
**МИНЕРАЛЫ
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

**ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ
ОСАДКОВ ОЗЕРА УСКОЛЬ (РЕСПУБЛИКА ХАКАСИЯ)**

© 2020 г. д. чл. М. О. Хрущева¹, *, П. А. Тишин¹, д. чл. Т. С. Небера¹,
А. И. Чернышов¹, А. Л. Архипов¹

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия*

**e-mail: masha2904@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принята к публикации 17.06.2020 г.

В работе детально рассмотрена минералогия глинистых компонентов соленых озер Южно-Минусинской котловины на примере осадков озера Усколь. Изучение глинистых минералов проводилось с целью выявления климатических и гидрохимических особенностей осадкообразования. На основе моделирования дифракционных профилей глинистых минералов с использованием функции Пирсона VII установлено, что глинистые минералы представлены кальций-магниевой и натриевой разновидностями монтмориллонита и иллитом. Количественные вариации в содержании глинистых фаз наблюдаются в зависимости от глубины отбора. Фиксируется тенденция к увеличению содержания иллита и кальций-магниевого монтмориллонита вниз по разрезу, что связывается с повышением концентрации K^+ и Mg^{2+} . По установленной минеральной ассоциации глинистых компонентов можно предположить, что осадконакопление в течение последних 500 лет происходило в условиях криоаридного климата.

Ключевые слова: глинистые минералы, натрийсодержащий монтмориллонит, смешанослойные образования, рентгенофазовый анализ, озеро Усколь

DOI: 10.31857/S0869605520050032

Глинистые минералы – одни из наиболее распространенных и разнообразных породообразующих минералов верхней оболочки Земли. По данным разных авторов (Акульшина, 1976; Дриц, Коссовская, 1990, 1991; Солотчина, 2009), они составляют 50–70% от общего состава пород осадочного чехла континентов.

Литература по глинистым минералам достаточно обширна, и ее количество постепенно увеличивается в силу постоянного развития и усовершенствования методов анализа. Глинистые минералы являются весьма сложными для изучения образованиями из-за слоистой структуры и нахождения в природе в дисперсном агрегатном состоянии. Для их исследования необходимо современное высокоточное оборудование и новое программное обеспечение для обработки данных экспериментов, а также моделирования дифракционных спектров. Не ослабевает интерес исследователей к использованию глинистых минералов в качестве индикаторов характера осадконакопления в различных геологических условиях, о чем свидетельствуют многочисленные публикации последних лет (Warren, 2006; Abdullayev, Leroy, 2018; Guo et al., 2019; Wang et al., 2019; Dian-to et al., 2019; Srivastava et al., 2020; Sousa et al., 2020; Chen et al., 2020).

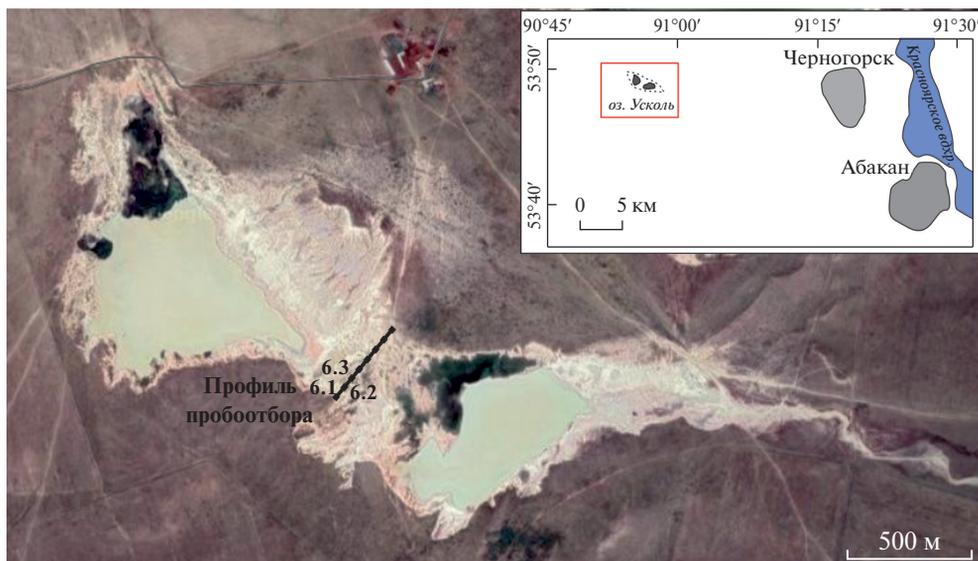


Рис. 1. Карта-схема территориального расположения озера Ускуль с профилем отбора образцов. На врезке показано географическое расположение озера Ускуль.

Fig. 1. Map of location of the Uskol lake with a sampling profile. The sidebar shows the geographical location of the Uskol lake.

В представленной работе детально рассмотрены ассоциации глинистых минералов, образующихся в современных высокоминерализованных озерах, на примере озера Ускуль.

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА

Озеро Ускуль находится в Южно-Минусинской котловине в республике Хакасия вблизи г. Абакана (рис. 1). Выбор озера Ускуль в качестве объекта исследования обусловлен его территориальным расположением в высоких широтах (53–54° с.ш.), характеризующихся контрастно выраженными изменениями солнечной активности и сезонными колебаниями температуры. Среднегодовая температура воздуха варьирует от +1.8 до –1.0°C. Минимальная температура (–43.8 °C) была зафиксирована в декабре 1966 г., а максимальная (+36.0 °C) в июле 1970 г. Климат данного района криоаридный, т.е. характеризуется засушливым, жарким летом и достаточно морозной зимой. Очень важной особенностью района являются активные эоловые процессы (скорость ветра до 20–30 м/с), которые способствуют переносу обломочного материала в котловину озера (Котельников и др., 2018).

