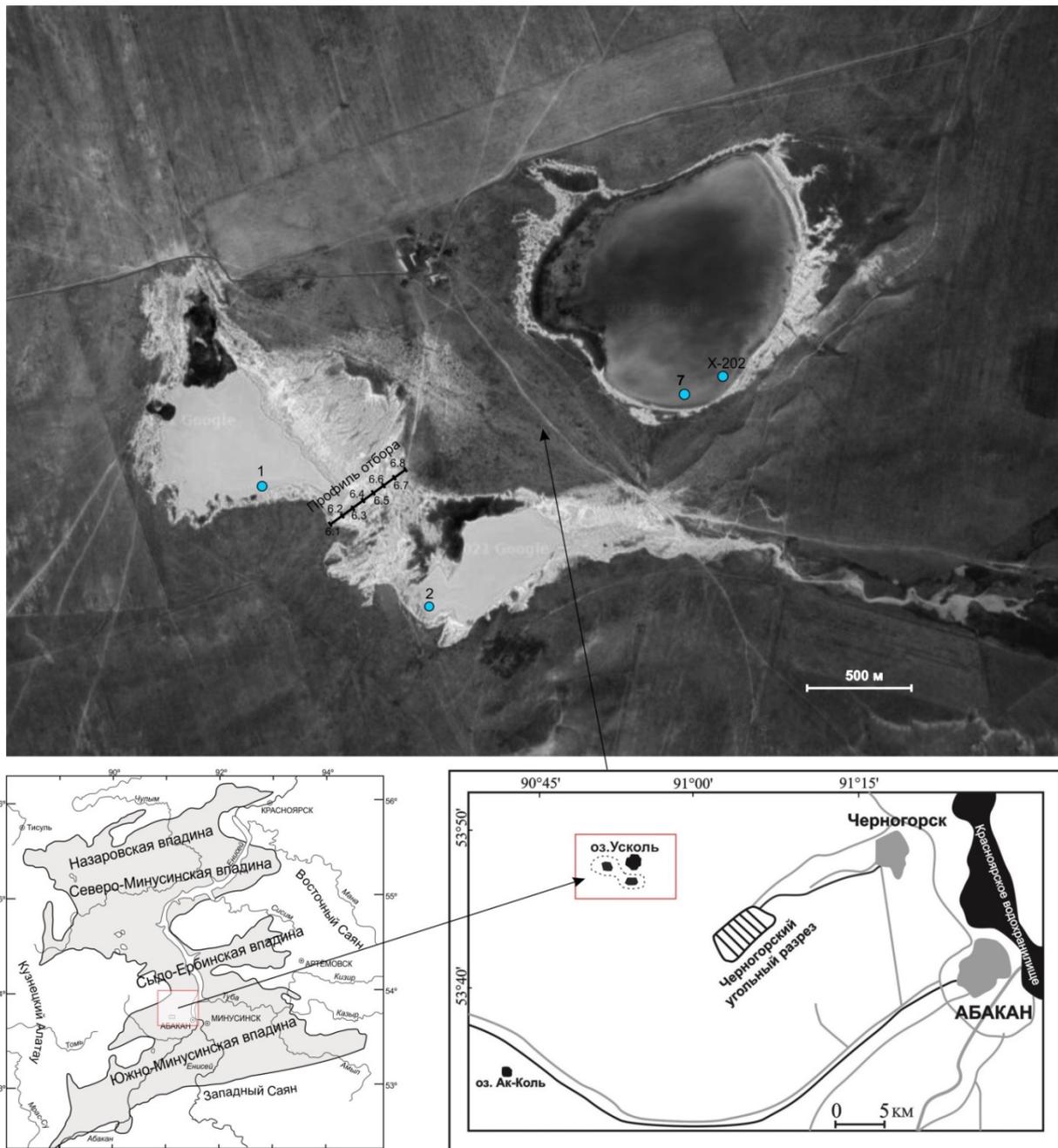
#### Характеристика района и объекта исследований

Озеро Усколь относится к группе соленых озер Южно-Минусинской котловины (Республика Хакасия, Россия), расположенных в степной зоне на территории Уйбатской степи в непосредственной близости к г. Абакану (рис. 1). Выбор озера Усколь в качестве объекта исследования обусловлен его территориальным расположением в высоких широтах (53–54 с.ш.), где характерны ярко выраженные колебания солнечной активности и сезонные колебания температур. Климат изучаемого района семиаридный, он характеризуется холодной зимой и жарким засушливым летом. Минимум атмосферных осадков выпадает в степных зонах, особенно мало на территории Уйбатской степи (220–240 мм в год). Стоит отметить, что на данной территории отмечается повышенная ветровая активность. Это способствует переносу обломочных частиц в котловины озер.

Морфологически озеро Усколь состоит из трех водоемов размерами 1 200 × 1 036 м, 347 × 650 м и 674 × 815 м. Эта система водоемов уникальна тем, что два из них периодически пересыхают. Это обстоятельство позволяет детально изучить их дно. Максимальная глубина озера в некоторых его участках достигает 3 м. Осадки водоема представлены современными аллювиально-делювиальными глинами и илами с золовой составляющей [Котельников и др., 2018]. Средняя скорость осадконакопления оценивается в 2 мм в год [Рогозин, 2018]. Это позволяет предполагать, что изученный разрез (до глубины 1 м) отражает геологическую историю на протяжении около 500 лет. В качестве источников осадочного материала рассматрива-

ются как подстилающие, так и обрамляющие отложения самохвальской свиты (ранний карбон), представ-

ленные зелеными пепловыми туфами и песчаниками с небольшими прослоями известняков.



**Рис. 1. Карта-схема расположения озера Усколь, совмещенная с картой фактического материала**

*Примечание.* Точки 6.1–6.8 (черные) – озерные осадки, отобранные по профилю через 50 м друг от друга. Точки 1, 2, 7 и X-202 (синие) – пробы воды

**Fig. 1. Schematic map of the location of Uskol Lake and sampling spots**

*Note.* Points 6.1–6.8 (black) – lacustrine sediments sampled at each 50 m along the profile. Points 1, 2, 7 and X-202 (blue) – water samples

## Материалы и методы

*Отбор проб.* Отбор проб твердых озерных осадков проводился в засушливый летний период 2018 г.

Пробоотбор осуществлялся с использованием бура диаметром 12 см по профилю в юго-западном – северо-восточном направлении, по пересыхающей части озера (по перемычке между двумя водоемами)

(см. рис. 1). Профиль представляет собой последовательные точки отбора образцов, располагающиеся через каждые 50 м друг от друга. Из каждой точки профиля также отбиралось 10 проб от поверхности до глубины 1 м (через каждые 10 см). В работе приводятся результаты и их обсуждение по данным профиля от точки 6.1 до точки 6.8, где точка 6.1 располагается непосредственно на береговой линии, а все последующие точки – через 50 м от предыдущей, заключительная точка 6.8 расположена в 350 м от береговой линии водоема (рис. 1).

Для изучения геохимических особенностей, а также минералообразующей способности водных средств были отобраны пробы поверхностных озерных вод (обр. 1 и 2). Кроме того, привлекались материалы ранее проведенных исследований по поверхностным водам озера Усколь (обр. 7) [Banks et al., 2001] и (обр. X-202) [Parnachev, Degermendzhy, 2002], также для характеристики подземных вод нижнекаменноугольного водоносного комплекса использовались данные (обр. X-203), полученные в результате проведения хозяйственных работ сотрудниками Томского государственного университета.

*Определение химического состава озерных вод.* Количественное определение основных макрокомпонентов (анионов и катионов) поверхностных вод выполнялось комплексно методами титриметрии ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ), пламенной фотометрии ( $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), потенциометрии (pH), турбидиметрии ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) в аккредитованной проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета.

Определение микрокомпонентов выполнялось методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 7500cx фирмы Agilent Techno-logies в аккредитованной лаборатории ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета по методике, описанной в работе [Kamenov, 2018]. Качество аналитических работ контролировалось на основе стандартов High Purity CRM-TMDW Standard of Drink Water.

*Определение минерального состава озерных осадков.* Диагностика общего минерального состава проводилась с использованием методов рентгенофазового анализа в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» Томского государственного университета на дифрактометре X'Pert PRO фирмы PANalytical (Нидерланды). Съемка проводилась в нормальных условиях: 40 кВ, 30 мА, Си-излучение, Ni-фильтр, диапазон измерений 3–60° 2  $\theta$ . Обработку дифрактограмм и интерпретацию результатов осуществляли с использованием программного комплекса HighScore и базы данных PDF-4 Minerals 2021 (компания ICDD).

*Диагностика глинистых минералов.* Точная диагностика глинистых минералов подразумевает до-

полнительную подготовку образца к съемке с целью их концентрации в пробе. Для этого путем осаждения исходного материала в дистиллированной воде получали фракцию меньше 10 мкм. Время осаждения частиц такого размера рассчитывали по формуле Стокса [Ходяков, Юдкин, 1981]. Полученную фракцию делили на три дополнительных образца: один остался необработанным, второй образец насыщали парами этиленгликоля и третий образец прокаливали в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 2 ч. Из полученных образцов готовили ориентированные препараты. Идентификация глинистых минералов основывалась на положении серии {001} базальных рефлексов и сопоставлении указанных выше трех состояний образцов.

*Физико-химические расчеты.* С целью уточнения генезиса формирующихся осадков были проведены физико-химические расчеты, включая тестирование минералообразующей способности водных сред. Для расчетов использовался программный комплекс HydroGeo, разработанный М.Б. Букаты [Букаты, 2002]. Использование программного обеспечения HydroGeo для решения широкого спектра различных задач было продемонстрировано ранее [Дутова и др., 2006; Гаськова и др., 2009; Shvartsev, Dutova, 2001; Balobanenko et al., 2016; Dutova et al., 2017, 2019]. Наиболее внимательно и детально была изучена минералообразующая способность пресных подземных вод и соответствующие им минеральные новообразования [Вологодина и др., 2015; Dutova et al., 2016; Karmalov et al., 2016; Покровский и др., 2002; Pokrovskiy et al., 2014].

