

Глинистые минералы пелоидов оз. Саган-Нур в Тункинской долине как показатели анаэробных условий литогенетических процессов

Р. Алокла^{1,2}, Е.П. Чебыкин^{3,4}, С.В. Рассказов^{1,4}, Т.А. Ясныгина⁴,
В.В. Акулова⁴, И.С. Чувашова^{1,4}, Йи-минь Сунь⁵

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

²Университет Алеппо, Сирия

³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

⁴Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

⁵Институт природных ресурсов и экологии Хэйлунцзянской академии наук, Харбин, Китай

Аннотация. Приводятся результаты изучения химического, гранулометрического и минерального состава в четырех колонках слоя сапропелевых донных илов оз. Саган-Нур мощностью от 30 до 45 см, залегающего на песчаных озерных отложениях. Илы используются в качестве лечебных грязей (пелоидов). Глинистые минералы осадочных отложений идентифицируются с использованием методов рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Тонкодисперсные глинистые минералы пелоидов рассматриваются как показатели анаэробных условий литогенетических процессов в зоне гипергенеза.

Ключевые слова. Лечебные грязи (пелоиды), Тункинская впадина, электронный сканирующий микроскоп, рентгеноструктурный анализ, сера, микроэлементы.

Clay minerals of peloids of the lake Sagan-Nur in the Tunka Valley as indicators of anaerobic conditions of lithogenetic processes

R. Alokla^{1,2}, E.P. Chebykin^{3,4}, S.V. Rasskazov^{1,4}, T.A. Yasnygina⁴,
V.V. Akulova⁴, I.S. Chuvashova^{1,4}, Yi-ming Sun⁵

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²University of Aleppo, Syria

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

⁵Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China

Abstract. The results of the study of chemical, granulometric, and mineral compositions of sapropelic bottom silts from Sagan-Nur lake are presented in four cores of the layer as thick as 45 cm that overlies sandy lacustrine deposits. The silt is used as therapeutic mud (peloids). Clay minerals in sedimentary deposits are identified using X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy. Finely dispersed clay minerals of peloids are considered as indicators of anaerobic conditions of lithogenetic processes in the hypergenesis zone.

Keywords. Therapeutic mud (peloids), Tunka basin, scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis, sulfur, trace elements.

Введение

Лечебными гязями (или пелоидами), по предложению комитета Международного общества медицинской гидрогеологии от 1938 г., называются «вещества, которые образуются в естественных условиях под влиянием геологических процессов и в тонко-измельченном состоянии, будучи смешанными с водой, применяются в лечебных целях». Интеграция современной медицины с геологией, химией и другими фундаментальными науками выявляет физико-химические особенности природных процессов образования пелоидов, парафинов и им подобных натуральных веществ, обладающих лечебными свойствами. Одним из критериев оценки бальнеологических свойств лечебных гязей служит их химический состав. Лечебные гязи рассматриваются как физико-химические равновесные системы, состоящие из жидкой и твердой фаз. Жидкой фазой служат гязевые растворы, имеющие разнообразный химический состав. В твердую фазу входят силикатные частицы, кристаллы солей, органические вещества, гидраты оксидов железа, алюминия, сернистое железо (Ступникова, Мурадов, 2005; Намсараев и др., 2007; Бокучава, 2009; Леонова и др., 2018; Baschini et al., 2010).

Пелоиды нередко имеют высокое содержание серы в виде сульфатов, сульфидов и сероводорода, а также тиолов и других органических соединений. Формы присутствия серы в сапропелевых илах регулируются жизнедеятельностью бактерий, перерабатывающих одни виды соединений серы в другие. Распространены сульфатредуцирующие бактерии, в своем жизненном цикле потребляющие сульфаты и переводящие их в сульфиды (Леонова и др., 2018; Goldhaber, 2005). Пелоиды с низким содержанием серы также используются в гязелечении. Примером служат лечебные гязи вулканического поля Удаляньчи в Северо-Восточном Китае, применяемые для лечебных целей на одноименном курорте (Rasskazov et al., 2017).

В Байкальском регионе изучались пелоиды оз. Нуху-Нур, которые используются в настоящее время для лечебных целей в санатории Нагалык Баяндаевского района на

северо-востоке Иркутского амфитеатра (Ясныгина и др., 2022). В настоящей работе рассматривается месторождение пелоидов оз. Саган-Нур в Тункинском районе Бурятии. Сапропелевые илы из этого озера отбираются для лечения в санаториях курорта Аршан.

Методика

Определяется химический, гранулометрический и минеральный состав отложений, проводится диагностика глинистых минералов рентгеноструктурным методом и методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Химический состав отложений определяется методом «мокрой химии». В сумму петрогенных оксидов входит влага, удаленная из пробы при ее просушивании при температуре 100 °С и потери при прокаливании (ППП) при температуре 1000 °С.

Для изучения гранулометрического состава отложений используется метод пипетки (по скорости падения частиц в воде) с двумя способами подготовки образца: полудисперсный (стандартный) и дисперсный (Ломтадзе, 1990). Первый способ предполагает предварительное кипячение водной суспензии образца с добавлением (1 см³) раствора аммиака (25 %), второй – с добавлением (5 см³) водного пирофосфата натрия (6.7 %).

Для определения минерального состава отложений, проба, истёртая до пудры в агатовой ступке со спиртом, исследована методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.0. Условия съёмки: излучение – CuK α , Ni – фильтр, V = 25 кВ, I = 20 мА, шаг сканирования – 0.05°. Для идентификации глинистых минералов осуществлялась подготовка ориентированного материала проб осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке, прогреванием при температуре 550° в течение 3-х часов и насыщением этиленгликолем. Рентгенограммы идентифицируются с помощью программы поиска фаз. Полуколичественное соотношение компонентов рассчитывается по корундовым числам методом RIR (Hubbard, Snyder, 1988; Yokokava, 1988; Ransom, Helgeson, 1993; Wolery, Jove-Colon, 2004).

Изучение параметров микроструктур глинистых пород проводится на сканирующем

электронном микроскопе Quanta-200 FEI Company с использованием программного обеспечения и аппаратуры для количественного анализа изображений поверхности скола образца с применением энергодисперсионного спектрометра EDAX. Микроструктура образцов изучается в условиях высокого вакуума (10^{-3} – 10^{-4} Па). Исследования микроструктуры основаны на сканировании электронным зондом поверхности образца, в результате чего формируется сигнал вторичных электронов, который в дальнейшем фиксируется детектором, усиливается, преобразуется и воспроизводится в виде растрового изображения на экране видеомонитора (Beutelspacher, Van Der Marel, 1968). Если электронный зонд сканирует по поверхности неэлектропроводных образцов, в том числе сухих глинистых пород (типичных диэлектриков), на его поверхности начнет скапливаться наведенный электростатический заряд. В результате на СЭМ-изображении появляются артефакты в виде ярких светлых пятен, искажающих изображение микроструктуры. Для предотвращения эффекта зарядки поверхности образца и улучшения качества изображений на образцы напыляется пленка золота толщиной 5–10 нм.