Морфологически озеро состоит из двух водоемов размерами 347 × 650 и 674 × 815 м, которые в периоды интенсивных осадков объединяются в одно озеро с пологими и заболоченными берегами. Глубина озера в отдельных участках достигает 3 м. Осадки озера Ускуль представлены современными аллювиально-делювиальными глинами и илами с эоловой составляющей. Средняя скорость осадконакопления оценивается в 2 мм/год (Рогозин, 2018), что позволяет предполагать, что изученный разрез (до глубины 1 м), отражает геологическую историю на протяжении около 500 лет. В качестве источников осадочного материала рассматриваются как подстилающие, так и обрамляющие отложения самохвальской свиты (ранний карбон), представленные зелеными

пепловыми туфами и песчаниками с небольшими прослоями известняков (Лучицкий, 1960; Зухс, 1966).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб. Материал для исследований отбирался в летний период 2018 года и в зимний период 2019 года сотрудниками Томского государственного университета. Пробоотбор проводился с использованием бура диаметром 12 см по профилю ЮЗ-СВ направления из пересыхающей части озера (по перемычке между двумя водоемами) (рис. 1). Точки отбора проб располагаются через 50 м друг от друга. В каждой из точек профиля отбиралось 10 проб от поверхности до глубины 1 м (через каждые 10 см). Ниже приводится обсуждение результатов исследования вертикального разреза в точках № 6.1, 6.2, 6.3. Точка 6.1 расположена на береговой линии водоема, точки 6.2 и 6.3 в 50 и 100 м от берега соответственно (рис. 1).

Диагностика минеральных фаз. Для диагностики минеральных фаз в озерных осадках использовался метод порошковой рентгенографии. Данный метод является информативным и рациональным для решения подобного рода задач (Соколова и др., 2005; Солотчина, 2009; Boroznovskaya et al., 2017; Khrushcheva, Nebera, 2019).

Необходимую для диагностики глинистых компонентов фракцию размером 10 мкм получали путем осаждения исходного материала в дистиллированной воде. Время осаждения рассчитывали по формуле Стокса (Соколова и др., 2005). Из полученной тонкой фракции готовили ориентированные препараты с целью увеличения интенсивности базальных отражений типа 001.

Для более достоверной диагностики ориентированные препараты подвергали насыщению парами этиленгликоля в эксикаторе в течение 24 ч и/или прокаливанию в муфельной печи при температуре 550 °С в течение 2 ч.

Измерения проводили в ЦКП “Аналитический центр геохимии природных систем” Томского государственного университета на рентгеновском дифрактометре XPert PRO MRD (изготовитель PANalytical). Условия съемки: 40 кВ, 30 мА, Cu излучение, Ni фильтр, диапазон измерений 3–60° 2 θ . Расшифровку дифрактограмм проводили с использованием программного обеспечения HighScore и базы данных PDF-4 Minerals 2020 (PDF-4, 2020).

Моделирование дифракционных профилей глинистых минералов осуществляли с использованием функции Пирсона VII (Солотчина, 2009) по программе Fityk (Wojdyr, 2010), с помощью данной функции осуществляли разложение сложных дифракционных профилей. Функция Пирсона VII является оптимальной функцией для описания рентгеновского профиля изучаемых фаз, так как позволяет учитывать как размер частиц, так и дефекты упаковки, характерные для глинистых минералов (Солотчина, 2009).

Определение элементного состава осадков. Определение концентрации элементов выполнялось посредством атомно-эмиссионного спектрального анализа на приборе iCAP 7400 Duo фирмы “Termo Fisher Scientific” (США) в ЦКП “Аналитический центр геохимии природных систем” Томского государственного университета.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным рентгеновского исследования содержание глинистых минералов в пробах варьирует от 30 до 50%, в зависимости от глубины отбора образца и удаленности от береговой линии.

Глинистые минералы представлены монтмориллонитом с натриевым и кальций-магнелиевым катионами, а также иллитом. Помимо глинистых минералов в осадках озера установлены в существенных количествах кварц SiO₂, анальцим Na[AlSi₂O₆] · H₂O и альбит

Таблица 1. Содержание минеральных фаз в осадках озера Усколь по глубине отбора образцов, %
Table 1. The content of mineral phases in sediments of the Uskol lake by sampling depth, %

Глубина отбора, см	Глинистые минералы	Анальцим	Кварц	Санидин	Альбит	Кальцит	Галит	Гипс
Точка отбора 6.1								
0–10	31	16	32	<1	14	7	<1	<1
10–20	36	12	31	<1	15	6	<1	<1
20–30	35	13	31	<1	16	5	<1	<1
30–40	38	16	31	<1	8	7	<1	–
40–50	37	15	32	<1	14	2	<1	–
50–60	41	14	33	<1	12	<1	<1	–
60–70	39	16	35	1	9	<1	<1	–
70–80	39	16	35	2	8	<1	<1	–
80–90	39	14	34	2	11	<1	<1	–
90–100	35	16	31	2	8	8	<1	–
Точка отбора 6.2								
0–10	39	13	38	<1	4	3	3	<1
10–20	40	19	35	<1	3	3	<1	<1
20–30	40	19	35	<1	3	3	<1	–
30–40	33	4	32	<1	22	9	<1	–
40–50	38	4	36	<1	16	6	<1	–
50–60	38	2	30	<1	27	3	<1	–
60–70	41	4	35	<1	20	<1	<1	–
70–80	46	<1	31	2	16	5	<1	–
80–90	39	<1	33	2	24	2	<1	–
90–100	50	<1	30	<1	18	2	<1	–
Точка отбора 6.3								
0–10	37	10	30	<1	5	16	<1	2
10–20	37	6	33	<1	8	12	<1	4
20–30	44	4	32	<1	6	11	<1	3
30–40	49	<1	33	<1	6	12	<1	–
40–50	50	<1	25	1	7	17	<1	–
50–60	47	6	30	<1	8	9	<1	–
60–70	49	<1	29	<1	7	15	<1	–
70–80	47	3	40	<1	8	2	<1	–
80–90	45	3	42	1	7	2	<1	–
90–100	45	3	40	1	8	3	<1	–