Физико-химические расчеты для исследований процессов озера Усколь проводилось нами применительно к средним ландшафтно-климатическим условиям района ( $T = 10$  °С,  $P_{\text{общ}} = 1$  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 при помощи расчета 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 озерных осадков*

Минеральный состав осадков озера Усколь диагностирован с помощью рентгенофазового анализа. Минеральный набор представлен оксидами (кварц), алюмосиликатами (глинистые минералы, анальцит, полевые шпаты), карбонатами (кальцит, доломит), сульфатами (гипс) и галоидами (галит) (табл. 1).

Таблица 1

Обобщенные данные минерального состава осадков озера Усколь  
(по данным рентгенофазового анализа), %

Table 1

Mineral composition of sediments of Uskol Lake (according to XRD analysis), %

Группа минералов	Минеральный вид	Химическая формула минерала	Концентрация		
			Средн.	Мин.	Макс.
Оксиды	Кварц	SiO <sub>2</sub>	30,9	15	42
Алюмосиликаты	Иллит	K <sub>&lt;1</sub> Al((Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	2,8	1	4
	Na-монтмориллонит	(Na,Ca) <sub>0,33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	15,4	9	22
	Ca-Mg-монтмориллонит	(Ca,Mg) <sub>0,33</sub> (Al,Mg) <sub>2</sub> (Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	22,6	15	32
	Анальцим	Na[AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]·xH <sub>2</sub> O	11,1	2	19
	Альбит	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	14,4	2	27
	Санидин	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1,6	<1	2
Карбонаты	Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	13,9	2	63
	Доломит	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,0	<1	2
Сульфаты	Гипс	CaSO <sub>4</sub>	1,4	<1	4
	Тенардит	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<1	<1	<1
Галоиды	Галит	NaCl	2,0	<1	3

**Оксиды и алюмосиликаты.** Кварц установлен по серии основных базальных отражений  $hkl$  ( $d$ , Å<sub>интенсивность</sub>): 011 (3,34<sub>10</sub>), 100 (4,25<sub>3</sub>), 112 (1,81<sub>2</sub>) Å. Количество его концентрации варьируют от 15 до 42 % при среднем значении 30,9 %. В целом его распространение в осадках достаточно равномерное, не наблюдается заметных превышений на каких-либо участках рассматриваемого профиля. Кварц рассматривается как основной терригенный минерал, но также не исключается его частично гидрогенное происхождение.

Анальцим – минерал группы цеолитов. Он диагностирован по серии рефлексов  $hkl$  ( $d$ , Å<sub>интенсивность</sub>): 404 (3,42<sub>10</sub>), 122 (5,61<sub>8</sub>), 054 (2,92<sub>7</sub>) Å. Анальцим встречается по всему разрезу и на всех рассматриваемых глубинах, его содержание варьирует от 2 до 19 % при среднем значении 11,1 %. Анальцим – типичный терригенный минерал, который образовался в осадках за счет разрушения натриевого плагиоклаза в среде миграции подземных вод.

Полевые шпаты представлены натриевым плагиоклазом – альбитом и калиевым полевым шпатом – санидином. Альбит диагностирован по дифракционными линиям  $hkl$  ( $d$ , Å<sub>интенсивность</sub>): 002 (3,18<sub>10</sub>),  $\bar{2}01$  (4,03<sub>8</sub>),  $\bar{1}30$  (3,69<sub>4</sub>),  $\bar{2}02$  (3,21<sub>7</sub>) Å, санидин по рефлексам 002 (3,23<sub>10</sub>), 220 (3,33<sub>6</sub>),  $\bar{1}\bar{1}2$  (3,46<sub>5</sub>),  $\bar{1}30$  (3,75<sub>5</sub>) Å. Для альбита характерно достаточно равномерное распространение в разрезе и закономерность к увеличению по мере удаления от береговой линии озера, его содержания варьируют от 2 до 27 % при среднем значении 14,4 %. Для санидина характерны небольшие концентрации от следовых количеств (<1 %) до 2 %. Для него характерно накопление преимущественно в нижних частях разреза (60–100 см от поверхности). Полевые шпаты – типичные терригенные минералы, накопление которых происходит за счет разрушения

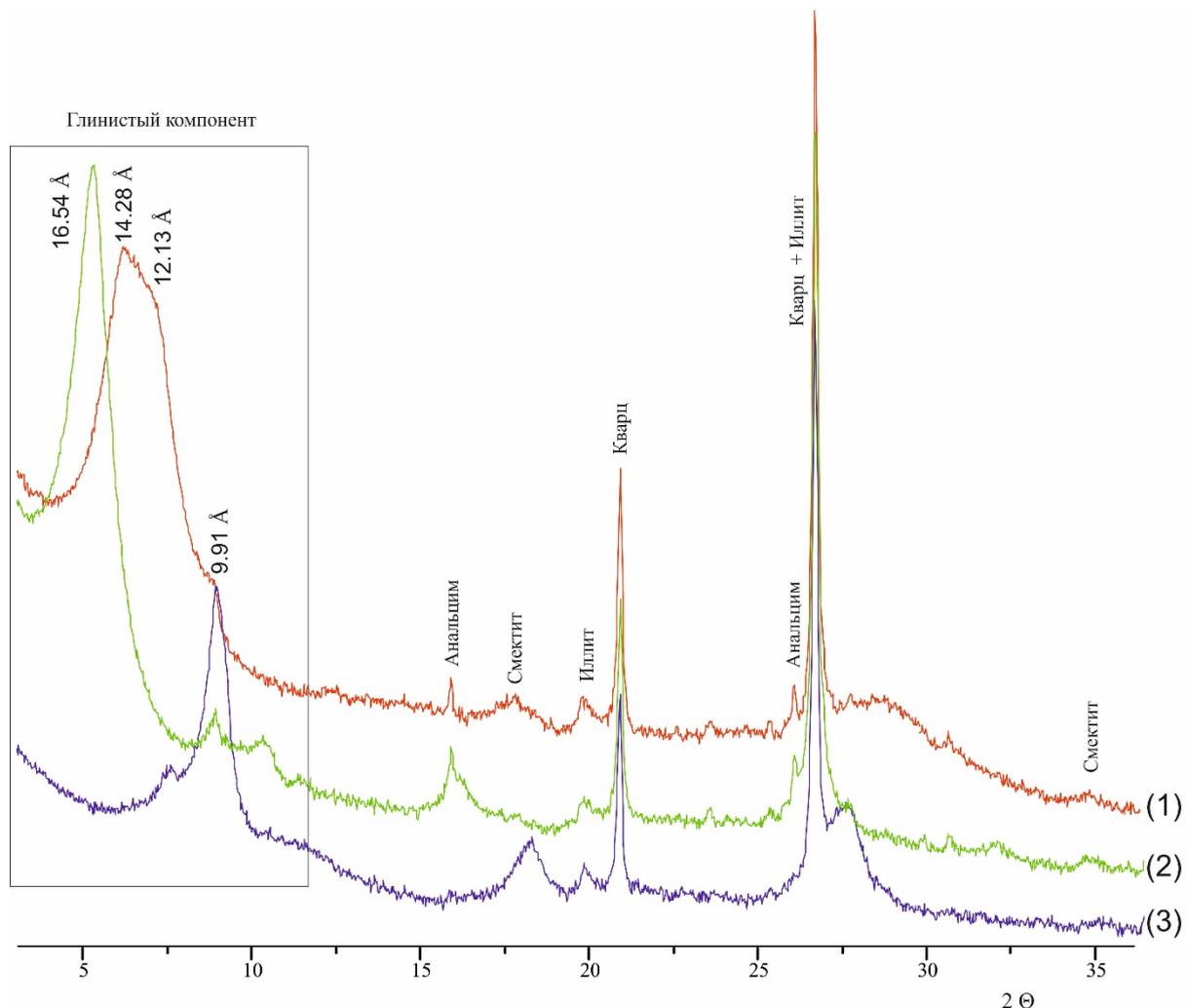
близлежащих коренных пород. Однако в литературе встречаются данные о возможном гидрогенном происхождении альбита в условиях соленых озерных систем [Борзенко, 2020].

Глинистые минералы представлены тремя разновидностями: кальций-магниевым монтмориллонитом, натриевым монтмориллонитом и иллитом. Рентгенографически монтмориллониты установлены по серии базальных отражений  $hkl$  ( $d$ , Å<sub>интенсивность</sub>): 001 (14,28–12,13<sub>10</sub>), 020 (4,49<sub>2</sub>) и  $\bar{1}31$  (2,57<sub>1</sub>) Å. Основной диагностический признак монтмориллонитов заключается в смещении рефлекса 001 в область малых углов  $2\Theta$ , т.е. в увеличении соответствующего межплоскостного расстояния (14,28–12,13 Å → 16,54 Å) после насыщения образца парами этиленгликоля (рис. 2). Смещение обусловлено увеличением параметра  $c$  кристаллической структуры за счет внедрения в ее межслоевой промежуток органических молекул этиленгликоля – двухатомного спирта C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub> [Рентгенография..., 1983]. После прокалывания образца при температуре 550 °C межплоскостное расстояние сокращается до 9,91 Å (рис. 2), так как кристаллическая структура сжимается за счет удаления из нее межслоевой воды.