Для исследования на СЭМ механическая примесь в ходе пробоподготовки образцов удаляется. Образцы отмучиваются в воде при комнатной температуре в соответствии с методикой, позволяющей сохранить микроструктуру глинистых минералов (Осипов, Соколов, 2013):

1) используется 100 граммов образца и с помощью молотка раздавливаются (разбиваются) крупные куски на более мелкие, чтобы они могли разойтись в воде;

2) полученный материал помещается в банку и заливается большим количеством воды, размешивается до получения взвеси;

3) в течение 1–3 суток тяжелые частицы оседают на дно, а сверху остаются только легкие частицы, взвешенные в воде, которые перемещаются в другую емкость;

4) в течение нескольких часов (до суток) глинистые частицы осаждаются, две трети объема воды сливаются, а оставшаяся часть помещается в специальную посуду для удаления оставшейся воды (испарения при комнатной температуре) и получения глинистой составляющей.

Для исследований микроструктуры образцов на СЭМ часть подготовленного глинистого материала разводится в спирте. Разные порции помещаются на предметный столик. Пробы сутки высушиваются, после чего производится напыление золотом (Hughes and Bohor, 1970).

Общая характеристика объекта исследования

В Тункинской долине исследуются осадки оз. Саган-Нур, расположенного в днище Тункинской впадины (рис. 1). Из озера отобраны три колонки донных осадков на расстоянии 1–2 м от берега. Четвертая колонка отобрана из-под дерна на расстоянии 30 м от берега. В колонках выделяется верхний слой черного и темно-серого цвета, насыщенный органическим материалом (глубина от 30 до 45 см) и подстилающие озерные отложения (рис. 2; 3). Образцы грязи из колонок, отобранные с интервалом 3–10 см, высушивали и анализировали комплексом методов.



Рис. 1. Местоположение оз. Саган-Нур в Тункинской впадине (место отбора пробы обозначено красной точкой).

Fig. 1. Location of Sagan-Nur lake in the Tunka basin (a sampling site is shown by a red dot).

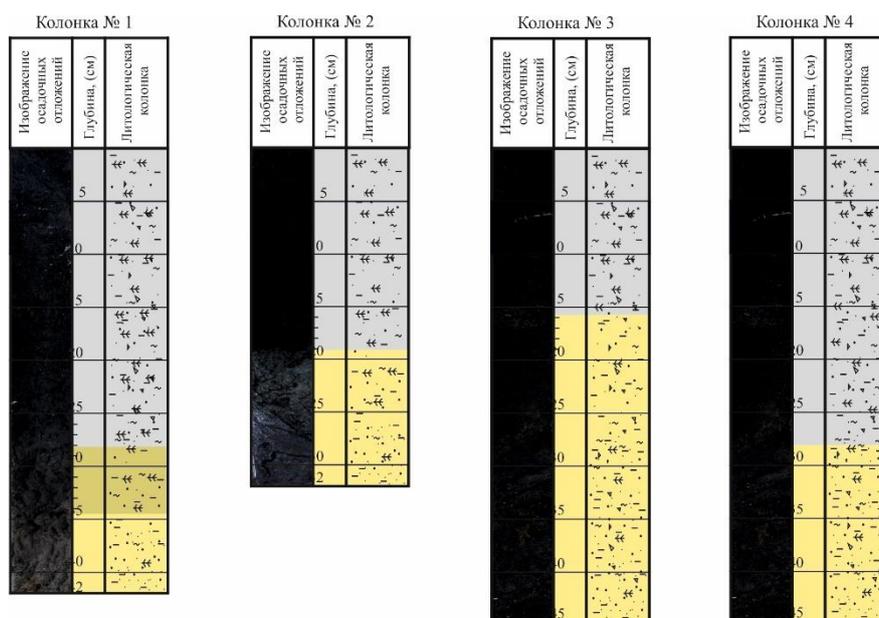


Рис. 2. Литологические колонки донных осадков. Серым цветом выделен слой пелоидов, желтым цветом – слой подстилающих песков.

Fig. 2. Columns of bottom sediments. The layer of peloids is highlighted in gray color, the layer of underlying sands by yellow color.

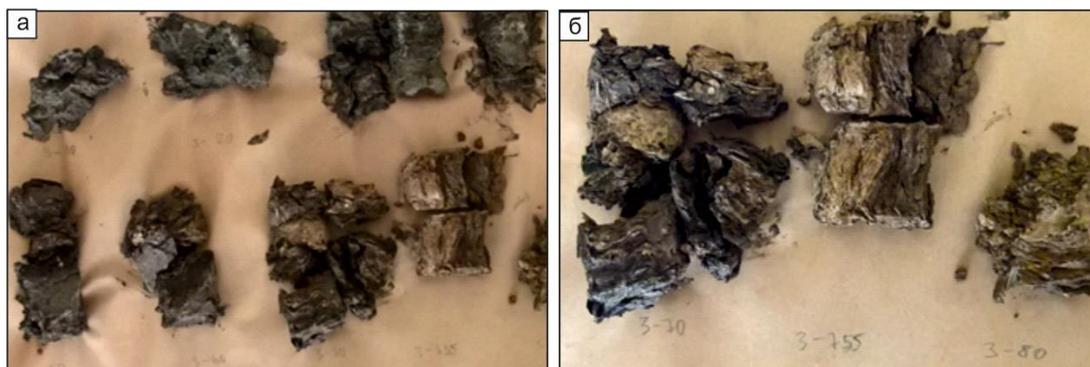


Рис. 3. а – высушенный материал колонки; б – слои от черного до темно-желтого цвета.

Fig. 3. а – dried column material; б – layers from black to dark-yellow color.

Результаты и обсуждение

Содержания петрогенных оксидов и микроэлементов

Химический состав отложений (табл. 2) рассматривается в соответствии с литологическим подразделением колонок на верхнюю (пелоидную) и нижнюю (песчаную) части (рис. 4). Наиболее отчетливая смена содержаний оксидов между слоями наблюдается в береговой колонке 4. В пелоидах ее верхней части определено повышенное содержание $S_{\text{общ}}$. На границе слоев содержание $S_{\text{общ}}$

снижается до нуля и слегка возрастает в нижележащих песках. От слоя песков к слою пелоидов резко увеличиваются содержания TiO_2 , MnO , K_2O и снижается содержание $FeO_{\text{общ}}$. В колонке 2 пелоиды верхней части также имеют повышенное содержание серы, но распределение TiO_2 , MnO , K_2O и $FeO_{\text{общ}}$ не имеет отчетливой связи с ее распределением в песчаном и пелоидном слоях. В колонках 1 и 3 содержания $S_{\text{общ}}$ в слое пелоидов ниже, чем в подстилающих песках. Содержание $S_{\text{общ}}$ в слоях этих колонок согласуется с содержанием $FeO_{\text{общ}}$, что свидетельствует о сульфидной форме серы.

