

Литогеохимические характеристики высокосернистых лечебных грязей оз. Нуху-Нур (Иркутская область): сопоставление с лечебными грязями мира

Т.А. Ясныгина¹, С.В. Рассказов^{1,2}, Е.П. Чебыкин^{1,3}, Т.С. Филева¹,
Е.В. Саранина^{1,4}, Йи-минь Сунь⁵

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

⁴Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

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

Аннотация. В лечебных грязях (пелоидах) оз. Нуху-Нур определены содержания петрогенных оксидов, микроэлементов и минеральных фаз по седиментационным колонкам, взятым в центральной и прибрежных частях озера. В центре озера чередуются слои с высоким и пониженным содержанием общей серы ($S_{\text{общ}}$) и S^{2-} . Сера входит в состав сульфатов: гипса, тенардита, гексагидрита. Распределение $S_{\text{общ}}$ коррелируется с Na_2O , CaO , Sr и U при сильной отрицательной корреляции с другими петрогенными оксидами и микроэлементами. Вблизи берегов озера присутствуют слои, обогащенные и обедненные CaO , который коррелируется со Sr . Литогеохимические характеристики пелоидов свидетельствуют о концентрации лечебных компонентов в донных отложениях озера в результате процессов, подобных выветриванию пород кислого состава в условиях аридного климата. По соотношениям петрогенных оксидов и микроэлементов пелоиды оз. Нуху-Нур в целом сопоставимы с пелоидами Удаляньчи (Северо-Восточный Китай), приморских районов Бразилии, а также Грузии и Испании, но наиболее близки лечебным высокосернистым сульфатным грязям Коплахуэ Аргентины.

Ключевые слова: пелоиды, лечебные грязи, ИСП-МС, петрогенные оксиды, микроэлементы, сера, сульфиды, сульфаты.

Lithochemochemical signatures of high-sulfur therapeutic mud from Nuhu-Nur Lake (Irkutsk region): comparison with the therapeutic mud of the world

T.A. Yasnygina¹, S.V. Rasskazov^{1,2}, E.P. Chebykin^{1,3}, T.S. Fileva¹,
E.V. Saranina^{1,4}, Yi-min Sun⁵

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

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

Abstract. In therapeutic mud (peloids) of Lake Nuhu Nur, major oxides, trace elements, and mineral phases are determined from sedimentary columns taken in the central and near-coastal parts of the lake. In the center of the lake, layers with high and low contents of total sulfur (S_{tot}) and S^{2-} alternate. Sulfur is part of sulfates: gypsum, tenardite, and hexahydrite. The distribution of S is generally correlated with Na_2O , CaO , Sr , and U with a strong negative correlation with other major oxides and trace elements. In near-coastal parts of the lake, there are layers enriched and depleted with CaO , which strongly correlates with Sr . Lithochemochemical signatures of peloids show concentration of therapeutic components in the bottom sediments of the lake due to processes similar to weathering of rocks of

silicic composition in arid climate. In terms of major oxides and trace elements, peloids from Lake Nuhu Nur are generally comparable to those from Wudalianchi (Northeast China), coastal regions of Brazil, as well as Georgia and Spain, but are closest to therapeutic high-sulfur sulfate mud of Kopahue in Argentina.

Keywords: *peloids, therapeutic mud, ICP-MS, major oxides, trace elements, sulfur, sulfides, sulfates.*