На наличие натриевого катиона в межслоевом промежутке монтмориллонита указывает положение первого базального пика 001 ( $d = 12,13$  Å), в то время как у монтмориллонита с кальциевым и магниевым катионами положение этого рефлекса отвечает межплоскостному расстоянию 14,28 Å [Рентгенография..., 1983]. Особенность положения этих рефлексов объясняется различным составом поглощенного комплекса, а именно отношением кальция, магния и натрия, а также различным содержанием в монтмориллоните связанной воды. На дифрактограмме (рис. 2) видно, что пик в обла-

сти 14,28–12,13 Å характеризуется уширением формы, это указывает на наличие в осадках как

натрийсодержащего, так и кальций-магниевого монтмориллонита.



**Рис. 2. Пример дифрактограммы образца глинистой составляющей**

Образец 6.1, глубина отбора 50–60 см, снятой в воздушно-сухом состоянии (1), после насыщения парами этиленгликоля (2) и после прогрева образца при температуре 550 °С (3)

**Fig. 2. An example XRD-data of clay component**

The sample 6.1, Sampling depth 50–60 cm obtained in air-dry state (1), after saturation with ethylene glycol vapor (2) and after heating the sample at a temperature of 550 °C (3)

В данной работе иллит (согласно рекомендациям Номенклатурного комитета) подразумевает групповое название всех слюдяных минералов, в которых содержание разбухающих смектитовых слоев не превышает 15 % [Bailey et al, 1984]. Диагностика иллита проведена по характерному набору рефлексов  $hkl$  ( $d$ , Å<sub>интенсивность</sub>): 002 (9,91<sub>10</sub>), 004 (4,99<sub>4</sub>), 006 (3,35<sub>10</sub>), 0010 (1,98<sub>4</sub>). При прокаливании и насыщении образца этиленгликолем межплоскостные расстояния не меняются из-за прочной, стабильной решетки иллита, которая не способна к межпакетной адсорбции воды.

В осадках озера Усколь глинистые минералы составляют значительную долю относительно всех

минеральных видов, суммарно их концентрации меняются от 13 до 50 % при среднем 30,6 %. В значительных количествах отмечаются кальций-магниевого и натриевого монтмориллониты, в то время как иллит определен в малых концентрациях. Также обнаружена закономерность накопления глинистых минералов: в интервале 30–100 см характерно увеличение содержания натриевого монтмориллонита и иллита, а для кальций-магниевого монтмориллонита, напротив, наблюдается тенденция к увеличению от поверхности и до глубины 50 см. Накопление глинистых минералов в осадках происходит вследствие разрушения и сноса терригенного материала в кот-

ловину озера, а также за счет процессов эпигенетического преобразования коренных горных пород (преимущественно полевых шпатов) в зоне миграции подземных вод.

**Карбонаты.** Карбонатные минералы представлены кальцитом и доломитом. Кальцит диагностирован по основным рефлексам  $hkl$  ( $d$ ,  $\text{\AA}_{\text{интенсивность}}$ ) 104 ( $3,03_{10}$ ), 110 ( $2,49_2$ ), 113 ( $2,28_2$ ), 202 ( $2,09_2$ )  $\text{\AA}$ , доломит – по пикам 104 ( $2,88_{10}$ ), 012 ( $3,69_3$ ), 006 ( $2,66_3$ )  $\text{\AA}$ . Доминирующим минералом в группе карбонатов выступает кальцит, его содержания варьируют от 2 до 63 % при среднем значении 13,9 %. Наибольшие концентрации кальцита отмечаются в точке отбора 6.4, которая располагается в 150–200 м от начала профиля, средние значения в этой точке составляют 46 %. В значительно меньших количествах встречается доломит, максимально не более 2 %. В осадках озера Усколь кальцит выступает как терригенным, так и гидрогенным минералом. Это подтверждается химическими особенностями озерных вод, а также терригенно-карбонатным составом коренных пород. Доломит – гидрогенный минерал, который образуется как за счет процессов испарительного концентрирования озерных вод, так и за счет взаимодействия подземных вод с осадками.

**Сульфаты.** Сульфатные минералы в осадках озера Усколь представлены гипсом и тенардитом. Гипс выявлен по серии отражений  $hkl$  ( $d$ ,  $\text{\AA}_{\text{интенсивность}}$ )  $\bar{1}21$  ( $4,27_{10}$ ), 020 ( $7,59_8$ ),  $\bar{1}41$  ( $3,06_6$ ), 121 ( $2,87_4$ )  $\text{\AA}$ . Его содержание достаточно невысокое и выражается в значениях от следовых количеств до 4 % при среднем 1,4 %. Стоит отметить, что накопление гипса происходит преимущественно в верхней части изучаемых осадков (от поверхности до глубины 30 см), в составе соляной корки. Гипс – типичный гидрогенный минерал, который может образовываться за счет взаимодействия подземных вод с осадками и за счет процессов испарительного концентрирования.

Тенардит диагностирован по отражениям  $hkl$  ( $d$ , интенсивность) 311 ( $2,78_{10}$ ), 111 ( $4,66_7$ ), 220 ( $3,84_2$ ), 131 ( $3,18_6$ )  $\text{\AA}$ . Его концентрации зафиксированы на уровне следовых количеств (менее 1 %). Тенардит – гидрогенный минерал, способный к накоплению в процессе испарительного концентрирования.

**Галоиды.** Галит установлен по характерным линиям  $hkl$  ( $d$ ,  $\text{\AA}_{\text{интенсивность}}$ ) 200 ( $2,81_{10}$ ), 220 ( $1,99_6$ ), 222 ( $1,62_2$ )  $\text{\AA}$ . Содержание галита в осадках ничтожно мало и колеблется на уровне следовых количеств, редко достигая 3 % в верхних частях разреза.

#### **Геохимические особенности и минералообразующая способность подземных и озерных вод**

При проведении данных исследований нами были проанализированы подземные воды нижнекаменноугольного водоносного горизонта, питающие озе-

ро, а также непосредственно поверхностные озерные воды.

Химический состав основных компонентов представлен в табл. 2. Из данных таблицы видно, что подземные воды, питающие озеро Усколь, по химическому составу относятся к хлоридно-сульфатному типу с преобладающим натриевым катионом, минерализацией 1,98 г/л и слабощелочным рН.

По химическому составу поверхностные воды озера также относятся к хлоридно-сульфатному типу с преобладающим натриевым катионом. Но их минерализация значительно выше, чем у подземных вод. Поскольку в табл. 2 приведены данные по водам, отобранным в разные годы и периоды различной атмосферной нагрузки, то данные по минерализации варьируют от 17,8 до 33,5 г/л. Для поверхностных вод характерна более щелочная среда, и значения рН зафиксированы на уровне от 8,86 до 9,93. На долю хлорида иона приходится 24–39 мг-экв %, в абсолютных значениях его концентрации меняются от 3 474 до 6 035 мг/л. Количество сульфата иона варьирует от 28 до 55 мг-экв %, что в абсолютных значениях соответствует 4 850–10 765 мг/л. Доля гидрокарбонат иона составляет от 15 до 23 мг-экв %. Среди катионов преобладающим компонентом является иона натрия, его доля составляет 98–99 мг-экв %, что выражается в абсолютных концентрациях от 5 970 до 12 000 мг/л. Доли кальция, магния и калия по сравнению с содержанием натрия незначительны и составляют 1–2 мг-экв %.

Анализ зависимостей основных анионов и катионов позволил выявить закономерность увеличения количества анионов с ростом минерализации. Установлена тенденция к накоплению натрия с ростом солености, для магния наблюдается сложный характер зависимости – до минерализации 20 г/л увеличение с ростом минерализации, а затем происходит стабилизация его содержания, для кальция напротив, характерно уменьшение содержания при повышении минерализации вод (рис. 3).

Анализ микрокомпонентов выявил значительные концентрации в водах брома (максимально до 50 мг/л), лития (значения варьируют от 0,08 до 0,26 мг/л) и стронция (концентрации от 0,13 до 0,53 мг/л).

Обогащение вод озера Усколь макро- и микрокомпонентами происходит в процессе взаимодействия в системе «вода – порода» при непосредственном влиянии процессов испарительного концентрирования. О степени влияния этих процессов можно судить по диаграммам Гиббса (рис. 4) [Gibbs, 1970]. На диаграмму кроме вод также вынесены данные подземных вод Южно-Минусинской котловины нижнекаменноугольного водоносного комплекса.

Согласно положению точек на диаграмме, основное влияние на формирование катионного состава поверхностных и подземных вод оказывают процессы испарительного концентрирования

(рис. 4). Для анализа роли процесса испарения в формировании состава вод принято использовать хлорид-ион, поскольку он обладает свойством накопления в растворе и при данном уровне минерализации не способен к формированию вторичных минералов (рис. 5).

На данном графике видно, что накопление хлорид- и гидрокарбонат-ионов происходит при непосредственном влиянии процессов как испарительно-

го концентрирования, так и взаимодействия воды и озерных осадков.

Положение точек на диаграмме зависимости концентраций сульфат- и гидрокарбонат-ионов свидетельствует об их пропорциональном концентрировании в процессе испарительного концентрирования совместно с хлорид-ионом, что указывает на преобладающее значение данного процесса при формировании вод рассматриваемого озера.