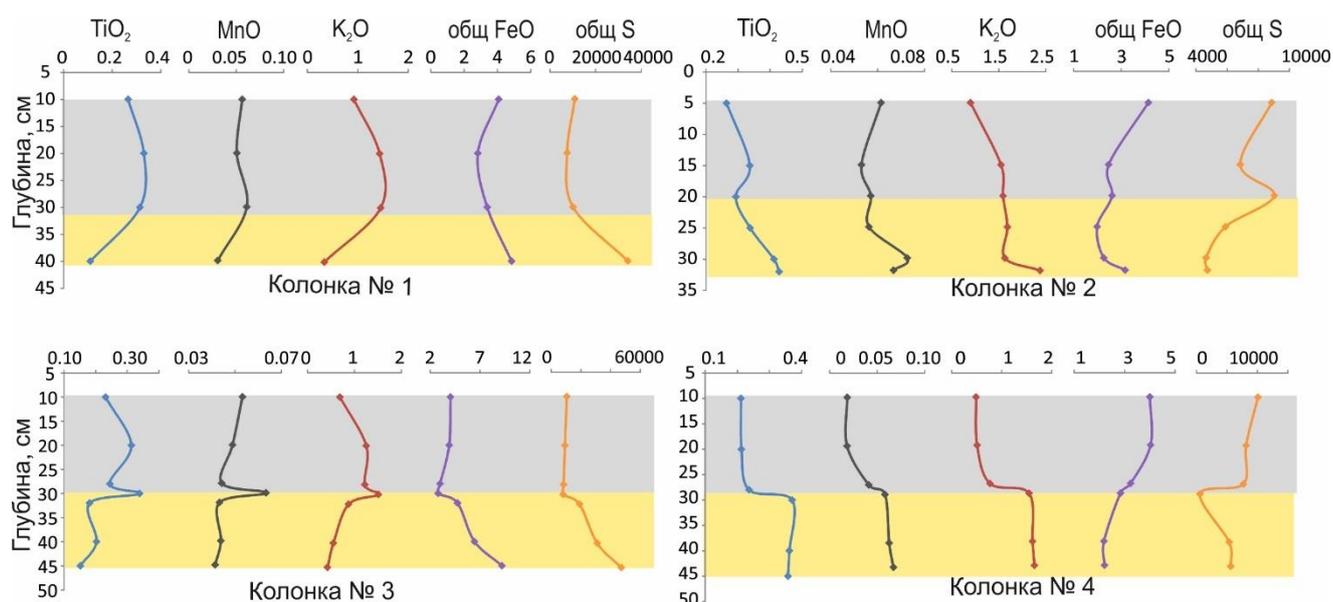


Рис. 4. Диаграмма глубинных вариаций содержаний TiO_2 , MnO , K_2O , $FeO_{\text{общ}}$ и $S_{\text{общ}}$ (мас. %) в осадочных отложениях.

Fig. 4. Diagram of depth variations of TiO_2 , MnO , K_2O , FeO_{tot} , and S_{tot} contents (wt %) in sedimentary deposits.

На диаграмме петрогенных оксидов и микроэлементов отложений факторов 1 и 2 группа Ge, W, Mo имеет значимую положительную корреляцию с серой. По отношению к этой группе элементов концентрированная совокупность большинства микроэлементов (Ba, Be, V, Co, Ni, Ga, Rb, Y, Nb, Cs, Ta, Th,

Cu) вместе с TiO_2 , MnO и K_2O дает значимую обратную корреляцию. Промежуточное положение по фактору 1 занимают Sr, U и $FeO_{\text{общ}}$. Последние 2 компонента по фактору 2 тесно связаны с группой Ge, W, Mo, тогда как Sr резко отделяется от этой группы (рис. 5).

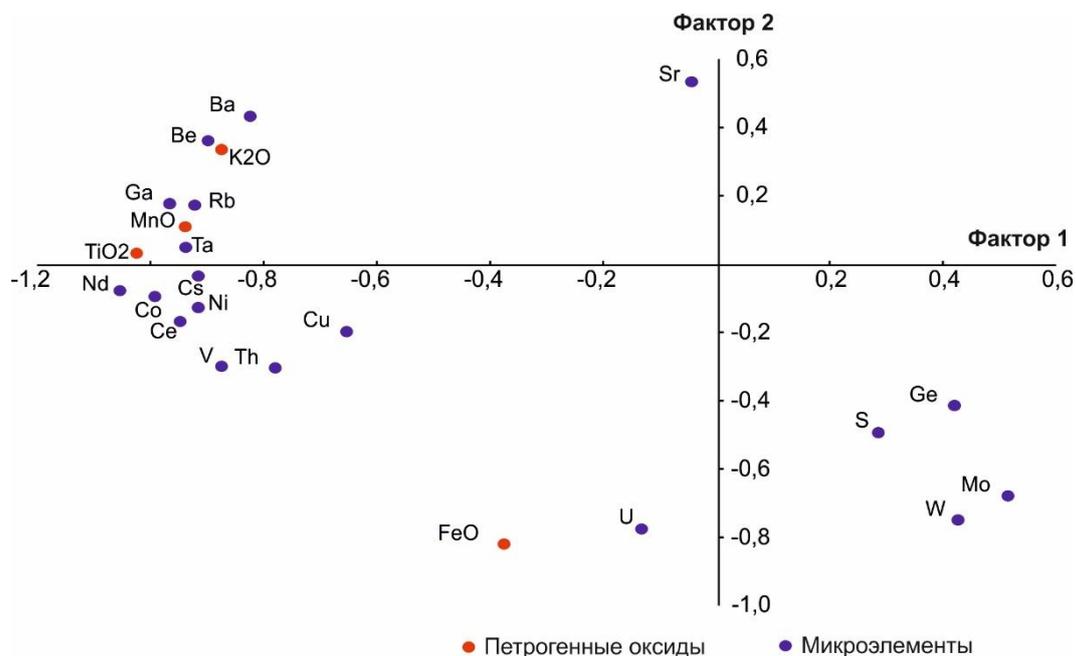


Рис. 5. Диаграмма факторов 1 и 2 для выбранных петрогенных оксидов (TiO₂, MnO, K₂O и FeO_{общ}), микроэлементов и S озерных отложений.

Fig. 5. Diagram of factors 1 and 2 for selected major oxides (TiO₂, MnO, K₂O, and FeO_{tot}), trace elements, and S from lake deposits.