$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, в заметных количествах – кальцит CaCO_3 и в ничтожно малых количествах – санидин KAlSi_3O_8 , гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и галит NaCl (табл. 1) (Khrushcheva, Nebera, 2019).

Из сопоставления данных табл. 1 и 2 можно видеть, что магний присутствует исключительно в составе монтмориллонита. Содержание натрия и кальция отмечается как в составе глинистого компонента, так и в составе прочих минералов. С учетом количественной доли минералов, бóльшая часть натрия концентрируется в анальциме и

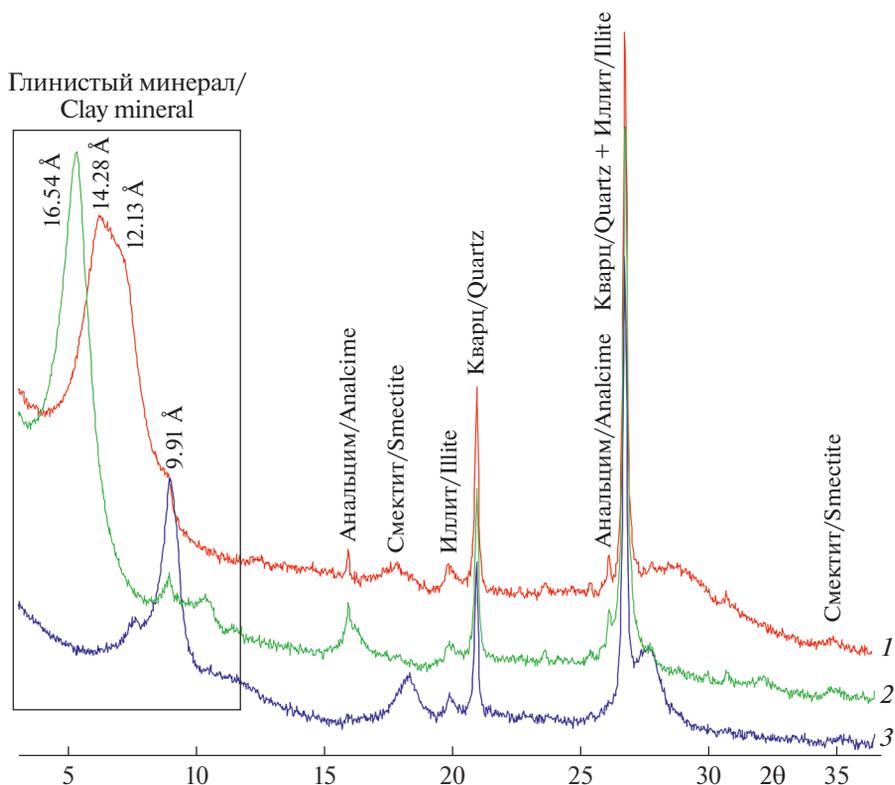


Рис. 2. Пример дифрактограмм образцов глинистой фракции (образец 6.1., глубина отбора 50–60 см), снятых в воздушно-сухом состоянии (1), после насыщения этиленгликолем (2) и после прокалывания (3).

Fig. 2. Example of diffraction patterns of clay fraction samples (sample 6.1., sampling depth 50–60 cm), taken in an air-dry state (1), after saturation with ethylene glycol (2) and after calcination (3).

альбите, незначительная – в галите. Кальций, в основном, накапливается в кальците, реже в гипсе. Основная доля калия приходится на иллит, подчиненная – на санидин.

Монтмориллонит. Монтмориллонит в осадках озера Усколь представлен двумя разновидностями: натриевой $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ и кальций-магниевой $(\text{Ca,Mg})_{0,33}(\text{AlMg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$. Содержание Na_2O в осадках варьирует от 2.18 до 5.12 мас. %, CaO – от 0.48 до 8.57 мас. % и MgO – от 1.56 до 2.98 мас. % (табл. 2).

Рентгенографически монтмориллонит установлен по серии рефлексов hkl (d , Å , интенсивность): 001 (14.28–12.13₁₀), 020 (4.49₂) и $\bar{1}31$ (2.57₁).

Основной диагностический признак монтмориллонита заключается в смещении рефлекса 001 в область малых углов 2θ , то есть 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 $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ (Франк-Каменецкий и др., 1983).