Таблица 2

Химический состав основных компонентов поверхностных вод озера Усколь и подземных вод района, мг/л

Table 2

Chemical composition of the main components of the surface waters of Uskol Lake and ground waters of the region, mg/L

Компонент	Тип вод				
	подземные	поверхностные			
	Обр. X-203	Обр. 1	Обр. 2	Обр. 7	Обр. X-202
pH	7,70	8,86	8,97	9,93	9,50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	345	2 600	2 440	4 886	6 832
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	700	5 210	4 850	10 765	6 617
Cl <sup>-</sup>	298	3 750	3 600	3 471	6 035
Минерализация	1 999	17 710	17 589	26 756	33 582
Ca <sup>2+</sup>	47	20	14	4,48	3
Mg <sup>2+</sup>	4,9	36,6	34,2	15,7	26,0
Na <sup>2+</sup>	600	6 050	5 970	7 560	12 000
K <sup>+</sup>	3,9	9,9	10,0	20,2	48,0
Si	3,19	1,20	1,20	0,58	1,31
F	1,90	—	—	18,70	24,47
Br	16,88	12,79	10,65	15,72	50,00
Li	0,19	0,08	0,09	0,14	0,26
Sr	9,70	0,47	0,53	0,49	0,13
Формула	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 51 Cl <sup>-</sup> 29 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 19 Na <sup>2+</sup> 90	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 41 Cl <sup>-</sup> 40 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 16 Na <sup>2+</sup> 98	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 38 Cl <sup>-</sup> 38 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 15 Na <sup>2+</sup> 99	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 55 Cl <sup>-</sup> 24 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 20 Na <sup>2+</sup> 99	Cl <sup>-</sup> 35 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 28 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 14 Na <sup>2+</sup> 99

Примечание. «—» – данные отсутствуют.

Note. «—» – no data available.

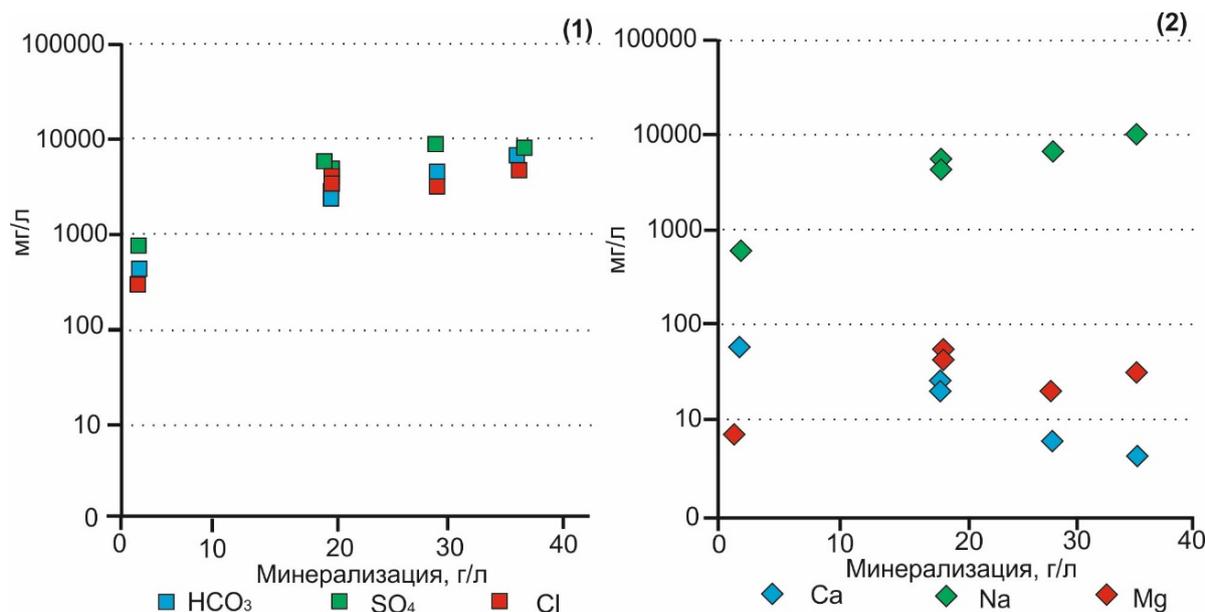


Рис. 3. Зависимость основных анионов (1) и катионов (2) от минерализации вод

Fig. 3. Dependence of main anions (1) and cations (2) on water salinity

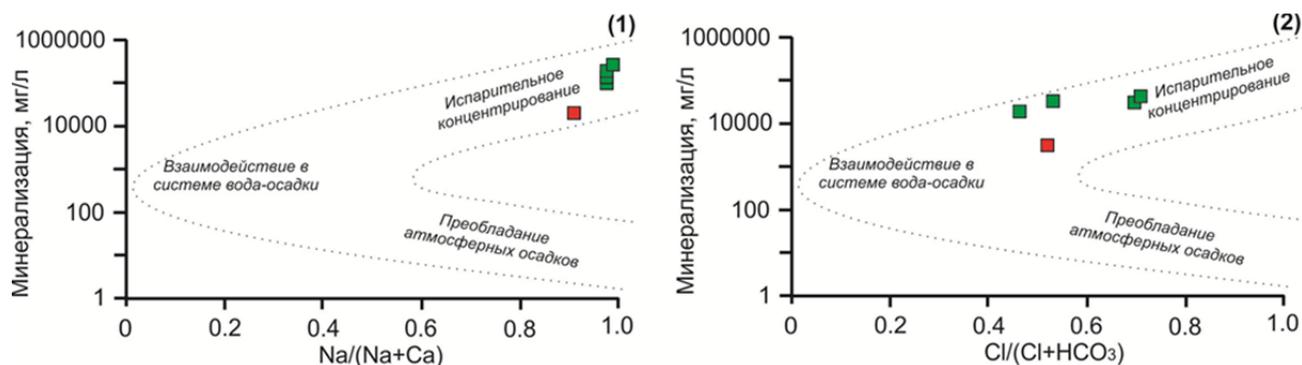


Рис. 4. Зависимость минерализации от  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$  (1) и  $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$  (2)

Красным обозначены пробы подземных вод; зеленым – поверхностных озерных вод

Fig. 4. Mineralization dependence on  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$  (1) and  $\text{Cl}/(\text{Cl}+\text{HCO}_3)$  (2) contents

Red points denote groundwater samples; green points denote surface water samples

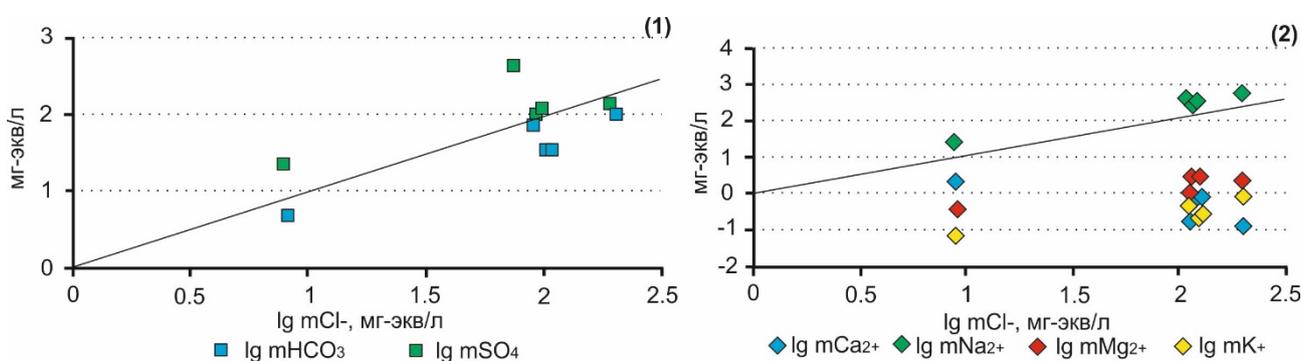


Рис. 5. Зависимости концентраций основных анионов (1) и катионов (2) от концентрации хлорид-иона в водах озера Усколь

Положение точек вдоль линии с наклоном  $45^\circ$  соответствует пропорциональному накоплению элементов, ожидаемому при простом испарении [Драйвер, 1985]

Fig. 5. Dependences of concentrations of the main anions (1) and cations (2) on chloride ion concentration in the Uskol Lake waters

Dots distribution along a  $45^\circ$  line corresponds to proportional accumulation of elements expected from simple evaporation [Driver, 1985]

На диаграмме зависимости основных катионов видно, что ионы натрия накапливаются пропорционально с хлорид-ионом, что возможно преимущественно при процессах испарительного концентрирования. Магний и калий растут существенно медленнее хлорид-иона. Для кальция же характерна даже обратная зависимость от концентраций хлорид-иона. Подобное поведение элементов может говорить об их участии в процессах образования вторичных минералов при испарительном концентрировании.

Для уточнения, а также возможного расширения минеральных видов, полученных методом рентгенофазового анализа, нами были рассчитаны индексы насыщения (SI) озерных вод вторичными минералами. В основу расчетов заложены 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 вторичного минерала для каждого типа вод.

Изученные озерные воды недонасыщены относительно ряда первичных алюмосиликатов (анортита), хлоридов (галита, гидрогалита, сильвина), сульфатов (эпсомита, кизерита, тенардита, ангидрита, мелантерита, ярозита и целестина), вторичных алюмосиликатных минералов (Mg-хлорита) и карбонатов (магнезита, лансфордита, витерита, сидерита, родохрозита, стронцианита), некоторых окислов и гидроокислов (кристобалита, тридимита и халцедона).

Многие из этих минералов (анортит, хлорит и др.) являются породообразующими среды миграции и, соответственно, служат источниками обогащения подземных вод элементами на протяжении всего времени движения (от областей питания до областей разгрузки), их присутствие в осадках маловероятно.