Таблица 2. Содержания микроэлементов
Table 2. Contents of trace elements

№	Глуб. см	Ba	Cs	Rb	Th	Nb	Be	Ni	Co	Ta	Mo	W	U	Ge
1	10	71.84	162.9	50.9	48.13	8.18	1.0	23	5.18	0.50	1.2	1.3	0.59	0.7
	20	83.49	178.6	68.8	41.62	9.92	1.3	22	5.12	0.53	3.5	1.1	0.74	1.2
	30	85.96	199.4	72.4	63.18	8.63	1.2	23	5.17	0.45	5.4	1.2	1.06	1.4
	40	42.52	100.1	21.8	28.25	5.00	0.6	18	3.29	0.26	24.6	5.7	0.83	1.5
3	10	64.52	157.0	41.7	47.93	6.50	0.8	22	4.84	0.31	1.4	1.5	0.55	0.7
	20	80.70	187.4	64.5	51.26	8.89	1.2	23	5.42	0.43	6.7	1.5	0.96	1.2
	28	81.90	177.0	64.7	40.83	7.46	1.2	19	4.30	0.34	4.7	0.8	0.88	1.0
	30	86.94	207.6	75.5	41.97	10.50	1.4	23	5.74	0.49	2.8	0.6	1.12	1.1
	32	69.12	175.9	50.7	44.42	8.07	1.0	21	4.61	0.29	9.6	1.7	2.46	1.1
	40	57.74	156.9	36.0	50.28	6.25	0.8	23	4.76	0.28	14.3	3.8	1.30	1.7
2	45	46.79	122.2	28.5	33.70	5.68	0.7	20	4.17	0.23	14.8	3.7	3.41	1.9
	5	71.34	166.6	49.7	50.52	7.28	0.9	23	5.14	0.39	<0,5	1.2	0.61	0.8
	15	85.56	179.8	74.6	38.03	11.24	1.4	21	4.86	0.73	1.8	0.9	1.01	1.2
	20	86.59	177.4	76.2	40.67	8.60	1.4	21	4.89	0.38	1.8	0.7	0.78	1.1
	25	92.45	186.9	82.4	36.36	9.29	1.5	20	5.20	0.54	<0,5	0.3	0.78	1.0
	30	88.51	203.1	80.4	51.14	12.24	1.5	25	6.46	0.65	<0,5	0.3	1.02	0.9
	32	112.13	461.8	134.0	36.25	11.41	1.6	49	10.42	0.47	3.8	0.2	0.78	0.8
4	10	52.34	124.0	26.7	103.62	6.61	0.9	28	5.89	0.30	2.3	2.1	1.68	0.5
	20	53.09	137.2	29.6	104.60	6.52	0.9	26	5.64	0.29	1.7	1.9	1.44	0.4
	28	66.44	145.2	40.6	43.74	6.68	1.0	20	4.06	0.30	1.3	1.3	0.71	0.5
	30	92.47	216.9	74.6	40.19	9.01	1.5	22	5.33	0.48	<0,5	2.5	0.63	0.8
	40	87.57	201.7	81.8	40.75	9.73	1.5	20	5.58	0.47	<0,5	0.3	0.65	0.8
45	90.01	200.4	84.1	33.93	10.43	1.5	21	6.09	0.53	<0,5	0.3	0.66	0.8	

Для пелоидов получены содержания (%) пяти фракций (мм): средне-крупнопесчаной (1.0–0.25); тонко-мелкопесчаной (0.25–0.05); крупнопылеватой (0.05–0.01); мелкопылеватой (0.01–0.002); тонко-грубоглинистой (<0.002). Названия фракций приняты по классификации глинистых пород В.В. Охотина (Охотин, 1940), в основу которой положено содержание глинистой фракции (<0.002 мм) и отношение между песчаной и пылеватой (Иванов, 1990). При этом использованы результаты гранулометрического анализа со стандартным способом подготовки образца.

Таблица 2. Результаты гранулометрического анализа песчано-глинистых отложений

Table 2. Results of granulometric analysis of sandy-argillaceous deposits *

№ образца	Содержание фракций, %					Наименование отложений
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.002	<0.002 мм	
Верхняя часть, к. 2	$\frac{16.4}{16.4}$	$\frac{64.9}{63.0}$	$\frac{10.5}{8.2}$	$\frac{4.4}{2.0}$	$\frac{3.8}{10.4}$	Песок слабоглинистый (супесь легкая)
Нижняя часть, к. 2	$\frac{17.5}{15.8}$	$\frac{71.6}{68.6}$	$\frac{2.8}{3.3}$	$\frac{1.8}{0.1}$	$\frac{6.3}{12.2}$	Песок глинистый (супесь тяжелая)
Нижняя часть, к. 4	$\frac{14.0}{7.6}$	$\frac{76.1}{77.4}$	$\frac{4.9}{4.5}$	$\frac{0.7}{0.3}$	$\frac{4.3}{10.2}$	Песок слабоглинистый (супесь легкая)

*Примечание: содержание фракций – в числителе по данным гранулометрического анализа с полудисперсным (стандартным) способом подготовки образца, в знаменателе – с дисперсным способом подготовки.

*Note: the content of fractions is in the numerator according to the data of granulometric analysis with a semi-dispersed (standard) method of sample preparation, in the denominator – with a dispersed method of preparation.

Результаты гранулометрического анализа с дисперсным способом подготовки образца позволяют судить о реальной глинистости и степени агрегированности отложений. В данном случае содержание глинистой фракции во всех образцах превышает 10 % (10.2–12.2), что соответствует глине сильнопесчаной. Существенная часть глинистых частиц (37–52 %) находится в агрегированном состоянии, т.е. участвует в создании агрегатов различной размерности.

Минеральный состав отложений

Рентгенометрический анализ показал состав легкой фракции (размерность 0.25–0.05 мм): кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, карбонаты (кальцит и доломит), а также глинистые минералы (хлорит, смектит, гидрослюда, каолинит, смешанослойный минерал гидрослюда-смектит). Кварц присутствует в осадках почти повсеместно (от 25 до

В колонках 2 и 4 (к. 2 и к. 4) содержание глинистой фракции (табл. 2) в исследуемых образцах, по данным гранулометрического анализа с полудисперсным способом подготовки образца, составило (%): 3.8 (верхняя часть, к. 2), 6.3 (нижняя часть, к. 2), и 4.3 (нижняя часть, к. 4). Количество песчаной фракции во всех образцах превышает 80 %. Выделяются пески слабоглинистые (верхняя часть, к. 2; нижняя часть к. 4) и глинистые (нижняя часть к. 2).

65 %). В большинстве проанализированных проб его содержание превышает суммарный процент полевых шпатов. При среднем количестве 40 %, максимальное содержание кварцевых обломков достигает 60 %. Калиевый полевой шпат составляет 15–25 %, плагиоклаз – 10–20 %. В осадках находятся обломки кристаллических пород, углефицированные ткани растений, остатки диатомовых панцирей и спикулов губок.