После прогревания образца при температуре 550 °С межплоскостное расстояние сокращается до 9.87 Å (рис. 2), так как кристаллическая структура сжимается за счет удаления из нее межслоевой воды.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) осадков озера Усколь по глубине отбора образцов
Table 2. The chemical composition (wt %) of Uskol lake sediments by sampling depth

Глубина отбора, см	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	S	ППП*
Точка отбора 6.1												
0–10	1.61	0.02	64.94	0.33	13.54	2.51	1.98	2.24	0.08	3.96	0.23	8.36
10–20	3.20	0.03	64.89	0.30	12.87	2.10	1.85	2.93	0.07	3.00	0.05	8.22
20–30	1.82	0.01	64.96	0.36	13.98	2.79	2.58	0.63	0.04	3.01	0.06	8.02
30–40	2.28	0.02	65.72	0.33	13.93	2.37	1.97	0.56	0.04	3.13	0.06	7.87
40–50	2.35	0.02	65.87	0.34	14.25	2.51	2.14	0.56	0.04	3.07	0.05	7.94
50–60	2.57	0.02	66.08	0.35	14.22	2.49	2.16	0.48	0.03	3.00	0.03	7.81
60–70	2.24	0.01	65.80	0.34	14.39	2.65	2.30	0.75	0.05	3.11	0.05	7.41
70–80	2.29	0.02	67.78	0.32	13.92	2.28	2.10	0.73	0.06	2.95	0.04	6.92
80–90	2.47	0.03	67.48	0.32	14.02	2.37	2.11	0.79	0.06	2.96	0.03	6.91
90–100	3.29	0.03	67.43	0.31	13.38	2.20	1.86	1.18	0.07	3.02	0.05	6.97
Точка отбора 6.2												
0–10	2.33	0.10	59.28	0.31	12.69	1.98	1.63	6.61	0.11	4.67	0.53	9.81
10–20	2.63	0.09	59.60	0.32	13.34	2.21	1.67	6.54	0.12	3.44	0.23	9.63
20–30	2.78	0.09	59.73	0.33	12.60	2.01	1.56	7.04	0.12	3.43	0.26	9.76
30–40	2.71	0.09	61.05	0.34	14.16	2.41	2.06	4.29	0.09	3.44	0.21	9.05
40–50	2.66	0.07	61.28	0.32	14.28	2.24	1.96	4.51	0.09	3.53	0.28	8.85
50–60	2.59	0.07	62.17	0.31	16.18	2.45	2.39	2.06	0.09	3.34	0.14	8
60–70	2.90	0.05	61.04	0.32	16.14	3.59	2.86	1.42	0.11	3.14	0.12	8.56
70–80	2.80	0.05	60.01	0.31	15.37	3.38	2.70	1.15	0.13	3.03	0.09	11.25
80–90	2.87	0.05	61.16	0.32	16.12	3.49	2.71	1.20	0.12	3.05	0.08	8.44
90–100	2.61	0.05	60.93	0.31	15.51	4.15	2.58	1.16	0.14	2.79	0.06	8.99
Точка отбора 6.3												
0–10	2.76	0.15	53.87	0.31	12.62	2.21	1.93	8.57	0.11	5.12	1.18	11.93
10–20	2.71	0.14	55.85	0.32	12.71	2.32	2.05	7.40	0.11	3.90	0.83	12.01
20–30	2.65	0.10	56.01	0.33	13.26	2.57	2.28	5.36	0.10	3.47	0.78	14.16
30–40	2.74	0.11	57.39	0.34	13.79	2.55	2.16	6.14	0.11	3.68	0.86	11.28
40–50	2.80	0.09	54.70	0.35	14.17	2.44	2.40	5.28	0.11	3.56	0.78	14.06
50–60	2.73	0.08	58.80	0.37	15.06	2.79	2.98	1.57	0.06	3.21	0.21	12.58
60–70	2.49	0.11	54.31	0.35	14.00	2.72	2.30	4.14	0.07	3.16	0.44	16.01
70–80	2.59	0.09	65.25	0.39	14.99	2.79	2.75	1.01	0.04	2.49	0.14	7.66
80–90	2.50	0.08	67.77	0.38	13.43	3.01	2.62	0.95	0.06	2.18	0.18	7.19
90–100	2.37	0.07	66.28	0.38	14.59	2.38	2.51	1.10	0.04	2.39	0.11	7.41

Примечание. ППП – потери при прокаливании.

На наличие натриевого катиона в межслоевой промежутке монтмориллонита указывает положение первого базального пика 001 ($d = 12.13 \text{ \AA}$), в то время как у монтмориллонита с кальциевым и магниевым катионами положение этого рефлекса отвечает межплоскостному расстоянию 14.28 \AA (Дриц, Коссовская, 1990; Франк-Каменецкий и др., 1983). Особенность положения этих рефлексов объясняется различным составом поглощенного комплекса, а именно, – отношением кальция, магния и натрия, а также