Таблица 3

Степень насыщения различных типов вод озера Усколь к минералам (индексы насыщения)

Table 3

Saturation degrees of various types of Uskol Lake waters in relation to minerals (saturation indexes)

Минерал	Химическая формула минерала	Тип вод				
		подземные Обр. X-203	озерные			
			Обр. 1	Обр. 2	Обр. 7	Обр. X-202
<i>Гидроокислы</i>						
Гётит	FeOOH	5,40	6,00	7,80	12,00	13,00
Лепидокрокит	FeOOH	0,40	0,94	2,80	7,10	7,90
Байерит	Al(OH) <sub>3</sub>	8,60	3,40	3,60	3,20	6,00
Гиббсит	Al(OH) <sub>3</sub>	5,90	0,72	0,92	0,50	3,40
<i>Оксиды</i>						
Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,00	17,00	20,00	29,00	31,00
Кварц	SiO <sub>2</sub>	0,04	-1,20	-1,30	-3,30	-1,80
Кристобалит	SiO <sub>2</sub>	-1,30	-2,60	-2,60	-4,70	-3,10
Тридимит	SiO <sub>2</sub>	-0,92	-2,20	-2,20	-4,30	-2,70
Халцедон	SiO <sub>2</sub>	-0,62	-1,90	-1,90	-4,00	-2,40
<i>Силикаты и алюмосиликаты</i>						
Нонтронит	Fe <sub>1,65</sub> Al <sub>2,33</sub> Si <sub>3,67</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	23,00	5,60	6,00	-2,10	10,00
Fe-Mg монтмориллонит	Fe <sub>0,2924</sub> Mg <sub>2,9</sub> Al <sub>1,6984</sub> Si <sub>3,935</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	7,40	-5,20	-4,60	-12,00	-0,95
Монтмориллонит	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	21,00	5,60	5,70	-3,30	8,60
Монтмориллонит	Ca <sub>0,187</sub> Na <sub>0,0205</sub> K <sub>0,0205</sub> Fe <sub>0,141</sub> Mg <sub>0,336</sub> Al <sub>1,59</sub> Si <sub>3,93</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	15,00	5,00	5,50	-1,30	8,40
К-монтмориллонит	K <sub>0,3</sub> Al <sub>1,9</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	14,00	0,21	0,39	-7,80	3,80
Mg-Fe монтмориллонит	Mg <sub>0,6525</sub> Fe <sub>0,335</sub> Al <sub>1,47</sub> Si <sub>3,82</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	15,00	7,10	8,10	2,80	12,00
Na-Са монтмориллонит	Na <sub>0,27</sub> Ca <sub>0,1</sub> K <sub>0,02</sub> Fe <sub>0,19</sub> Mg <sub>0,22</sub> Al <sub>1,58</sub> Si <sub>3,94</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	16,00	6,10	6,70	0,27	10,00
Са-монтмориллонит	Ca <sub>0,15</sub> Al <sub>1,9</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	22,00	7,70	7,80	-0,95	10,00
Mg-бейделлит	Mg <sub>0,165</sub> Al <sub>2,33</sub> Si <sub>3,67</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	22,00	6,30	6,60	-1,50	11,00
Са-бейделлит	Ca <sub>0,165</sub> Al <sub>2,33</sub> Si <sub>3,67</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	22,00	6,00	6,20	-2,00	9,90
Na-бейделлит	Na <sub>0,33</sub> Al <sub>2,33</sub> Si <sub>3,67</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	24,00	9,40	9,70	2,00	14,00
Mg-хлорит	Mg <sub>6</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	-47,00	-16,00	-14,00	-5,80	-7,70
Иллит	K <sub>0,63</sub> Na <sub>0,017</sub> Ca <sub>0,145</sub> Fe <sub>0,327</sub> Mg <sub>0,349</sub> Al <sub>1,9</sub> Si <sub>3,421</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	21,00	12,00	13,00	9,90	20,00
К-Мгиллит	K <sub>0,6</sub> Mg <sub>0,25</sub> Al <sub>2,3</sub> Si <sub>3,5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	25,00	12,00	12,00	6,50	18,00
Mg-мусковит	KMgAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	1,50	0,67	1,30	-1,80	5,70
К-иллит	K <sub>0,5</sub> Al <sub>2,5</sub> Si <sub>3,5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	28,00	12,00	13,00	5,70	18,00
Анортит	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	-1,70	-11,00	-11,00	-14,00	-7,80
Калиевый полевоы шпат	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7,80	2,20	2,40	-1,30	6,00
Альбит	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,50	-1,70	-1,40	-5,40	1,20
<i>Карбонаты</i>						
Магнезит	MgCO <sub>3</sub>	-3,50	1,60	1,70	1,40	2,30
Лансфордит	MgCO <sub>3</sub> ×5H <sub>2</sub> O	-5,70	-0,64	-0,50	-0,85	0,00
Витерит	BaCO <sub>3</sub>	-5,10	-3,90	-3,50	-4,00	0,43
Арагонит	CaCO <sub>3</sub>	1,70	4,10	3,90	2,70	2,20
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	2,10	4,50	4,30	3,10	2,60
Доломит	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,25	7,70	7,70	6,20	6,50
Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	-1,10	-4,40	-3,10	-4,20	-0,20
Родохрозит	MnCO <sub>3</sub>	-3,90	-1,40	-1,50	-3,90	-1,60
Стронцианит	SrCO <sub>3</sub>	-0,77	2,00	2,40	3,00	6,70
<i>Сульфаты</i>						
Эпсомит	MgSO <sub>4</sub> ×7H <sub>2</sub> O	-9,70	-8,00	-8,00	-9,40	-9,20
Кизерит	MgSO <sub>4</sub> ×H <sub>2</sub> O	-67,00	-65,00	-65,00	-66,00	-66,00
Тенардит	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-58,00	-53,00	-53,00	-51,00	-52,00
Барит	BaSO <sub>4</sub>	3,70	1,70	1,80	0,29	4,00
Ангидрит	CaSO <sub>4</sub>	-3,90	-4,70	-5,20	-7,30	-8,50
Гипс	CaSO <sub>4</sub> ×2H <sub>2</sub> O	2,80	2,00	1,50	-0,63	-1,80
Мелантерит	FeSO <sub>4</sub> ×7H <sub>2</sub> O	-5,50	-12,00	-11,00	-13,00	-9,90
Ярозит	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	-24,00	-28,00	-23,00	-16,00	-10,00
Целестин	SrSO <sub>4</sub>	-0,34	-0,79	-0,70	-1,10	1,90
<i>Галюиды</i>						
Галит	NaCl	-12,00	-7,90	-8,00	-7,70	-7,00
Гидрогалит	NaCl×2H <sub>2</sub> O	-12,00	-7,70	-7,70	-7,40	-6,70
Сильвин	KCl	-16,00	-13,00	-13,00	-12,00	-11,00

Положительные индексы насыщения указывают на равновесность подземных вод с сульфатами (баритом, гипсом), карбонатами (арагонитом, кальцитом, доломитом), оксидами (гематитом, кристобалитом, тридимитом, халцедоном), алюмосиликатами (нонтронитом, монтмориллонитами с различными преобладающими катионами, бейделитом, иллитом и калиевым полевым шпатом).

Согласно значениям индексов неравновесности, воды самого озера, по сравнению с подземными водами, более равновесны еще и с некоторыми карбонатами (арагонитом, кальцитом, магнезитом, доломитом и стронцианитом), сульфатами (баритом, иногда гипсом), алюмосиликатами (монтмориллонитом, бейделлитом, иллитом).

Все упомянутые минералы способны к новообразованию из вод и выводят из них соответствующие элементы. Стоит заметить, что галоиды не равновесны ни с одним типом изучаемых вод, что позволяет предполагать их образование только в процессе испарительного концентрирования.

Проведенные физико-химические расчеты хорошо согласуются с минералогическими исследованиями и подтверждают гидрогенный механизм осадкообразования. Соответственно, в составе минеральных осадков мы видим присутствие этих минералов в количествах и соотношениях, отражающих конкретный химический состав водной среды, из которой они формируются.

Полученные физико-химические расчеты могут использоваться в качестве основы для дальнейших исследований процессов формирования озер и их осадков.

#### ***Минеральные ассоциации и закономерности минерального накопления***

На основании выявленного набора минеральных фаз можно выделить два типа генетических ассоциаций: терригенную и гидрогенную. Терригенная ассоциация включает в себя нерастворимые в воде минералы: кварц, полевые шпаты, анальцим и глинистые минералы (натриевый и кальций-магниевого монтмориллониты и иллит). Гидрогенная ассоциация объединяет в себя минеральные виды, которые образуются за счет процессов испарительного концентрирования: кальцит, доломит, гипс, галит.

Минералогический состав терригенной ассоциации хорошо согласуется с составом подстилающих горных пород. Полевые шпаты, кварц, анальцим – продукты разрушения коренных пород основания озера. Глинистые минералы – типичные эпигенетические образования, которые сформировались в озерных условиях в результате воздействия на полевые шпаты поверхностных и подземных вод. Ранее нами было подтверждено [Хрущева и др., 2020;

Khrushcheva, Nebera, 2019], что глинистые минералы в осадках озера Усколь образовались вследствие разрушения полевых шпатов и анальцима по следующей схеме: полевые шпаты + анальцим → натриевый и кальций-магниевого монтмориллониты → иллит.

Минеральный состав гидрогенной ассоциации представлен минералами с разной степенью растворимости: кальцитом, доломитом, гипсом и галитом. Стоит отметить, что кальцит был отнесен нами к гидрогенной ассоциации в связи с полученными значениями индекса насыщения вод минеральными фазами, но необходимо дать уточнение, что в соответствии с составом подстилающих горных пород кальцит также может иметь и обломочное происхождение.

При выявлении закономерностей распределения минеральных видов в вертикальном разрезе и по латерали (в соответствии с профилем отбора проб), установлено достаточно равномерное распределение минеральных видов. Стоит отметить, что наблюдается тенденция к накоплению в верхних частях разрезов гипса и галита, а также закономерность в формировании глинистых минералов, а именно в интервале 30–100 см отмечается увеличение доли иллита и кальций-магниевого монтмориллонита при соответственном уменьшении доли натриевого монтмориллонита. Также в точке 6.4, расположенной в 350 м от береговой линии, установлены повышенные концентрации карбонатов (преимущественно кальцита), среднее значение кальцита 9 % (за исключением значений в точке 6.4) против 46 % в точке 6.4.