В верхнем (пелоидном) слое содержится меньше кварца, кальцита и глинистых минералов, чем в нижнем (песчаном). В нижнем слое кальцит отсутствует и появляется доломит. Присутствует сульфид (пирит).

Микроструктуры минералов (по данным СЭМ)

Каолинит встречен во всех образцах верхних частей, имеет варьирующие размеры и сохранность кристаллов. В образцах

пелоидов наблюдаются отдельные кристаллы каолинита (рис. 6 а, 7 а,б) и агрегаты (рис. 6 б). Кристаллы имеют вид гексагональных пластин с четко выраженными всеми или несколькими гранями и углами шестигранника.

Контуры частиц четкие, длина варьируется от 0.08 до 4.0 мкм. Микроагрегаты каолинита имеют размер 10–40 мкм.

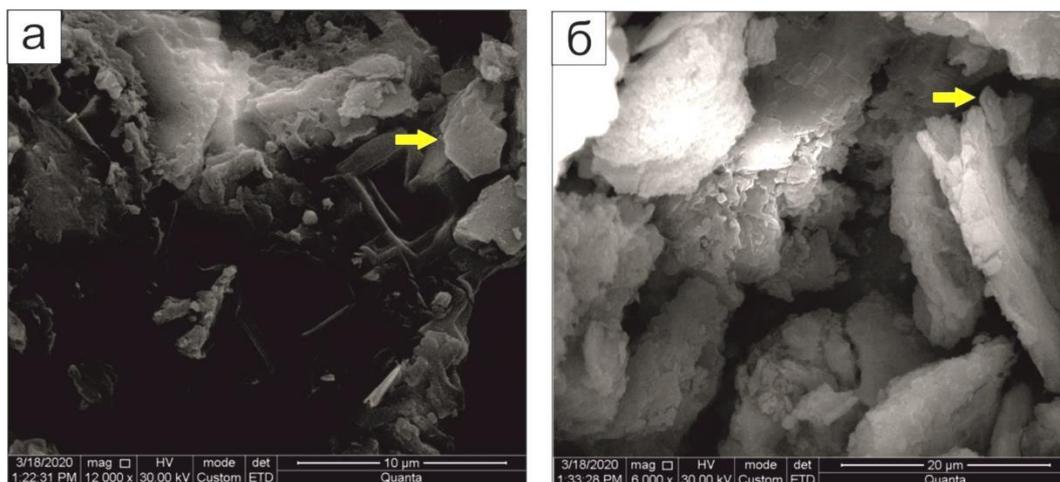


Рис. 6. Частицы каолинита в верхней части колонки 2: *а* – отдельный кристалл; *б* – агрегаты каолинита.
Fig. 6. Particles of kaolinite in the upper part of column 2: *a* – a separate crystal; *b* – kaolinite aggregates.

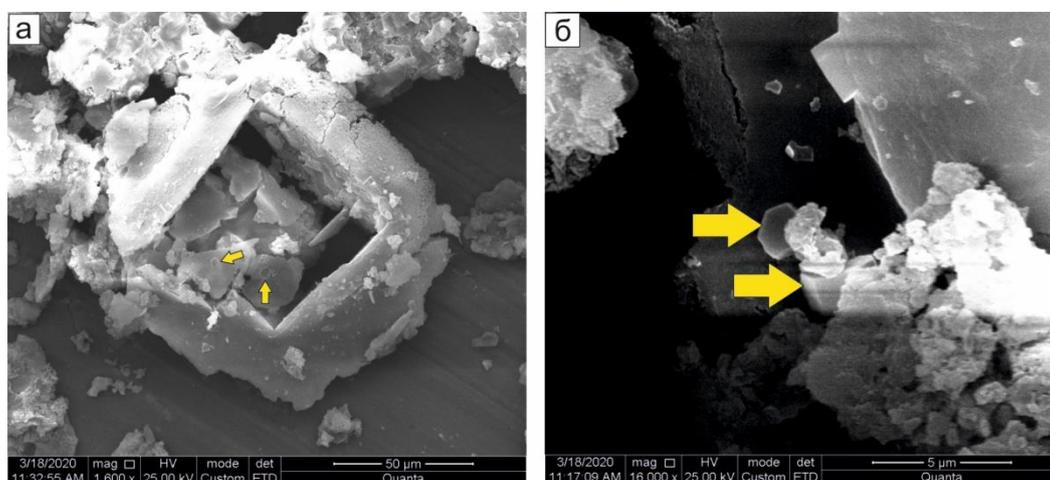


Рис. 7. Частицы каолинита в верхней части колонки 4: *а* – структура при 1600-кратном увеличении; *б* – структура при 16000-кратном увеличении.
Fig. 7. Kaolinite particles in the upper part of column 4: *a* – structure at 1600-fold magnification; *b* – structure at 16000-fold magnification.

Во всех образцах пелоидов обнаружены кристаллы хлорита. Они имеют четкие изометричные контуры и многочисленные ступени скола на базальной поверхности (рис. 8а, 9). Их длина достигает 12 мкм, толщина

составляет 0.05–1.0 мкм. Хлорит диагностируется при дополнительном исследовании с применением рентгеновского анализа или определением химического состава (рис. 8 б, в).

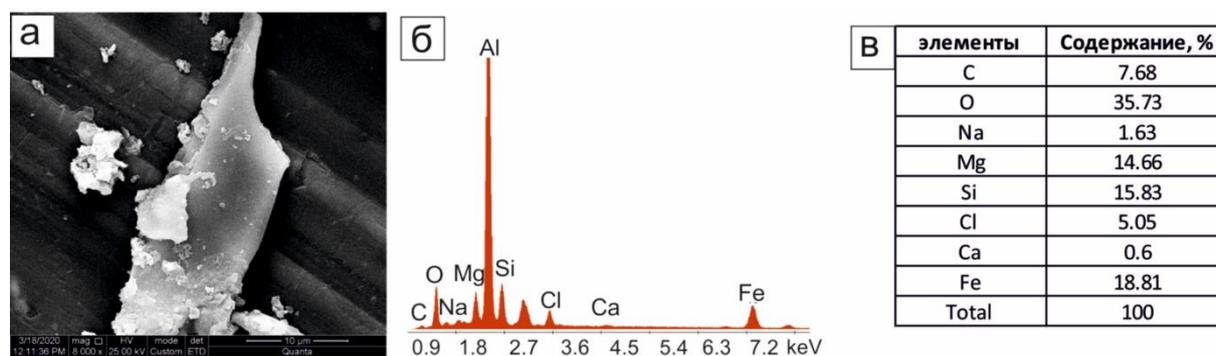


Рис. 8. Хлорит в образце нижнего слоя колонки 4: *а* – общий вид кристалла; *б* – интенсивности пиков элементов (пик алюминия связан с фоном подложки); *в* – процентные соотношения элементов.