Введение

Грязелечение – древний метод, используемый в ревматологии, дерматологии, косметологии, гастроэнтерологии и других областях медицины, проверенный на практике. Полезные свойства различных типов лечебных грязей (пелоидов, глинистых отложений в соединении с минеральными водами), используемых и в народной, и в официальной медицине, связаны с реологическими, минералогическими характеристиками, химическим составом и бактериальным компонентами. Пелоиды характеризуются комплексом физико-химических свойств – вязкостью, теплоемкостью, содержанием сероводорода, силикатов, карбонатов, сульфатов, степенью и видом минерализации водной фазы, кислотностью (рН) и окислительно-восстановительным потенциалом (Eh) среды, содержанием органических веществ и фармакологически активных микроэлементов (Ступникова, Мурадов, 2005; Намсараев и др., 2007; Бокучава, 2009; Леонова и др., 2018; Baschini et al., 2010). Пелоиды, используемые для грязелечения, обладают высокой теплоемкостью, абсорбционной и адгезионной способностью, высокой биологической активностью, вследствие чего элементы и их соединения, содержащиеся в грязях, способны легко проникать в организм. Изучение химического и минерального состава пелоидов может способствовать пониманию процессов их формирования и воздействия на организм человека.

Лечебные грязи нередко имеют высокие содержания серы в виде сульфатов, сульфидов и сероводорода, а также тиолов (сернистых аналогов спиртов) и других органических соединений. Формы присутствия серы в грязях регулируются жизнедеятельностью бактерий, перерабатывающих одни виды соединений серы в другие. Распространены сульфатредуцирующие бактерии, в своем жизненном цикле потребляющие сульфаты и

переводящие их в сульфиды (Заварзин, Колотилова, 2001; Goldhaber, 2005). В грязелечении широко используются также пелоиды с низким содержанием серы. Примером служат лечебные грязи вулканического поля Удаляньчи, СВ Китай, которые применяются для лечения кожных заболеваний на одноименном курорте и для приготовления косметических масок (Rasskazov et al., 2017).

Малые озера Западного Прибайкалья изучались с точки зрения состава, содержания органических компонентов и других характеристик. В органических осадках (сапропелевых илах) озер юга Западной Сибири и, в меньшей степени, Бурятии (озера Духовое, Котокель) установлен восстановительный тип диагенеза, в ходе которого происходит деструкция органического вещества при участии сульфатредуцирующих микроорганизмов с уменьшением содержания SO_4^{2-} в поровых водах вниз по разрезу и с образованием аутигенного пирита (Леонова и др., 2018). Изучались закономерности образования карбонатных и глинистых минералов, химический состав, микроэлементы и стабильные изотопы донных осадков озера Цаган-Тырма и других малых озер Приольхонья в связи с исследованиями палеоклимата голоцена (Скляров и др., 2010; Гаськова и др., 2011; Страховенко и др., 2015). Было установлено, что геохимические особенности состава воды в малых озерах оказывают существенное влияние на процесс образования ассоциаций карбонатных минералов (Солотчина и др., 2015).

Объект нашего исследования – лечебные грязи оз. Нуху-Нур (Нуха-Нур). Месторождение находится в Баяндаевском районе Иркутской области и является базовым для санатория Нагалык, а также для санатория Ангара в г. Иркутске. Пелоиды используются для лечения болезней костно-мышечной системы и соединительной ткани.

Цель настоящей работы – изучить состав и определить основные минеральные фазы

пелоидов из центральной и прибрежных частей озера и сравнить полученные литогеохимические данные с данными по пелоидам мира для обозначения лечебные грязей, наиболее близких к нухунурским.

Общая характеристика и предшествующие исследования оз. Нуху-Нур

Озеро находится в воронке глубиной 18–20 м. В 2019 г. измерение в Google Earth показало максимальное расстояние от кромки до кромки воронки 215 м и максимальную длину озера (азимут ВСВ 247°) 93–94 м. В юго-западной расширенной части озера измерено расстояние 66–67 м (азимут ССЗ 341°) при поперечнике воронки 175 м. Периметр озера составляет 269 м, площадь – 5232 м².

В 1959 г. диаметр озера оценивался в 60–75 м, наибольшая глубина – в 3.3 м. Площадь водной поверхности не превышала 3000 м² (Крутикова, Кауров, 1963). В 1963–1965 гг. диаметр озера оценивался в 75–90 м, глубина в центре составляла около 6 м, а площадь водной поверхности – около 5300 м² (Шпейзер и др., 1970).