Порядок выпадения гидрогенных минералов из вод озера – процесс сложный, который обычно регулируется процессами испарительного концентрирования, а также балансом относительной влажности.

Согласно схеме эволюции рассола [Eugster, Hardie, 1978], осаждение водорастворимых минералов начинается с карбоната кальция – кальцита. При его осаждении озерная вода становится более концентрированной, необходимо учитывать влияние иона магния, который способствует образованию доломита. Садка доломита осуществляется, только если в растворе соотношение магния к кальцию повышается, что, как правило, невозможно без осаждения сульфатных минералов. При постоянном воздействии подземных и поверхностных вод на подстилающие горные породы в результате гидролиза алюмосиликатов в воды поступают ионы натрия, кальция и магния, что в дальнейшем приводит к образованию сульфатных солей. Инструментальными методами, а также с помощью физико-химических расчетов в осадках озера Усколь диагностированы сульфаты – гипс, тенардит. Завершается процесс минералообразования увеличением содержания хлорид-иона в растворе, что влечет за собой садку галита. Таким образом, в общем виде порядок осаждения

гидрогенных минералов можно представить в следующем виде: анионы  $\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ , для катионов  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^{2+}$ .

Полученные данные хорошо коррелируют с выводами, полученными для эфемерного озера Талое [Хрущева и др., 2018; Khrushcheva et al., 2021], которое расположено в непосредственной близости к озеру Усколь, а также с другими солеными озерами мира (Лоп-Нур (Китай) [Chao et al., 2009], Набксабха (Египет) [Attia, 2013], Мейган (Иран) [Abdi et al., 2018] и др.).

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Прецизионными методами в озерных осадках озера Усколь установлены минералы: оксиды – кварц; алюмосиликаты – хлорит, иллит, смешанослойные образования иллит-монтмориллонитового ряда, альбит, калиевый полевой шпат (санидин); карбонаты – кальцит, доломит; сульфаты – гипс, тенардит; галоиды – галит.

2. По генетическому признаку полученные минеральные виды разделены на две ассоциации: терригенную и гидрогенную. Терригенная включает в себя минералы, нерастворимые в воде и образовавшиеся в результате разрушения коренных горных пород. Гидрогенная ассоциация объединяет водорастворимые минералы, образовавшиеся в процессе

испарительного концентрирования вод и воздействия подземных вод на осадки.

3. Установлена вертикальная зональность в распределении минеральных видов. В верхних частях разреза зафиксировано повышенное содержание водорастворимых минералов (сульфатов и галоидов), а также выявлена закономерность распределения глинистых минералов по глубине.

4. Установлен порядок осаждения минералов из вод озера Усколь. Он выражается в следующем виде: для катионов –  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^{2+}$ , для анионов  $\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ .

5. Физико-химические расчеты показывают равновесие озерных вод с оксидами, алюмосиликатами, карбонатами и сульфатами. На формирование минералов значительное влияние оказывает испарительное концентрирование совместно с процессами выветривания коренных горных пород.

Таким образом, полученные результаты могут стать основой для дальнейшего физико-химического моделирования процессов, происходящих в соленых озерах, с целью понимания их условий формирования.

*Исследование инициировано госзаказом Министерства науки и высшего образования РФ № 0721-2020-0041, аналитические работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90056, физико-химические расчеты проведены в рамках Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.*

### ЛИТЕРАТУРА

- Базарова В.Б., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Орлова Л.А.** Особенности озерного осадконакопления в степной зоне Юго-Восточного Забайкалья в голоцене (на примере отложений оз. Зун-Соктууй) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52 (3). С. 426–438.
- Борзенко С.В.** Основные условия формирования химического состава вод соленых и солоноватых озер Восточного Забайкалья // Геохимия. 2020. Т. 65, № 12. С. 1212–1230.
- Букаты М.Б.** Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305, № 6. С. 348–365.
- Валяшко М.Г.** Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. М. : Изд-во МГУ, 1962. 398 с.
- Володина И.В., Дутова Е.М., Покровский Д.С., Радюк И.В.** Природно-техногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2015. № 3. С. 58–72.
- Гаськова О.Л., Букаты М.Б., Широносова Г.П., Кабанник В.Г.** Термодинамическая модель сорбции двух валентных тяжелых металлов кальцитов в природно-техногенных обстановках // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 2. С. 115–126.
- Драйвер Дж.** Геохимия природных вод. М. : Мир, 1985. 440 с.
- Дутова Е.М., Букаты М.Б., Неволько А.И., Покровский Д.С., Шварцев С.Л.** Гидрогенное концентрирование золота в аллювиальных россыпях Егорьевского района (Салаир) // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 3. С. 364–376.
- Котельников А.Д., Макаренко Н.А., Дербан А.Г., Котельникова И.В., Филимонов А.Н., Сатаев Ф.Р., Третьяк А.И., Кренида О.А., Козулина Т.В.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N-46-XIX (Усть-Бюрь). Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. 330 с.
- Покровский Д.С., Дутова Е.М., Рогов Г.М., Володина И.В., Тайлашев А.С., Лычагин Д.В.** Минеральные новообразования на водозаборах Томской области / под ред. Д.С. Покровского. Томск : НТЛ, 2002. 176 с.
- Рентгенография** основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. Л. : Недра, 1983. 359 с.
- Рогозин Д.Ю.** Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. Красноярск : Изд-во ИФСОРАН, 2018. 241 с.
- Солотчина Э.П., Склярлов Е.В., Солотчин П.А., Вологина Е.Г., Столповская В.Н., Склярлова О.А., Ухова Н.Н.** Реконструкция климата голоцена на основе карбонатной осадочной летописи малого соленого озера Верхнее Белое (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53 (12). С. 1756–1775.
- Ходяков Г.С., Юдкин Ю.П.** Седиментационный анализ высокодисперсных систем. М. : Химия, 1981. 192 с.

- Хрущева М.О., Тишин П.А., Архипов А.Л., Чернышов А.И.** Минералогия современных эвапоритов урочища Талое озеро (Республика Хакасия) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 11. С. 48–53.
- Хрущева М.О., Тишин П.А., Небера Т.С., Чернышов А.И., Архипов А.Л.** Генетическая информативность глинистых минералов осадков озера Усколь (Республика Хакасия) // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149, № 5. С. 99–111.
- Чарыкова М.В., Чарыков Н.А.** Термодинамическое моделирование процессов эвапоритовой седиментации. СПб. : Наука, 2003. 261 с.
- Abdi L., Rahimpour-Bonab H., Mirmohammad-Makki M., Probst J., Langeroudi S.R.** Sedimentology, mineralogy, and geochemistry of the Late Quaternary Meyghan Playa sediments, NE Arak, Iran: palaeoclimate implications // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. V. 11. 589 p.
- Attia O.E.** Sedimentological characteristics and geochemical evolution of Nabqsabkha, Gulf of Aqaba, Sinai, Egypt // *Arab. J. Geosci.* 2013. V. 6. P. 2045–2059.
- Bailey S.W., Brindley G.W., Fanning D.S. et al.** Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983 // *Clay and Clay Minerals*. 1984. V. 32. P. 239–240.
- Balobanenko A.A., L'gotin V., Dutova E.M., Pokrovsky D.S., Nikitenkov A.N., Raduk I.V.** Geochemical groundwater peculiarities of Paleogene sediments in S-E Western Siberia artesian basin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 43 (1), No. 012030. doi: org/10.1088/1755-1315/43/1/012030.
- Banks D., Parnachev V.P., Frengstad B., Holden W., Karnachuk O.V., Vedernikov A.A.** The hydrogeochemistry of the Altai, Askizskii, Beiskii, Bogradskii, Shirinskii, Tashtipskii and Ust' Abakanskii regions, Republic of Khakassia, Southern Siberia, Russian Federation // *NGU*. 2001. 106 p.
- 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. V. 19, No. 12. P. 1905–1926.
- Banks D., Parnachev V.P., Frengstad B., Karnachuk O.V.** Hydrogeochemical Data Report: the Sampling of Selected Locations in the Republic of Khakassia, Kuznetsk Alatau Oblast' and Kemerovo Oblast', Southern Siberia, Russian Federation // *Geological Survey of Norway*. 2008. 103 p.
- Borzenko S.V.** Principal Parameters Controlling Water Composition in Saline and Brackish Lakes in Eastern Transbaikalia // *Geochemistry International*. 2020. V. 58, No. 12. P. 1356–1373.
- Borzenko S.V., Shvartsev S.L.** Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia // *Applied geochemical*. 2019. V. 103. P. 72–84.
- Chao L., Zicheng P., Dong Y., Weiguo L., Zhaofeng Z., Jianfeng H., Chenlin C.** A lacustrine record from Lop Nur, Xinjiang, China: implications for palaeoclimate change during Late Pleistocene // *Asian Earth Science*. 2009. V. 34. P. 38–45.
- Dutova E.M.** Geochemistry of fresh ground water in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // *Applied Geochemistry*. 2020. V. 120, No. 104673. doi: 10.1016/j.apgeochem.2020.104673.
- Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K.** The HydroGeo Software Package and Its Usage // *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 98, No. 04005. doi: 10.1051/e3sconf/20199804005.
- Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Pokrovskiy V.D., Banks D., Frengstad B.S., Parnachev V.P.** Modelling of the dissolution and reprecipitation of uranium under oxidizing conditions in the zone of shallow groundwater circulation // *Environ. Radioact.* 2017. V. 178–179. P. 63–76.
- Dutova E., Vologdina I., Pokrovsky D., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V.** Hydrogenous mineral neof ormations in Tomsk water intake facility from underground sources // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016. V. 33, No. 1. 012017. doi: 10.1088/1755-1315/33/1/012017.
- Eugster H.P., Hardie L.A.** Saline Lakes // *Geology and Physics*. Springer Verlag, 1978. P. 237–293.
- Gibbs R.J.** Mechanisms controlling world water chemistry // *Science*. 1970. V. 170. P. 1088–1090.
- Kamenov G.D.** ICP-MS and Material Analysis // *The Encyclopedia of Archaeological Sciences* / ed. by Sandra L. López Varela. John Wiley & Sons, Inc., 2018. 4 p. doi: 10.1002/9781119188230.
- 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. doi: 10.1088/1755-1315/43/1/012032.
- 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. V. 11, No. 522. doi: 10.3390/min11050522.
- Khrushcheva M.O., Nebera T.S.** Swelling clay minerals of bottom sediments of Uskol lake (Republic of Khakassia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 319, No. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/319/1/012010.
- Kolpakova M., Gaskova O., Borzenko S.** Surface and groundwaters impact on geochemical stability of Saline lakes in semi-arid landscapes (Kulunda lowland, south of western Siberia, Russia) // *SGEM*. 2020. V. 3, No. 1. P. 321–327.
- Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Karpov, A.V., Vladimirov A.G., Krivonogov S.K.** Saline lakes of Northern Kazakhstan: Geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments // *Applied Geochemistry*. 2019. V. 107. P. 8–18.
- Parnachev V.P., Banks D., Berezovsky A.Y., Garbe-Schonberg D.** Hydrochemical evolution of Na-SO<sub>4</sub>-Cl ground waters in cold, semi-arid region of southern Siberia // *Hydrogeology*. 1999. V. 7. P. 549–560.
- Parnachev V.P., Degermendzhy A.G.** Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakassia, Southern Siberia // *Aquatic ecology*. 2002. V. 36. P. 107–122.
- Pokrovskiy V., Pokrovskiy D., Dutova E., Nikitenkov A.** The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using gis-technology // *SGEM*. 2014. V. 2, No. 1. P. 935–941.
- Richoz S., Baldermann A., Frauwallner A., Harzhauser M., Daxner-Höck G., Klammer D., Piller W.E.** Geochemistry and mineralogy of the Oligo-Miocene sediments of the valley of lakes, Mongolia // *Paleobiodivers Paleoenviron*. 2017. V. 97. P. 233–258.
- Roop H.A., Dunbar G.B., Levy R., Vandergoes M.J., Forrest A.L., Walker S.L., Purdie J., Upton P., Whinney J.** Seasonal controls on sediment transport and deposition in Lake Ohau, South Island, New Zealand: implications for a high-resolution Holocene paleoclimate reconstruction // *Sedimentology*. 2015. V. 62. P. 826–844.
- Shvartsev S.L., Dutova E.M.** Hydrochemistry and mobilization of gold in the hypergenesis zone (Kuznetsk Alatau, Russia) // *Geol. Ore Deposits*. 2001. V. 43 (3). P. 224–233.