Fig. 8. Chlorite in the sample of the lower layer of column 4: *a* – general view of the crystal; *б* – element peak intensities (the aluminum peak is related to the background of the substrate); *в* – percentage ratios of elements.

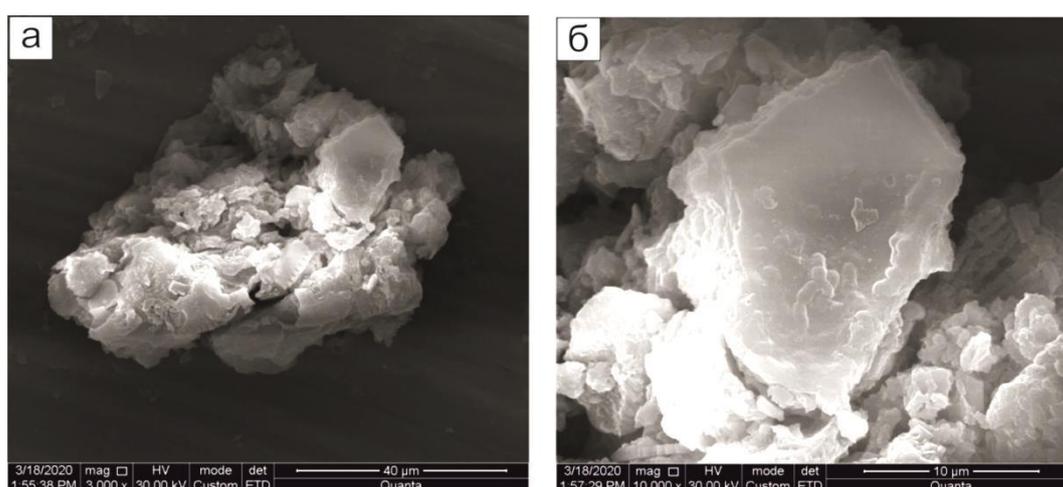


Рис. 9. Хлорит в образце верхнего слоя колонки 4: *а* – общий вид кристалла хлорита; *б* – вид при большом увеличении ($\times 10000$).

Fig. 9. Chlorite in the sample of the upper layer of column 4: *a* – general view of a chlorite crystal; *б* – view at high magnification ($\times 10000$).

Из гидрослюд минералов в пелоидах обнаружен глауконит и иллит. В отложениях нижней части колонки 2 встречаются частицы глауконита изометричнопластинчатой формы. Длина частиц изменяется от 0.2 до 1 мкм, а толщина от 0.05 до 0.1 мкм (рис. 10 а). Как правило, глауконитовые частицы находятся в агрегированном или микроагрегированном состоянии. Иллит встречаются в

верхней части колонки 2, имеет удлиненные или изометричные пластинки, реже встречается в виде частиц щепковидной формы длиной до нескольких микрон. Длина обнаруженных микрокристаллов изменяется от нескольких мкм до 0.1 мкм (рис. 10 б).

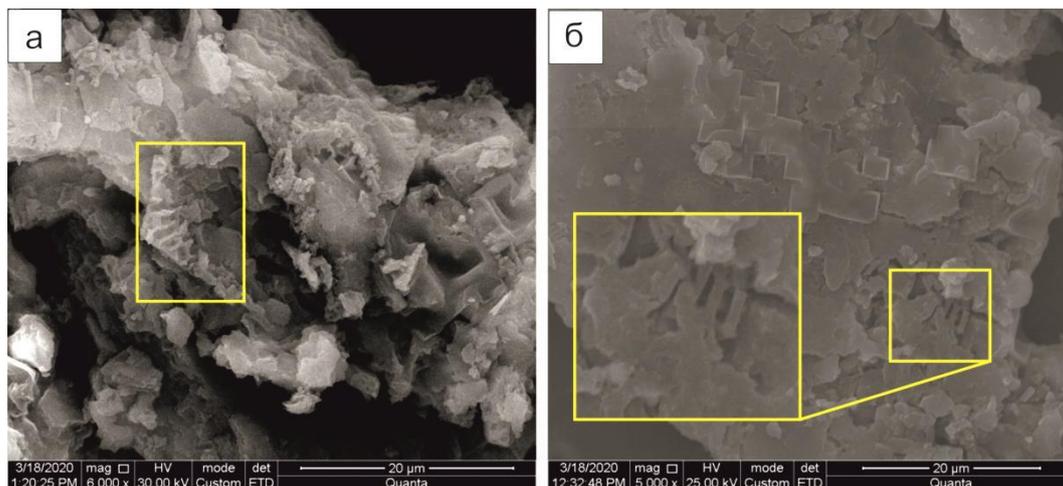


Рис. 10. Гидрослюды в отложениях колонки 2: *а* – глауконит; *б* – иллит.

Fig. 10. Hydromicas in deposits from column 2: *a* – glauconite; *b* – illite.

В образцах верхней части колонки 4 в массе также обнаружен глинистый минерал волокнистого вида, который по форме наиболее близок к сепиолиту и палыгорскиту (рис. 11). Волокна очень тонкие, поэтому

определение их состава не возможно, но видно, что длинные стороны частиц параллельны и ширина пластинок к концам уменьшается, так что это в основном сепиолит.

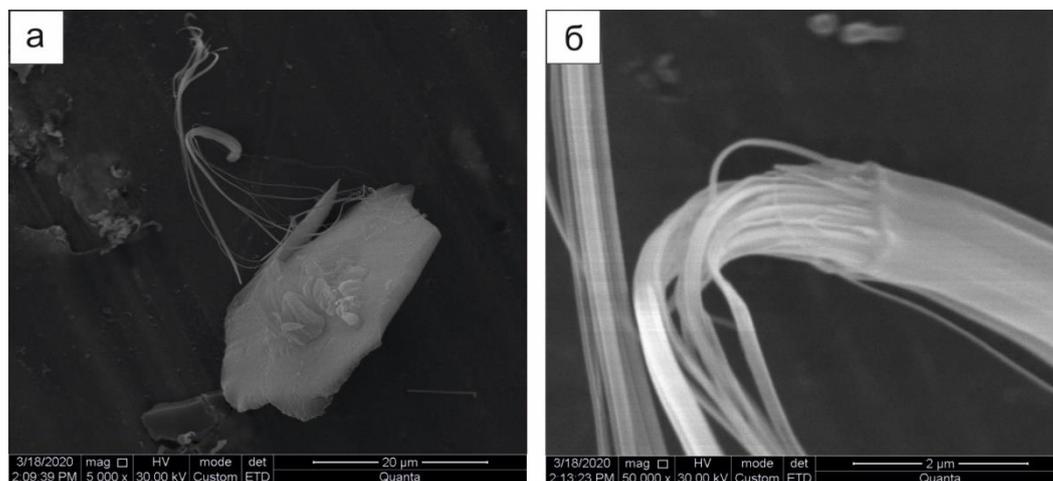


Рис. 11. Сепиолит верхней части колонки 4: *а* – общий вид, *б* – детальное строение.