Если предшествующие оценки были корректными, через 60 лет после первичных наблюдений озеро могло несколько расширяться. Соответственно, вода перекрыла прежде существовавшие берега. В прибрежных частях озера (на расстоянии 2–3 м от берега) за это время накопилось какое-то количество осадков на отложениях прежде существовавших берегов.

В днище воронки была пройдена скважина, вскрывшая неогеновые и юрские песчано-глинистые отложения. До глубины 20 м задокументированы сильно перемятые легкие диатомиты, ниже – водоносные пески с прослоями глин, а затем, до глубины 145 м, – горизонтально залегающие юрские песчаники. В районе озера развита островная многолетняя мерзлота, поэтому происхождение воронки связывалось с термокарстовыми процессами. В воде озера определено возрастание минерализации с глубиной от 98 до 180 г/дм³ и увеличение концентрации сероводорода от 396 до 960 мг/дм³. Высокое содержание сероводорода определено также в составе иловых отложений. Кроме того, установлено

сернистое железо и растворимые соли. Из общего анализа материалов сделан вывод о том, что химический состав воды озера формировался благодаря 1) подтоку минерализованных сульфатных подземных вод, 2) активной деятельности серных бактерий и 3) интенсивному испарению воды озера при отсутствии поверхностного стока (Крутикова, Кауров, 1963).

Дополнительное изучение озера, проводившееся в 1963–1965 гг. (Шпейзер и др., 1970), выявило сравнительно слабую минерализации поверхностной воды озера (5 г/дм³) и возрастание суммы ионов на глубине 3 м до 80 г/дм³, а на глубине 5.15 м – до 254.14 г/дм³. Отмечались разные формы серы. Измерялась величина Eh с переходом на глубину от кислородсодержащей к бескислородной зоне. В придонной части определены резко восстановительные условия, измерен потенциал сульфидосеребряного электрода равный – 825 мВ. В лечебных грязях прибрежных частей и центра озера определены содержания сероводорода (0.048–0.134 г на 100 г грязи) и закисного железа (0.68 г на 100 г грязи).

Предварительные результаты выполненного нами исследования были представлены в коротком сообщении (Ясныгина и др., 2019).

Методика изучения пелоидов

На озере было отобрано пять колонок мягких донных осадков. Из центральной части озера материал пелоидов отбирался со льда через прорубь с глубины 5.5 м. При проходке донных сапропелевых илов пробоотборная пластиковая трубка встретила твердое дно на глубине 2.2 м.

Четыре других колонки отобраны на расстоянии 2–3 м от берега с южной (НН-17-1), западной (НН-17-2), северной (НН-17-3) и восточной (НН-17-4) сторон озера (рис. 1). Краевая колонка НН-17-1 (координаты: 53° 09.020' с. ш., 105° 19.907' в. д., абсолютная высота 693 м) на глубине озера около 0.5 м имела длину около 40 см. Краевая колонка НН-17-2 (координаты: 53° 09.028' с. ш., 105° 19.852' в. д., абсолютная высота 693 м) на такой же глубине озера составила 0.65 м. Краевая колонка НН-17-3 на такой же глубине

озера имела длину 0.8 м, а краевая колонка
НН-17-4 – длину 0.45 м.