**Sinha R., Raymahashay B.C.** Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India // *Sediment Geology*. 2004. V. 166. P. 59–71.

**Strakhovenko V., Subetto D., Ovdina E., Danilenko I., Belkina N., Efremenko N., Maslov A.** Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. V. 46, No. 3. P. 443–455.

**Warren J.** *Evaporates: sediment, resources and hydrocarbon*. Berlin : Springer, 2006. 1035 p.

**Zamana L.V., Borzenko S.V.** Hydrochemical Regime of Salt Lakes of South-Eastern Transbaikalia // *Geography and Natural Resources*. 2010. V. 4. P. 100–107.

#### Авторы:

**Хрущева Мария Олеговна**, аспирант, кафедра петрографии, геолого-географический факультет; инженер-исследователь ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: masha2904@mail.ru

**Дутова Екатерина Матвеевна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, отделение геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра природопользования, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: dutova@trpu.ru

**Тишин Платон Алексеевич**, кандидат геолого-минералогических наук, декан геолого-географического факультета, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tishin\_pa@mail.ru

**Никитенков Алексей Николаевич**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, отделение геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: corestone@mail.ru

**Чернышов Алексей Иванович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: aich@ggf.tsu.ru

**Архипов Александр Леонидович**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра динамической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: alexlarhipov@gmail.com

*Geosphere Research*, 2021, 2, 29–43. DOI: 10.17223/25421379/19/3

M.O. Khrushcheva<sup>1</sup>, E.M. Dutova<sup>1,2</sup>, P.A. Tishin<sup>1</sup>, A.N. Nikitenkov<sup>2</sup>, A.I. Chernyshov<sup>1</sup>, A.L. Arkhipov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

### MINERALOGICAL CHARACTERISTICS OF USKOL LAKE SEDIMENTS (REPUBLIC OF KHAKASSIA)

This is a detailed study of mineralogical and geochemical characteristics of Uskol Lake sediments and waters. Uskol Lake exists in semiarid conditions and belongs to South-Minusinsk salt lakes group, Southern Siberia of Russia. It consists of three reservoirs, two of which are intermittent.

Using X-ray diffraction analysis allowed determination of mineral species, among which are oxides (quartz), aluminosilicates (illite, Na- and Ca-Mg-montmorillonite, analcime, albite and sanidine), carbonates (calcite, dolomite), sulfates (gypsum, thenardite) and halides (halite). According to their origin, the minerals can be divided into two associations: terrigenous and hydrogenous. Terrigenous association includes non-soluble minerals and corresponds well to the bed rocks composition. Hydrogenous association includes minerals, which form due to evaporation processes.

While studying the regularities of vertical and lateral distribution of mineral species it was stated that mostly they are evenly distributed. However, there is a tendency of gypsum and halite accumulation in the upper parts of cross sections; also it was noted that at the depths of 30–100 cm there is illite and Ca-Mg montmorillonite contents increase in relation to Na-montmorillonite content. Carbonate (calcite, mostly) contents increase at about 200 m from lake shore. The order of hydrogenous minerals sedimentation from chloride-sulfate waters of the Lake Uskol was determined. In general, minerals are precipitating as following:  $\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$  for anions,  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^{2+}$  for cations.

Obtained results are confirmed and enhances by physicochemical calculations, which show balance between lake waters and oxides, aluminosilicates, carbonates and sulfates. It is stated that evaporation processes as well as rocks weathering greatly influence the mineral formation.

**Keywords:** South Minusinsk Basin, X-ray diffractometry, salt lakes, mineral formation, hydrogenic minerals

#### References

Bazarova V.B., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Orlova L.A. Holocene lake sedimentation in the steppe zone of southeastern Transbaikalia (exemplified by the Lake Zun-Soktui) // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. V. 52. No 3, pp. 333–342.

Borzenko S.V. Principal parameters controlling water composition in saline and Brackish Lakes in Eastern Transbaikalia // *Geochemistry International*. 2020. V. 65, No 12, pp. 1356–1373.

Bukaty M.B. *Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya resheniya gidrogeologicheskikh zadach* [Development of software for solving hydrogeological problems] // *Geology Prospect. Explore. mineral Resources Siberia*. 2002. V. 305. No 6. pp. 348–365. In Russian.

Valyashko M.G. *Geokhimicheskiye zakonomernosti formirovaniya mestorozhdeniy kaliynykh soley* [Geochemical patterns of the formation of deposits of potassium salts]. Moscow: Publishing house of Moscow State University. 1962. 398 p. In Russian.