Fig. 11. Sepiolite from the upper part of column 4: *a* – general view, *b* – detailed structure.

В глинистых породах представлены обломки кристаллов кварца, полевого шпата, кальцита, пирита и других минералов. На рис. 12 показаны морфологические зерна полевых шпатов. Форма зерен обычно изометричная, полуокатанная, а их размер изменяется от нескольких до сотен микрометров. На

поверхности некоторых зерен видны глинистые рубашки. На основании анализа химических элементов исследуемого образца, отметили, что содержание Са больше, чем содержание К. Таким образом, принадлежит к ряду плагиоклаза (Са-На полевые шпаты).

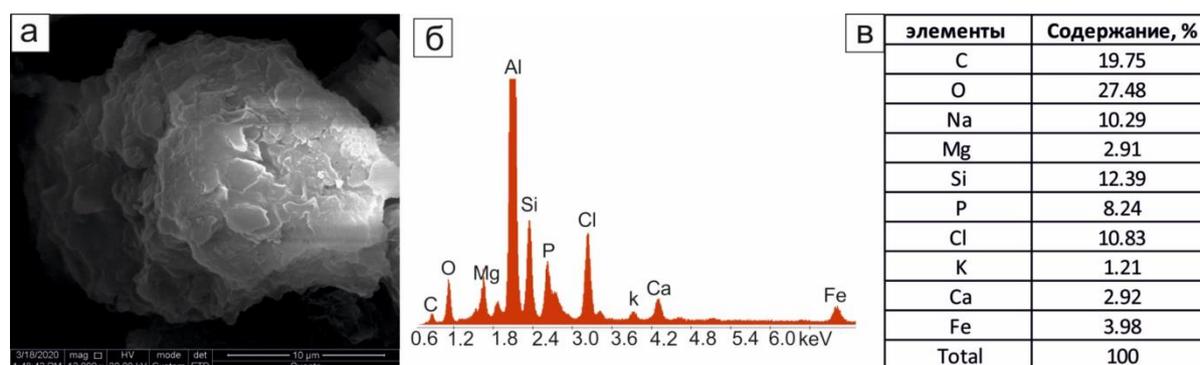


Рис. 12. Поверхность полевого шпата: *a* – общий вид кристалла и глинистой рубашки на его поверхности; *б* – интенсивности пиков элементов; *в* – процентные соотношения элементов.

Fig. 12. Surface of a feldspar: *a* – general view of a crystal and clay jackets on its surface; *б* – element peak intensities; *в* – content of elements.

Идентифицированы также микрокристаллы кальцита и доломита из карбонатных минералов. Чаще всего это колломорфные скопления тонкодисперсных кристаллов хемогенного кальцита или нитевидные

микрокристаллы аутигенного кальцита. На рис. 13 показаны зерна кальцита изометричной кубической и ромбоэдрической формы. Размер зерен от нескольких до 20 мкм.

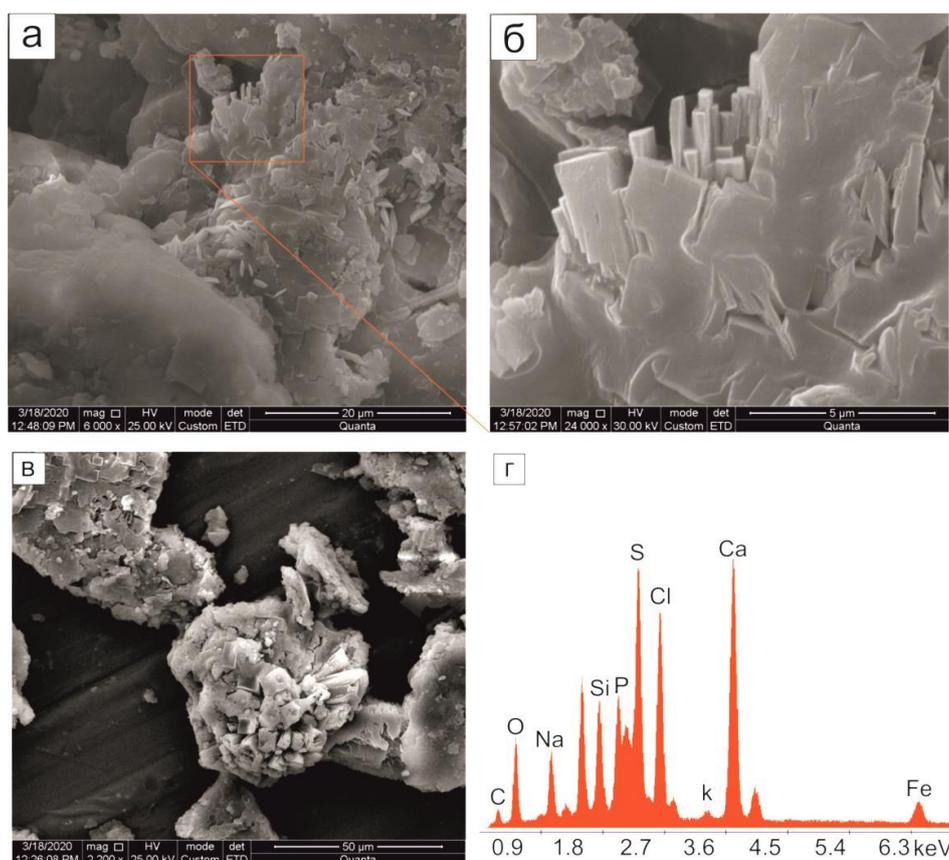


Рис. 13. Структуры карбонатных минералов: *a–б* – зерна кальцита; *в* – зерно доломита; *г* – интенсивности пиков элементов.

Fig. 13. Structures of carbonate minerals: *a–б* – calcite grains; *в* – dolomite grain; *г* – element peak intensities.

Обсуждение результатов

В изученных колонках отложений содержания $\text{FeO}_{\text{общ}}$, K_2O и TiO_2 пелоидов изменяются с глубиной сходным образом. $\text{FeO}_{\text{общ}}$, TiO_2 , K_2O и большинство микроэлементов (Be, V, Co, Ni, Ga, Rb, Y, Nb, Cs, Ba, Ta, Th,) имеют значимую обратную корреляцию с содержанием серы, а группа трех микроэлементов (Ge, W, Mo) имеет с ней значимую положительную корреляцию.

Результаты гранулометрического анализа лечебных грязей оз. Саган-Нур в Тункинской долине, позволяют судить о реальной глинистости и степени агрегированности отложений. Содержание глинистой фракции превышает 10 %. Таким образом, существенная часть глинистых частиц (37–52 %) находится в агрегированном состоянии, т.е. участвует в создании агрегатов различной размерности.