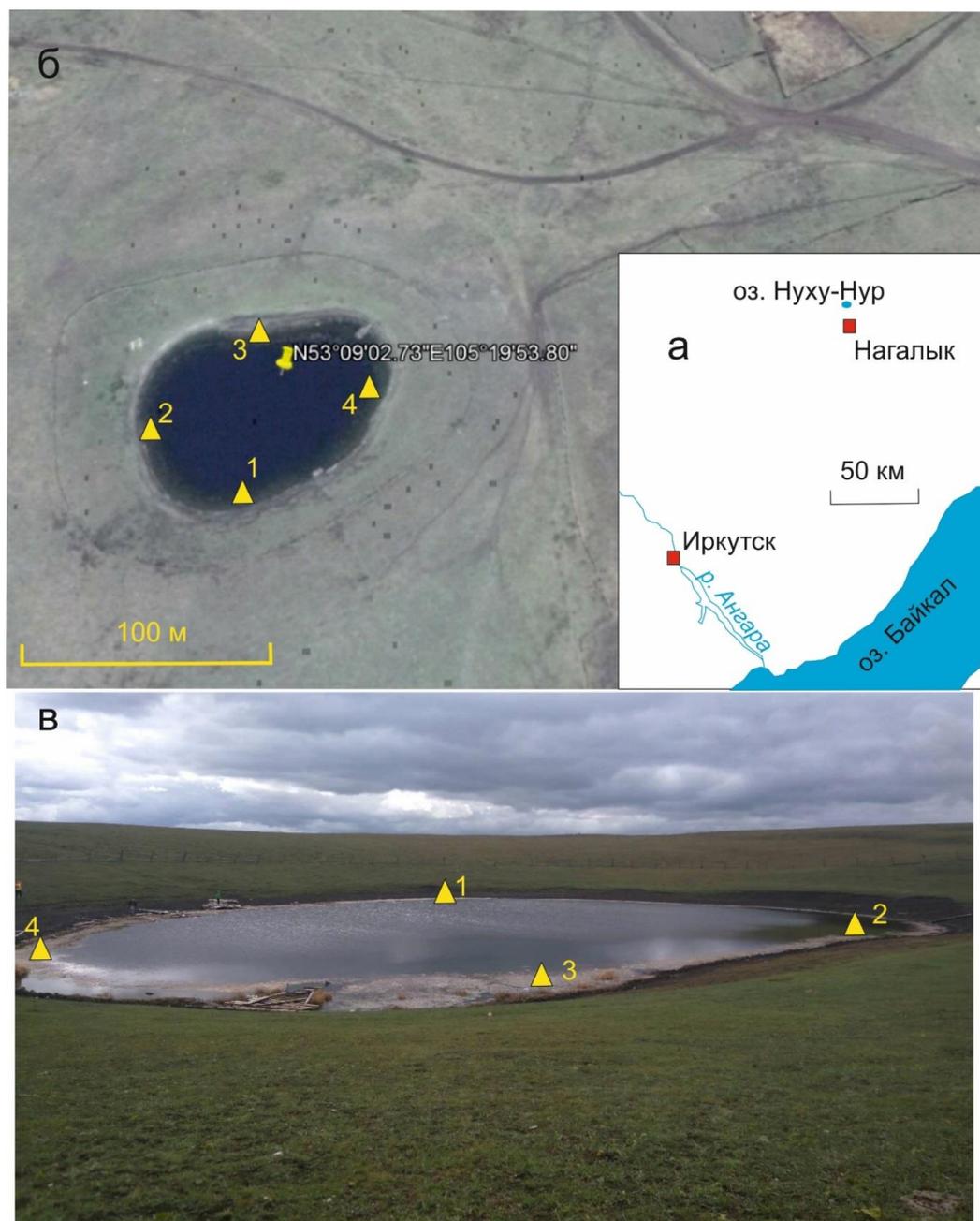


Рис. 1. Местоположение курорта Нагалык (а), схема отбора центральной и краевых (прибрежных) колонок лечебных грязей (б) и фотография оз. Нуху-Нур с местоположением краевых колонок, вид с севера (в).

Fig. 1. Location of the Nagalyk resort (а), sampling scheme of the central and marginal (near-coastal) columns of therapeutic mud (б), and a photograph of Lake Nuhu Nur with locations of columns, view from the north (в).