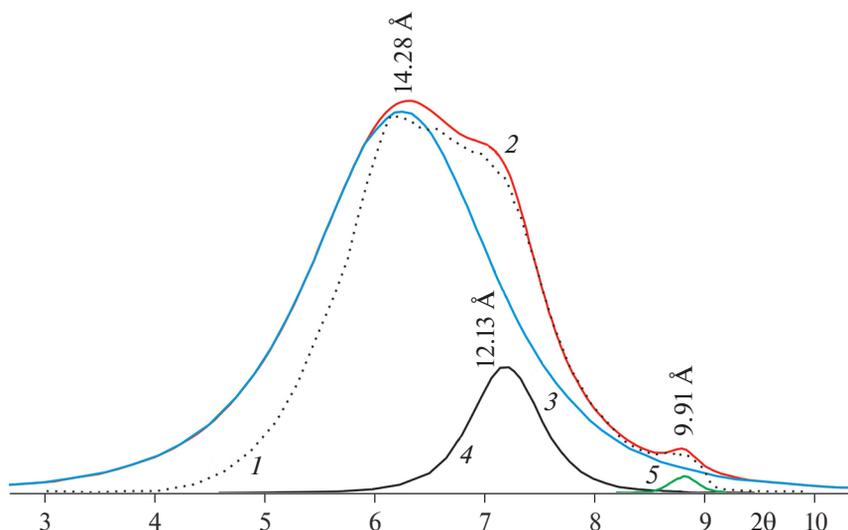


Рис. 3. Пример разложения сложного дифракционного профиля на индивидуальные пики на дифрактограмме глинистой фракции: до разложения (1), в виде суммы трех фаз (2), кальций-магнийевый монтмориллонит (3), натриевый монтмориллонит (4), иллит (5).

Fig. 3. An example of the decomposition of a complex diffraction profile into individual peaks in the diffraction pattern of a clay fraction: before decomposition (1), as the sum of three phases (2), calcium-magnesium montmorillonite (3), sodium montmorillonite (4), illite (5).

различным содержанием в монтмориллоните связанной воды (Дриц, Коссовская, 1990).

На дифрактограмме (рис. 2) видно, что пик в области 14.28–12.13 Å характеризуется уширением, это указывает на наличие в осадках как натрийсодержащего, так и кальций-магниевого монтмориллонита.

Иллит. В данной работе использовался термин “иллит”, который, согласно рекомендациям Номенклатурного комитета, подразумевает групповое название всех слоистых минералов, в которых количество разбухающих смектитовых слоев не превышает 15% (Bailey et al., 1984). Иллит в изученных породах является основным концентратом K_2O , содержание которого меняется от 1.61 до 3.29 мас. %.

Рентгеновская диагностика иллита проведена по характерному набору рефлексов hkl (d , Å_{интенсивность}): 002 (9.91₁₀), 004 (4.99₄), 006 (3.35₁₀), 00 10 (1.98₄). При прокаливании и насыщении образца этиленгликолем межплоскостные расстояния не меняются из-за прочной, стабильной решетки иллита, не способной к межпакетной адсорбции воды (Соколова и др., 2005).

Точная диагностика всех присутствующих в осадках глинистых фаз проведена с помощью моделирования сложных дифракционных профилей функцией Пирсона VII. Для определения точного положения рефлекса и интенсивности его дифракционной линии 001 сложные дифракционные профили раскладывались на несколько индивидуальных пиков – такая процедура позволила получить количественное соотношение глинистых фаз в осадках.

Проведенные исследования показали наличие в составе глинистого компонента иллита и двух модификаций монтмориллонита – с кальций-магнийевым и натриевым катионами в межслоевом промежутке (табл. 3).

Таблица 3. Количественное соотношение фаз в глинистом компоненте осадков
Table 3. The quantitative ratio of phases in the clay component of sediments

Глубина места отбора, от поверхности в см	Точка отбора 6.1		Точка отбора 6.2			Точка отбора 6.3			
	глинистый компонент, %								
	М		Иллит	М		Иллит	М		Иллит
	Ca-Mg	Na		Ca-Mg	Na		Ca-Mg	Na	
0–10	48	48	4	39	55	6	47	45	8
10–20	45	47	8	40	53	7	50	43	7
20–30	54	42	4	38	55	7	53	40	7
30–40	48	46	6	55	38	7	55	38	7
40–50	52	42	6	58	35	7	58	34	8
50–60	53	40	7	58	35	7	69	24	7
60–70	56	38	6	70	22	8	57	37	6
70–80	51	43	6	66	26	8	67	26	7
80–90	51	43	6	66	26	8	65	29	6
90–100	49	42	9	63	29	8	64	31	5

Примечание. М – монтмориллонит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ранее опубликованных работах по донным осадкам соседнего озера Талое (Хрущева и др., 2019) было установлено, что питание минерализованных озер данного района осуществляется преимущественно щелочными (pH = 8–9) подземными водами хлоридного состава, обогащенными натрием, магнием и кальцием.

Глинистые минералы осадков озера Усколь – типичные эпигенетические минералы, которые образовались под влиянием щелочных озерных вод. Согласно классическим представлениям (Дриц, 1990; Плюсина, 2011), преобразование монтмориллонита протекает по следующей схеме: на начальных этапах образования монтмориллонита отмечается фиксация в межпакетном пространстве Mg^+ и Na^+ . Они могут присутствовать в ионном растворе при широких значениях pH. В осадках озера Усколь наблюдается четкая зависимость (коэффициент корреляции Пирсона r равен 0.83, 0.95 и 0.96) содержания Mg^+ от концентрации кальций-магниевого монтмориллонита (рис. 4).

Далее Mg^+ и Na^+ перемещаются в октаэдрические позиции и их место занимает K^+ . Этот процесс обуславливает уход Al из октаэдрических позиций и внедрение в тетраэдрические позиции Al^{3+} , и как следствие, образование кристаллической структуры иллита.

Образование монтмориллонита в осадках озера Усколь, наиболее вероятно, связано с разложением в щелочной среде озера полевых шпатов и цеолита, входящих в состав подстилающих горных пород. Полевые шпаты представлены преимущественно альбитом (до 30%), в меньшей степени калиевым полевым шпатом – санидином (до 2%). В целом накопления полевых шпатов не наблюдается, но стоит отметить их повышенную концентрацию в точке отбора 6.2 на глубине 30–100 см. Цеолит встречается в виде анальцима, содержание которого доходит до 20% (табл. 1). В точках отбора 6.2 и 6.3 отмечается преобладание анальцима в верхней части разрезов (до 30 см), в точке отбора 6.1 цеолит накапливался достаточно равномерно по всей глубине.