Глинистые минералы относятся к образованиям аутигенного элювиального происхождения, образовавшиеся на месте их нахождения. При исследованиях с использованием РВА и СЭМ в составе глинистых минералов определены в основном смектит, хлорит и гидрослюда (глауконит), встречен каолинит. Идентифицирован типичный аутигенный минерал – сепиолит, а также карбонатные минералы – кальцит и доломит.

Выявлены незначительные различия химического состава глинистых фаз отложений, образовавшихся в анаэробных и аэробных условиях зоны гипергенеза. Результат РВА и СЭМ свидетельствует о том, что глинистые минералы относятся к образованиям элювиального происхождения.

Благодарности

Исследования на сканирующем электронном микроскопе Quanta-200 FEI проводились Company в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИН СО РАН, г. Иркутск (оператор К. Арсентьев).

Литература

Бочуава Н. Лечебные грязи Грузии. Тбилиси: Издательский дом «Технический университет», 2009. 157 с.

Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. М.: Недра, 1990. 302 с.

Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Меленевский В.Н., Мирошниченко Л.В., Кондратьева Л.М., Бобров В.А. Геохимия диагенеза органогенных осадков на примере малых озер юга Западной Сибири и Прибайкалья // Геохимия, 2018. Т. 56, № 4. С. 363–382.

Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.

Намсараев Б.Б., Хахинов В.В., Гармаев Е.Ж., Бархутова Д.Д., Намсараев З.Б., Плюснин А.М. Водные системы Баргузинской котловины. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2007. 154 с.

Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 2013. 576 с.

Охотин В.В. Грунтоведение. Л.: Изд. Военно-трансп. Академии, 1940. 240с.

Ступникова Н.А., Мурадов С.В. Физико-химические и микробиологические исследования лечебной грязи месторождения Озеро Утинское Камчатской области // Вестник ДВО РАН, 2005. № 3. С. 76–82.

Ярг Л.А. Изменение физико-механических свойств пород при выветривании. М.: Недра, 1974. 142 с.

Baschini M.T., Pettinari G.R., Valles J.M., Aguzzi C., Cerezo P., Lopez-Galindo A., Setti M., Viseras C. Suitability of natural sulphur-rich muds from Copahue (Argentina) for use as semisolid health care products // Applied Clay Sci, 2010. V. 49 (3). P. 205–212.

Beutelspacher H., Van Der Marel H.W. Atlas of electron microscopy of clay minerals and their admixture. Elsevier publ. Amsterdam-London-NewYork, 1968. 267 p.

Cases J.M., Cunin P., Grillet Y., Poinsignon C., Yvon J. Methods of analysing morphology of kaolinities; relations between crystallographic and morphological properties // Clay minerals. March, 1986. V. 21. P. 55–68.

Goldhaber M.B. Sulfur-rich sediments // Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks. Treatise on Geochemistry, 2005. V. 7. P. 257–288.

Hubbard C.R., Snyder R.L. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRD // Powder Diffraction, 1988. V. 3. P. 74–77.

Hughes R.E., Bohor B.F. Random clay powders prepared by spray drying // Am. Mineralogist 55, 1970. №. 9–10. P. 1780–1786.

Ransom B., Helgeson G. Compositional end members and thermodynamic components of illite

and dioctahedral aluminous smectite solid solutions // *Clays and Clay minerals*, 1993. V. 41, № 5. P. 537–550.

Rasskazov S., Xie Z., Yasnygina T., Chuvashova I., Wang X., Arsentev K., Sun Y., Fang Z., Zeng Y. Geochemical and clay-mineral study of healing mud from Wudalianchi, NE China // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2017. V. 8 (3). P. 539–544. doi:[10.5800/GT-2017-8-3-0285](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0285)

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Sun Yimin, Yang Chen, Xie Zhenhua, Yasnygina T.A., Saranina E.V., Fang Zhenxing Sources of Quaternary potassic volcanic rocks from Wudalianchi, China: Control by

transtension at the lithosphere–asthenosphere boundary layer // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2016. V. 7 (4). P. 555–592. doi:[10.5800/GT-2016-7-4-0223](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0223)

Wolery T.J., Jove-Colon C.F. Qualification of thermodynamic data for geochemical modeling of mineral–water interactions in dilute systems. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2004. 413 p.

Yokokawa H. Tables of Thermodynamic Functions for Inorganic Compounds // *J. National Chemical Laboratory for Industry*, 1988. V. 83. P. 27–121.

Алокла Рияд

аспирант

*Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 24-32-80*

Университет Алеппо

*Сирия, г. Алеппо, м/р Университетский
тел.: +(963) 21 267300*

e-mail: riyad.198762@gmail.com

Alokla Riyadh

PhD student

*Irkutsk State University
Russia, 664003, Irkutsk, st. K. Marx, 1
tel.: (3952) 24-32-80*

University of Aleppo

*Syria, Aleppo, m / d University
tel.: +(963) 21 267300*

e-mail: riyad.198762@gmail.com

Чебыкин Евгений Павлович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН

664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Лимнологический институт СО РАН

Email: epcheb@yandex.ru

Chebykin Evgeny Pavlovich, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

664033 Irkutsk, st. Lermontova, d. 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS

664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limnological Institute SB RAS

Email: epcheb@yandex.ru

Рассказов Сергей Васильевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

*Иркутский государственный университет, геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии*

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии

тел.: (3952) 51–16–59

E-mail: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilievich

doctor of geological and mineralogical sciences, professor

664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS

Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies

tel.: (3952) 51–16–59

E-mail: rassk@crust.irk.ru

Ясныгина Татьяна Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник

тел.: (3952) 51–16–59

Email: ty@crust.irk.ru

Yasnygina Tatyana Alexandrovna

candidate of geological and mineralogical sciences

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher

tel.: (3952) 51–16–59

Email: ty@crust.irk.ru

Акулова Варвара Викторовна

кандидат геолого-минералогических наук,

старший научный сотрудник

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,

тел.: (3952) 51-16-59

e-mail: akulova@crust.irk.ru

Akulova Varvara Viktorovna

candidate of geological and mineralogical sciences,

Senior Researcher

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,

tel.: (3952) 51-16-59

e-mail: akulova@crust.irk.ru

Чувашова Ирина Сергеевна

кандидат геолого-минералогических наук

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

доцент

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,

старший научный сотрудник

тел.: (3952) 51–16–59

E-mail: chuvashova@crust.irk.ru

Chuvashova Irina Sergeevna

candidate of geological and mineralogical sciences

664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

assistant professor

664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Senior Researcher

tel.: (3952) 51–16–59

E-mail: chuvashova@crust.irk.ru

Йи-минь Сунь

научный сотрудник

Институт природных ресурсов и экологии Хэйлуницзянской академии наук, Харбин, Китай

e-mail: 894817259@qq.com

Yi-ming Sun

Researcher

Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China

e-mail: 894817259@qq.com