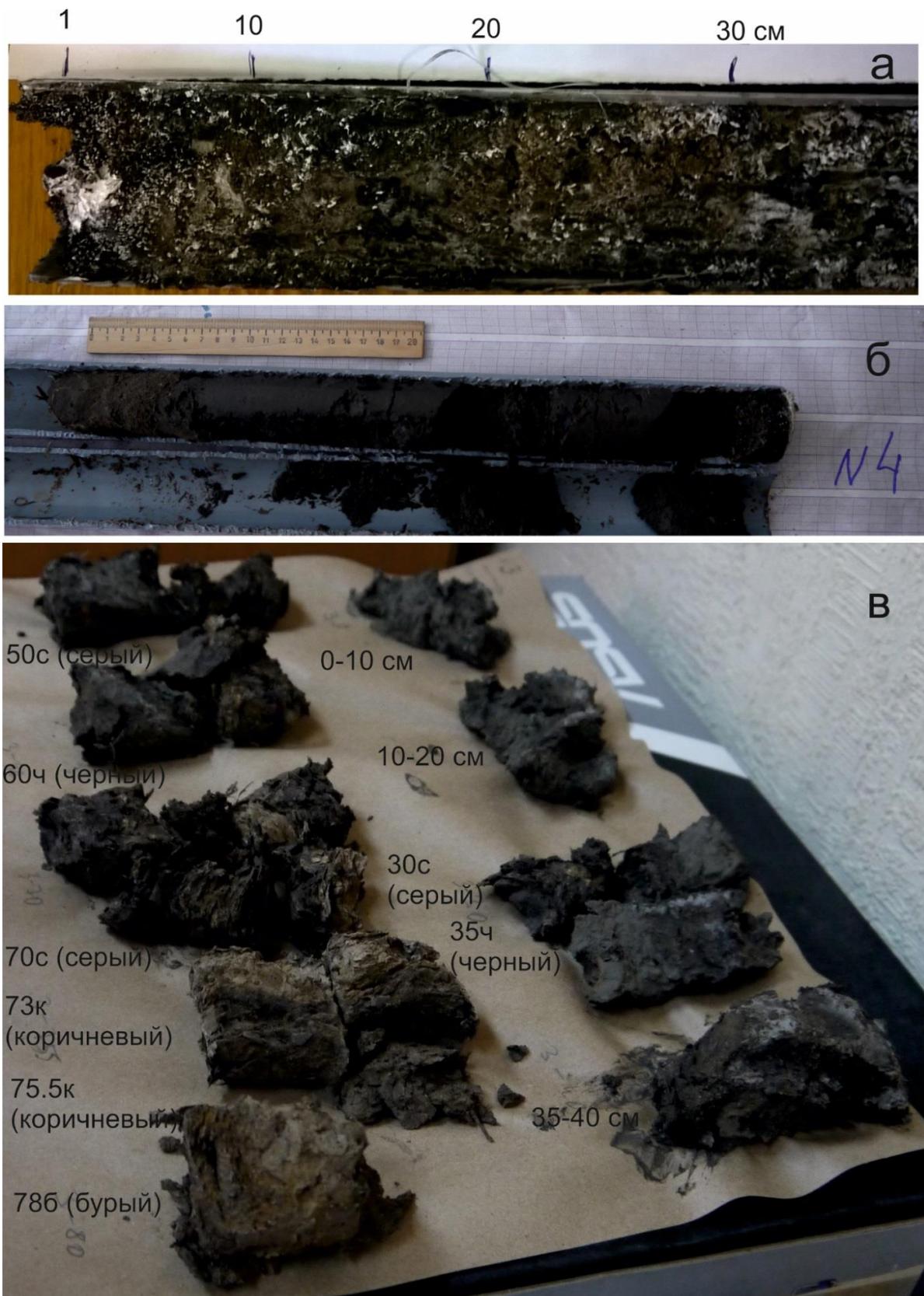


Рис. 2. Фотографии верхней части высушенной центральной колонки (а), вскрытой влажной краевой колонки NN-17-4 (б) и высушенного осадочного материала краевой колонки NN-17-3 (в).

Fig. 2. Photographs of the upper part of dried central column (a), opened wet edge column NN-17-4 (b), and dried sedimentary material of marginal column NN-17-3 (c).