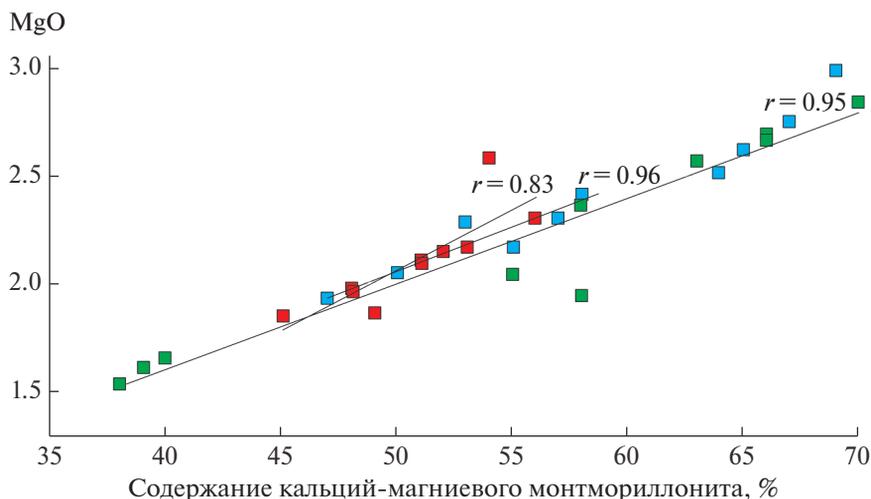


Рис. 4. Зависимость содержания магния в осадках от содержания кальций-магниевого монтмориллонита: красные квадратики – точка отбора 6.1, зеленые – 6.2, синие – 6.3.

Fig. 4. Dependence of magnesium content in sediments and calcium-magnesium montmorillonite mode: red squares – sampling point 6.1, green – 6.2, blue – 6.3.

Под воздействием щелочных озерных вод и обилия K^+ монтмориллонит претерпевает эволюцию через смешанослойные образования иллит-монтмориллонитового ряда в иллит. Как следствие, количество монтмориллонита постепенно сокращается за счет присоединения K^+ из подстилающих пород и растворов.

Из данных табл. 2 и 3 видно, что содержание K^+ в осадках четко коррелирует с концентрациями иллита (коэффициент корреляции равен 0.98, 0.77 и 0.93) (рис. 5).

Поскольку среда минералообразования в осадках озера Усколь преимущественно щелочная, было рассмотрено распределение щелочных и щелочноземельных элементов в разрезе. Основные минеральные фазы, в которых они встречаются – глинистые минералы. Для щелочных элементов установлена тенденция возрастания доли K^+ с глубиной и, соответственно, уменьшения доли Na^+ (рис. 6). Геохимические данные подтверждаются минералогическими: в интервале 30–100 см отмечается увеличение содержания иллита и уменьшение – натрийсодержащего монтмориллонита (табл. 3). Для щелочноземельных элементов наблюдается закономерность накопления в нижних частях разреза Mg^{2+} (рис. 6), в то время как Ca^{2+} накапливается преимущественно на поверхности и до глубины 50 см. Минералогически это находит подтверждение в накоплении в нижних частях разрезов кальций-магниевого монтмориллонита (до 70% от глинистого компонента).

Нужно подчеркнуть, что глинистые минералы озерных отложений являются отличными индикаторами климатических и гидрохимических условий осадконакопления (Акульшина, 1976; Дриц, Коссовская, 1990; Зхус, 1966). Для определения данных условий следует учитывать основные факторы образования осадка – мобилизацию, перенос, аккумуляцию и преобразование материала.

По полученной ассоциации глинистых минералов можно предположить, что формирование осадков происходило в условиях аридного климата. На это указывает преобладание в отложениях монтмориллонита и иллита, а также отсутствие каолинита (Зхус, 1966). Стоит отметить, что в осадках озера Усколь не обнаружен палыгорскит,

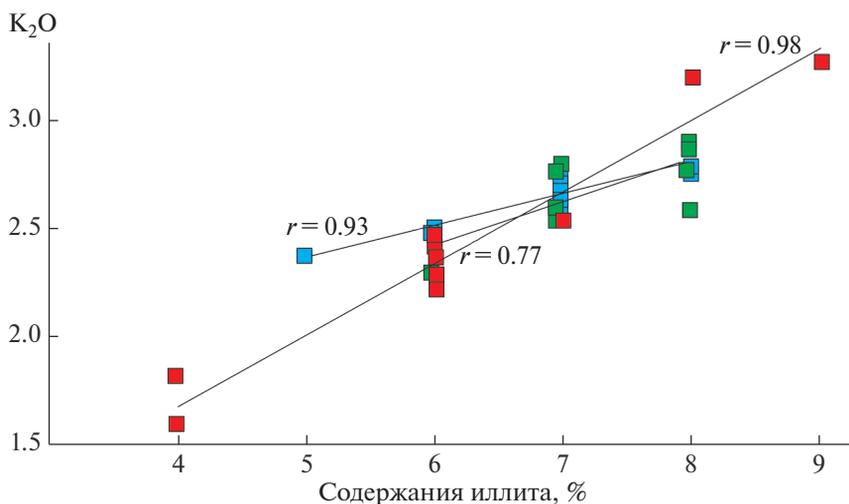


Рис. 5. Зависимость содержания калия в осадках от содержания иллита: красные квадратики – точка отбора 6.1, зеленые – 6.2, синие – 6.3.