- Vologdina I.V., Dutova E.M., Pokrovsky D.S., Pokrovsky V.D., Radyuk I.V. *Prirodno-tekhnogennyye mineral'nyye novoobrazovaniya na vodozaborakh Tomskoy oblasti* [Natural and technogenic mineral new growths at water intakes in Tomsk region] // Vestnik SPbSU. Earth Sciences. 2015. V. 3. pp. 58–72. In Russian.
- Gaskova O.L., Shironosova G.P., Kabannik V.G., Bukaty M.B. Thermodynamic model for sorption of bivalent heavy metals on calcite in natural-technogenic environments // Russian Geology and Geophysics. 2009. V. 50. No 2. pp. 87–95.
- Drever I.D. *Geokhimiya prirodnykh vod* [The geochemistry of natural waters]. Prentice-hall. 1988. 440 p.
- Dutova E.M., Bukaty M.B., Nevol'ko A.I., Pokrovsky D.S., Shvartsev S.L. Hydrogenic concentration of gold in alluvial placers of the Egor'evsk area (Salair) // Russian Geology and Geophysics. 2006. V. 47. No 3. pp. 364–376.
- Kotelnikov A.D., Makarenko N.A., Derban A.G., Kotelnikova I.V., Filimonov A.N., Sataev F.R., Tretyak A.I., Krenida O.A., Kozulina T.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1 : 200 000. Izdaniye vtoroye. Seriya Minusinskaya. List N-46-XIX (Ust'-Byur')*. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation on a scale of 1: 200 000. Second edition. Minusinskaya series. Sheet N-46-XIX (Ust'-Byur). Explanatory note]. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. 2018. 330 p. In Russian.
- Pokrovsky D.S., Dutova E.M., Rogov G.M. Vologdina I.V., Taylashev A.S. *Mineral'nyye novoobrazovaniya na vodozaborakh Tomskoy oblasti* [Mineral Neocrystallizations at Water Intake Facilities of the Tomsk region] / edited by Pokrovsky D.S. Tomsk: NTL Publishing House. 2002. 176 p. In Russian.
- Rentgenografiya osnovnykh tipov porodoobrazuyushchikh mineralov (sloistyye i karkasnyye silikaty)* [X-ray diffraction of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates)] / Ed. V.A. Frank-Kamenetsky. Leningrad: Nedra. Leningrad branch, 1983. 359 p. In Russian.
- Rogozin D.Yu. *Meromikticheskiye ozera Severo-Minusinskoy kotloviny: zakonmernosti stratifikatsii i ekologiya fototrofnyykh sernykh bakteriy* [Meromictic lakes of the North Minusinsk depression: patterns of stratification and ecology of phototrophic sulfur bacteria]. Krasnoyarsk: Publishing House: IF SB RAS. 2018. 241 p. In Russian.
- Solotchina E.P., Sklyarov E.V., Solotchik P.A., Vologina E.G., Stolpovskaya V.N., Sklyarova O.A., Ukhova N.N. Reconstruction of the Holocene climate based on a carbonate sedimentary record from shallow saline Lake Verkhnee Beloe (Western Transbaikalia) // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53, No 12, pp. 1351–1365
- Khodakov G S., Yudkin, Yu. P. *Sedimentatsionnyy analiz vysokodispersnykh sistem* [Sedimentation analysis of highly dispersed systems]. Moscow: Khimiya, 1981. 192 p. In Russian.
- Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Arkhipov A.L. Chernyshov A.I. *Mineralogiya sovremennykh evaporitov urochishcha Taloye ozero (Respublika Khakasiya)* [Mineralogy of modern evaporites of the Thaloe Lake tract (Republic of Khakassia)] // Bulletin of the IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018. No 11. pp. 48–53. In Russian.
- Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Nebera T.S., Chernyshov A.I., Arkhipov A.L. *Geneticheskaya informativnost' glinistykh mineralov osadkov ozera Uskol' (Respublika Khakasiya)* [Genetic information content of clay minerals in sediments of Lake Uskol (Republic of Khakassia)] // *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Notes of the Russian Mineralogical Society]. 2020. No 5. pp. 99–111. In Russian.
- Charykova M.V., Charykov N.A. *Termodinamicheskoye modelirovaniye protsessov evaporitovoy sedimentatsii* [Thermodynamic modeling of evaporite sedimentation processes]. St. Petersburg: Science. 200. 261 p. In Russian.
- Abdi L., Rahimpour-Bonab H., Mirmohammad-Makki M., Probst J., Langeroudi S.R. Sedimentology, mineralogy, and geochemistry of the Late Quaternary Meyghan Playa sediments, NE Arak, Iran: palaeoclimate implications // Arabian Journal of Geosciences. 2018. V. 11. 589 p.
- Attia O.E. Sedimentological characteristics and geochemical evolution of Nabqsbkha, Gulf of Aqaba, Sinai, Egypt // Arab J Geosci. 2013. V. 6. pp. 2045–2059.
- Bailey S.W. Brindley G.W.; Fanning D.S. et al. Report of the Clay Minerals Society Nomenclature Committee for 1982 and 1983 // Clay and Clay minerals. 1984. V. 32. pp. 239–240.
- Balobanenko A.A., L'gotin V., Dutova E.M., Pokrovsky D.S., Nikitenkov A.N., Raduk I.V. Geochemical groundwater peculiarities of Paleogene sediments in S-E Western Siberia artesian basin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 43(1). No. 012030. DOI.org/10.1088/1755-1315/43/1/012030.
- Banks D., Parnachev V.P., Frengstad B., Holden W., Karnachuk O.V., Vedernikov A.A. The hydrogeochemistry of the Altaiskii, Askizskii, Beiskii, Bogradskii, Shirinskii, Tashtipskii and Ust' Abakanskii regions, Republic of Khakassia, Southern Siberia, Russian Federation // NGU. 2001. 106 p.
- 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. V. 19. No 12. pp. 1905–1926.
- Banks, D., Parnachev, V.P., Frengstad, B., Karnachuk, O.V. Hydrogeochemical Data Report: the Sampling of Selected Locations in the Republic of Khakassia, Kuznetsk Alatau Oblast' and Kemerovo Oblast', Southern Siberia. Russian Federation // Geological Survey of Norway. 2008. 103 p.
- Borzenko S.V. Principal Parameters Controlling Water Composition in Saline and Brackish Lakes in Eastern Transbaikalia // Geochemistry International. 2020. V. 58. No 12, pp. 1356–1373.
- Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia // Applied geochemical. 2019. V. 103. pp. 72–84.
- Chao L., Zicheng P., Dong Y., Weiguo L., Zhaofeng Z., Jianfeng H., Chenlin C. A lacustrine record from Lop Nur, Xinjiang, China: implications for palaeoclimate change during Late Pleistocene // Asian Earth Science. 2009. V. 34. pp. 38–45.
- Dutova E.M. Geochemistry of fresh ground water in the Altai-Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. V. 120. no. 104673. DOI:10.1016/j.apgeochem.2020.104673.
- Dutova E., Nikitenkov A., Kuzevanov K. The HydroGeo Software Package and Its Usage // E3S Web of Conferences. 2019. V. 98. no. 04005. DOI.org/10.1051/e3sconf/20199804005.
- Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Pokrovskiy V.D., Banks D., Frengstad B.S., Parnachev V.P. Modelling of the dissolution and reprecipitation of uranium under oxidizing conditions in the zone of shallow groundwater circulation // Environ. Radioact. 2017. V. 178–179. pp. 63–76.
- Dutova E., Vologdina I., Pokrovsky D., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from underground sources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33. N. no. 012017. DOI.org/10.1088/1755-1315/33/1/012017.

- Eugster H.P., Hardie L.A. Saline Lakes // *Geology and Physics*. Springer Verlag. 1978. pp. 237–293.
- Gibbs R.J. Mechanisms controlling world water chemistry // *Science*. 1970. V. 170. pp. 1088–1090.
- Kamenov G.D. ICP-MS and Material Analysis, in “The Encyclopedia of Archaeological Sciences”, (Ed. Sandra L. López Varela), John Wiley & Sons, Inc. 2018. 4 p. DOI: 10.1002/9781119188230.
- 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. DOI:10.1088/1755-1315/43/1/012032.
- 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. V. 11. No 522. doi.org/10.3390/min11050522.
- Khrushcheva M.O., Nebera T.S. Swelling clay minerals of bottom sediments of Uskol lake (Republic of Khakassia) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 319. n. 1. 012010. DOI:10.1088/1755-1315/319/1/012010.
- Kolpakova M., Gaskova O., Borzenko S. Surface and groundwaters impact on geochemical stability of Saline lakes in semi-arid landscapes (Kulunda lowland, south of western Siberia, Russia) // *SGEM*. 2020. V. 3. No 1. pp. 321–327.
- Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Karpov A.V., Vladimirov A.G., Krivonogov S.K. Saline lakes of Northern Kazakhstan: Geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments // *Applied Geochemistry*. 2019. V. 107. pp. 8–18.
- Parnachev V.P., Banks D., Berezovsky A.Y., Garbe-Schonberg D. Hydrochemical evolution of Na-SO<sub>4</sub>-Cl ground waters in cold, semi-arid region of southern Siberia // *Hydrogeology*. 1999. V. 7. pp. 549–560.
- Parnachev V.P., Degermendzhy A.G. Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakassia, Southern Siberia // *Aquatic ecology*. 2002. V. 36. pp. 107–122.
- Pokrovskiy V., Pokrovskiy D., Dutova E., Nikitenkov A. The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using gis-technology // *SGEM*. 2014. V. 2. No 1. pp. 935–941.
- Richoz S., Baldermann A., Frauwallner A., Harzhauser M., Daxner-Höck G., Klammer D., Piller W.E. Geochemistry and mineralogy of the Oligo-Miocene sediments of the valley of lakes, Mongolia // *Paleobiodivers Paleoenviro*. 2017. V. 97. pp. 233–258.
- Roop H.A., Dunbar G.B., Levy R., Vandergoes M.J., Forrest A.L., Walker S.L., Purdie J., Upton P., Whinney J. Seasonal controls on sediment transport and deposition in Lake Ohau, South Island, New Zealand: implications for a high-resolution Holocene paleoclimate reconstruction // *Sedimentology*. 2015. V. 62. pp. 826–844.
- Shvartsev S.L., Dutova E.M. Hydrochemistry and mobilization of gold in the hypergenesis zone (Kuznetsk Alatau, Russia) // *Geol. Ore Deposits*. 2001. V. 43 (3). pp. 224–233.
- Sinha R., Raymahashay B.C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajestan, India // *Sediment Geology*. 2004. V. 166. pp. 59–71.
- Strakhovenko V., Subetto D., Ovdina E., Danilenko I., Belkina N., Efremenko N., Maslov A. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. V. 46. n. 3. pp. 443–455.
- Warren J. *Evaporates: sediment, resources and hydrocarbon*. Springer, Berlin. 2006. p 1035.
- Zamana L.V., Borzenko S.V. Hydrochemical Regime of Salt Lakes of South-Eastern Transbaikalia // *Geography and Natural Resources*. 2010. V. 4. pp. 100–107.

**Author's:**

**Khrushcheva Maria O.**, Postgraduate Student, Department of Petrography, Faculty of Geology and Geography; Research Engineer, Center for Collective Use “Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems”, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: masha2904@mail.ru

**Dutova Ekaterina M.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Department for Geology, School of Earth Sciences and Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Department of Nature Management, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: dutova@tpu.ru

**Tishin Platon A.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Dean of Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tishin\_pa@mail.ru

**Nikitenkov Alexey N.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department for Geology, School of Earth Sciences and Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: corestone@mail.ru

**Chernyshov Alexey I.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor, Head of the Department of Petrography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: aich@ggf.tsu.ru

**Arkhipov Alexander L.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Dynamical Geology, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: alexlarhipov@gmail.com