Центральная колонка представлена черным материалом сапропелевых илов. При высушивании материала выкристаллизовываются белые сульфаты (рис. 2а). В средней и нижней частях колонки (~60 см и ниже) чередуются полосы темного и светлого материала. Последний содержит частично переработанные остатки травянистых растений. В высушенном состоянии грязь, начиная с глубины ~50 см, становится более плотной, имеет сильный запах сероводорода.

В пелоидах краевых колонок цвет во влажном состоянии варьирует от черного до коричневого. Распространены остатки травянистых растений. В краевой колонке НН-17-4 верхний слой (8–9 см) особенно насыщен остатками травы. Ниже находится ненарушенный (во влажном состоянии черный) пеллоид (рис. 2б). Северный край озера наиболее доступен для отбора материала, поэтому первичная слоистость в отобранной здесь краевой колонке 3 нарушена. Ее верхняя часть (до 50 см) сложена серым (во влажном состоянии) пеллоидом, включающем на глубине около 40 см белый кристаллический материал (сульфаты). На глубине 50–60 см материал становится черным, затем снова серым, а на глубине 70–80 см идет прослаивание черного и светло-коричневого материала (рис. 2в).

Пеллоиды верхней части центральной колонки до 137 см и краевой колонки 3 с целью разделения на интервалы предварительно анализировали методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на портативном спектрометре Tracer-III SD. Образцы центральной колонки, отобранные с интервалом 2–5 см, высушивали и анализировали комплексом методов классической мокрой химии и масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Отложения из краевых колонок высушивали и анализировали теми же методами с интервалами отбора проб 3–10 см в соответствии со слоистостью по цветам. Минеральный состав образцов центральной колонки и краевой колонки 3 исследовали методом рентгенофазового (рентгеноструктурного) анализа (РСА).

Подготовку проб для анализа на содержание микроэлементов методом ИСП-МС проводили в лаборатории изотопии и геохронологии ИЗК СО РАН кислотным разложением

(HF и HNO₃) в тefлоновых контейнерах под воздействием микроволнового излучения. Детали методики описаны в работе (Ясныгина и др., 2015). Измерения выполняли на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se и на масс-спектрометре с высоким разрешением Element II в ЦКП. При работе на масс-спектрометре Agilent 7500se применяли два внутренних стандарта: In и Bi. Поправку для каждого элемента рассчитывали путем интерполяции. На приборе Element II в качестве внутреннего стандарта использовали Rh. Для градуировки использовали многоэлементные стандартные растворы High-Purity Standards. Правильность анализа контролировали с помощью стандартных образцов VIR-1a, BHVO-2, DNC-1a, AGV-2, JA-2, ДВБ, ЗУК-2. Петрогенные оксиды определяли комплексом методов классической «мокрой химии» в ИЗК СО РАН (Сизых, 1985).

Фазовый состав образцов исследовали рентгеноструктурным методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.0, излучение – CuK α , Ni – фильтр, V = 25 кВ, I = 20 мА, в диапазоне 3 – 55° 2 θ , шаг сканирования – 0.05°. Для расшифровки фазового состава использовали программу поиска фаз Diffrac^{plus} PDF-2. Для определения глинистых минералов осуществляли подготовку ориентированного материала пробы осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке, прогреванием при температуре 550 °С в течение 3 часов и насыщением этиленгликолем. Количественное соотношение компонентов рассчитывали по корундовым числам методом RIR. Для глинистых минералов полученные соотношения фаз носят приближенный характер.

При обработке полученных данных и сопоставлениях проводились расчеты методом главных компонент в программе STATISTICA (версия 12).

Результаты

Петрогенные оксиды

Центральная колонка обнаруживает скрытую слоистость пеллоидов, отражающуюся в вариациях содержаний серы, петрогенных оксидов и микроэлементов. Ее верхняя часть (до глубины 145 см) условно подразделяется

на интервалы с высоким и низким содержанием серы (в см): с высоким – интервалы 0–2, 26–46, 82–96, 130–145; с низким – интервалы 2–26, 46–82, 97–130 (рис. 3, табл. 1). В более глубокой части колонки вариации концентрации серы в пелоидах менее выражены, но происходят чаще.