Fig. 5. Dependence of potassium content in sediments and illite mode: red squares – sampling point 6.1, green – 6.2, blue – 6.3.

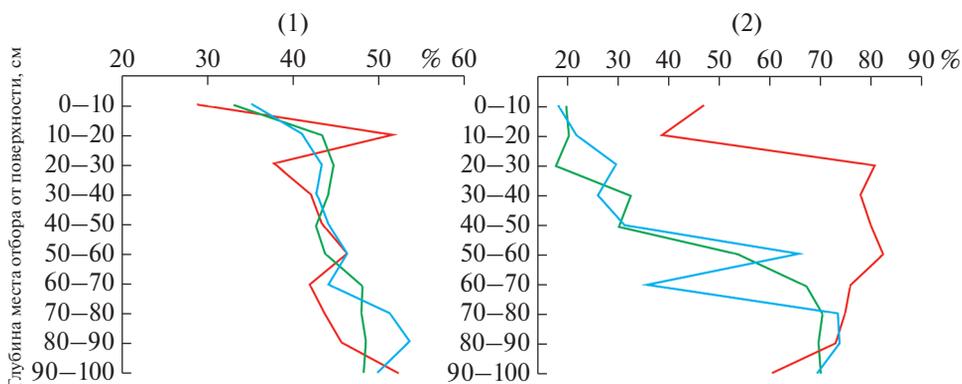


Рис. 6. Распределение доли калия (1) и магния (2) в разрезах осадков озера Усколь: красная линия – точка отбора 6.1, зеленая – 6.2, синяя – 6.3.

Fig. 6. Distribution of fractions of potassium (1) and magnesium (2) in sections of sediments of the Lake Uskolye: red line – sampling point 6.1, green – 6.2, blue – 6.3.

который выступает в качестве типичного индикатора аридного климата. Его отсутствие позволяет предположить, что аридный режим во время осадкообразования был недостаточно выражен. Учитывая современные климатические особенности территории, а именно жаркое, засушливое лето и достаточно морозную зиму, можно заключить, что осадки, формировавшиеся последние 500 лет, образовались в условиях криоаридного климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования позволили установить, что глинистый компонент осадков озера Усколь представлен эпигенетически образованными минералами: кальций-магний и натрийсодержащим монтмориллонитом, а также иллитом. В разрезах наблюдается закономерное увеличение содержаний иллита и кальций-магниевого монтмориллонита в нижних частях разрезов и, соответственно, уменьшения концентраций натрийсодержащего монтмориллонита. Можно полагать, что монтмориллонит образовался вследствие разрушения полевых шпатов и анальцима. Далее в условиях щелочной среды озера монтмориллонит эволюционировал через ряды смешаннослойных образований в иллит.

Учитывая данные особенности минералообразования и скорость накопления осадков, можно предположить, что в течение последних 500 лет осадконакопление происходило в условиях криоаридного климата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90056.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-35-90056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акульшина Е.П.* Глинистые минералы как показатели условий литогенеза. Новосибирск: Наука, **1976**. 191 с.
- Дриц В.А., Коссовская А.Г.* Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные образования. Москва: Наука, **1990**. 214 с.
- Дриц В.А., Коссовская А.Г.* Глинистые минералы: слюды, хлориты. Москва: Наука, **1991**. 175 с.
- Зхус И.Д.* Глинистые минералы и их палеогеографическое значение. Москва: Наука, **1966**. 279 с.
- 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 : 200e000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N-46-XIX (Усть-Бюрь). Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, **2018**. 330 с.
- Луцицкий И.В.* Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. Москва: АН СССР, **1960**. 276 с.
- Плюснина И.И.* Физико-химические особенности эволюции дисперсных систем в корях выветривания, в седименто- и литогенезе. Москва: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, **2011**. 392 с.
- Рентгенография* основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. Ленинград: Недра, **1983**. 359 с.
- Рогозин Д.Ю.* Меромиктические озера Северо-Минусинской котловины: закономерности стратификации и экология фототрофных серных бактерий. Красноярск: ИФ СО РАН, **2018**. 241 с.
- Соколова Т.А., Дронова Т.Я., Толпешта И.И.* Глинистые минералы в почвах. Тула: Гриф и К, **2005**. 336 с.
- Солотчина Э.П.* Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск: Гео, **2009**. 234 с.
- Хрущева М.О., Тишин П.А., Чернышов А.И.* Геохимическая характеристика рассолов и современных эвапоритов урочища Талое озеро (Республика Хакасия) // Изв. Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. **2019**. Т. 30. С. 130–140.

Genetic Information of Clay Minerals of Sediments of the Uzkol Lake (Republic of Khakasia)

M. O. Khrushcheva^{a,*}, P. A. Tishin^a, T. S. Nebera^a, A. I. Chernyshov^a, and A. L. Arkhipov^a

^a*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

**e-mail: masha2904@mail.ru*

In this work, the mineralogy of the clay components of the salt lakes of the South Minusinsk depression is examined in detail using the example of Uzkol Lake sediments. The study of

clay minerals was carried out in order to identify climatic and hydrochemical features of the sedimentation. Based on the modeling of diffraction profiles of clay minerals using the Pearson VII function, it was found that clay minerals are represented by calcium-magnesium and sodium varieties of montmorillonite and illite. Variations in the clay phase modes are observed depending on the depth of selection. There is a tendency towards an increase in illite and calcium-magnesium montmorillonite modes down the section, which is associated with an increase in the concentration of K^+ and Mg^{2+} in sediments. According to the established mineral association of clay components, it can be assumed that sedimentation over the past 500 years has occurred in a cryoarid climate.