В пелоидах 2-сантиметрового слоя самой верхней части колонки содержание общей серы достигает максимума (14.47 мас. %). Содержание Na_2O также высокое (21.39 мас. %), а содержания SiO_2 , MgO , K_2O , MnO , CO_2 , CaO и других оксидов – низкие. При

повышенной концентрации $\text{S}_{\text{общ}}$ (до 9.7 мас. %) в пелоидах третьего, пятого и седьмого интервалов содержания CaO повышаются (6.99–18.39 мас. %), а содержания кремнезема и общего железа остаются низкими (SiO_2 до 25.95 мас. %, $\text{FeO}_{\text{общ}}$ 1.62–2.73 мас. %). Во втором, четвертом и шестом интервалах пелоиды имеют сравнительно низкое содержание $\text{S}_{\text{общ}}$ (от 2.7 до 6.4 мас. %). Содержание CaO также сравнительно низкое (5.15–15.28 мас. %) при возрастании содержания SiO_2 (до 36.71 мас. %) и общего железа $\text{FeO}_{\text{общ}}$ (до 3.96 мас. %).

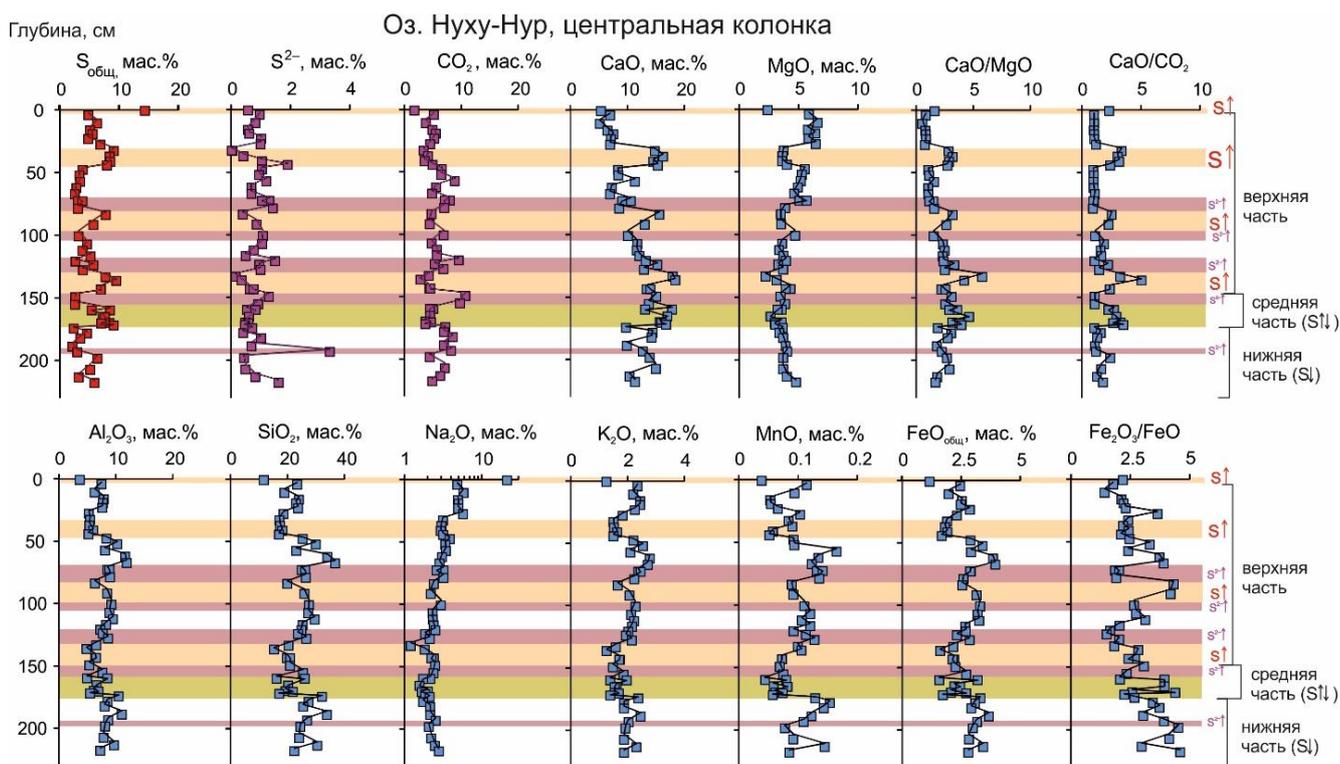


Рис. 3. Содержания $\text{S}_{\text{общ}}$, S^{2-} , петрогенных оксидов (мас. %) и отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, CaO/MgO и CaO/CO_2 в пелоидах центральной части оз. Нуху-Нур в зависимости от глубины отбора проб. Символ $\text{S}\uparrow$ обозначает слои верхней части разреза, обогащенные общей серой, символ $\text{S}\uparrow\downarrow$ – средний слой с меняющейся концентрацией общей серы от пониженной до повышенной, символ $\text{S}\downarrow$ – нижний слой с преобладающей пониженной концентрацией общей серы. Отношения $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, CaO/MgO рассчитаны по содержаниям оксидов в мас. %, отношение CaO/CO_2 – по содержаниям оксидов в мольных %.