Keywords: clay minerals, Na-montmorillonite, mixed-layer formations, X-ray phase analysis, Uskol lake

REFERENCES

- Abdullayev E., Leroy S.A.G.* Clay minerals as palaeoclimatic indicators in the Pliocene productive series, western Southern Caspian Basin. *Geol. J.* **2018**. Vol. 53. P. 2427–2436.
- Akulshina E.P.* Clay minerals as indicators of lithogenesis conditions. Novosibirsk: Nauka, **1976**. 191 p. (*in Russian*).
- 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 miner.* **1984**. Vol. 32. P. 239–240.
- Boroznovskaya N.N., Zyryanova L.A., Korneva A.P., Nebera T.S., Ivanova M.O.* Crystallochemical aspect of clay and clayish matter minerals luminescence. *Applied Clay Sci.* **2017**. Vol. 145. P. 11–17.
- Brindley G.W., Brown G.* X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. *Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification*. London: Mineralogical Society, **1980**. P. 305–356.
- Chen D., Pan B., Ma J., Hu X., Geng H., Pang H.* Paleoclimatic record from the clay mineralogy of Quaternary sediments of drill core DWJ from Jiudongsubbasin (western Hexi Corridor), NW China. *Quaternary Research.* **2020**. Vol. 93. P. 124–138.
- Dianto A., Subehi L., Ridwansyah I., Hantoro W.S.* Clay minerals in the sediments as useful paleoclimate proxy: Lake Sentarum case study, West Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference, Series: Earth and Environmental Sci.* **2019**. Vol. 311. N 012036. P. 1–6.
- Drits V.A., Kossovskaya A.G.* Clay minerals: smectites, mixed-layer formations. Moscow: Nauka, **1990**. 214 p. (*in Russian*).
- Drits V.A., Kossovskaya A.G.* Clay minerals: mica, chlorites. Moscow: Nauka, **1991**. 175 p. (*in Russian*).
- Guo J., Pyles C., Krugh W., Negrini R.* Clay minerals in the late Quaternary sediment of Tulare Lake, California: Implications for climate change, weathering, and erosion processes. *Int. J. Sediment Res.* **2019**. Vol. 34. P. 432–443.
- Khrushcheva M.O., Tishin P.A., Chernyshov A.I.* Geochemical characteristics of brines and modern evaporites of the Taloye Lake tract (Republic of Khakassia). *Proc. Irkutsk State University. Earth Science Series.* **2019**. Vol. 30. P. 130–140.
- 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**. Vol. 319. N 01210. P. 1–6.
- 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.* State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200000. Second edition. Minusinskaya series. Sheet N-46-XIX (Ust-Byur). Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, **2018**. 330 p. (*in Russian*).
- Luchitsky I.V.* Volcanism and tectonics of the Devonian troughs of the Minusinsk intermountain trough. Moscow: USSR Acad. Sci., **1960**. 276 p. (*in Russian*).
- PDF – 4 / Minerals 2020.* International Centre for Diffraction Data. SN: Mins200136-6252.
- Plyusnina I.I.* Physico-chemical features of the evolution of disperse systems in weathering crusts, in sedimentogenesis and lithogenesis. Moscow: Faculty of Physics, Moscow State University, **2011**. 392 p. (*in Russian*).
- Rogozin D.Yu.* Meromictic lakes of the North Minusinsk depression: patterns of stratification and ecology of phototrophic sulfur bacteria. Krasnoyarsk: IF SB RAS, **2018**. 241 p. (*in Russian*).
- Sokolova T.A., Dronova T.Y., Tolpesta I.I.* Clay minerals in soils. Tula: Grif and K, **2005**. 336 p. (*in Russian*).
- Solotchina E.P.* Structural typomorphism of clay minerals of sedimentary section and weathering crust. Novosibirsk: Geo, **2009**. 234 p. (*in Russian*).

Sousa J.E.S., Santos J.C.B., Correa M.M., Nascimento A.F., Schulze S.M.B.B., Ferreira T.O., Araujo Filho J.C., Souza Junior V.S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. *Catena*. **2020**. Vol. 184. N 104260. P. 1–10.

Srivastava A.K., Kandwal N.K., Krishnakumar A. Clay minerals from the Lameta Formation of Pandhari area, districts Amravati, Maharashtra and Betul, Madhya Pradesh: Its paleoclimatological implications. *J. Earth System Sci.* **2020**. Vol. 129. N 37. P. 1–9.

Wang Q., Song Y., Li Y. Clay mineralogy of the upper Miocene-Pliocene red clay from the central Chinese Loess Plateau and its paleoclimate implications. *Quaternary Int.* **2019**. Vol. 552. P. 148–154.

Warren J.K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, **2006**. 1036 p.

Wojdyr M. Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Applied Cryst.* **2010**. P. 1126–1128.

X-ray diffraction of the main types of rock-forming minerals (layered and framework silicates). Ed. V.A. Frank-Kamenetsky. Leningrad: Nedra, **1983**. 359 p. (*in Russian*).

Zhus I.D. Clay minerals and their paleogeographic significance. Moscow: Nauka, **1966**. 279 p. (*in Russian*).