Fig. 3. Contents of S_{tot} , S^{2-} , major oxides (wt. %) and the ratios $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, CaO/MgO , and CaO/CO_2 in peloids from the central part of Lake Nuhu Nur versus depths of sampling. Symbol $\text{S}\uparrow$ denotes layers of the upper part of the section enriched with total sulfur, symbol $\text{S}\uparrow\downarrow$ is the middle layer with a variable concentration of total sulfur from reduced to increased, symbol $\text{S}\downarrow$ is the lower layer with a predominantly low concentration of total sulfur. The ratios $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, CaO/MgO are calculated from oxide contents in wt %, the CaO/CO_2 ratio is presented for the oxides in mole %.

Таблица 1

Средние значения и диапазоны содержаний серы и петрогенных оксидов, средние содержания микроэлементов по интервалам глубины отбора пелоидов центральной колонки оз. Нуху-Нур

Table 1

Average values and ranges of sulfur and major oxides contents, average trace element concentrations at depth intervals of peloids in the central column of Lake Nuhu-Nur

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
Глубина отбора, см	от-0-2	2-26	26-46	46-70	70-82	82-96	97-120
Число проб	1	5	5	5	3	2	4
SiO ₂ , мас. %	11.75	22.65 18.96-24.06	17.73 17.07-18.69	29.83 23.12-36.71	25.92 25.04-26.49	22.97 19.98-25.95	27.46 25.33-29.56
TiO ₂	0.17	0.34 0.28-0.37	0.24 0.23-0.26	0.44 0.35-0.53	0.38 0.36-0.39	0.37 0.32-0.42	0.42 0.38-0.45
Al ₂ O ₃	3.70	7.43 6.30-7.76	5.49 5.21-6.06	10.07 8.13-11.92	8.82 8.55-8.99	7.43 6.35-8.50	9.00 8.32-9.53
Fe ₂ O ₃	0.87	1.76 1.23-2.15	1.50 1.23-1.98	2.80 2.22-3.42	1.97 1.83-2.07	2.52 2.26-2.78	2.43 1.93-2.68
FeO	0.40	0.90 0.84-0.96	0.60 0.55-0.62	0.89 0.86-0.93	1.03 0.97-1.10	0.60 0.53-0.67	0.93 0.86-0.98
MnO	0.039	0.077 0.05-0.12	0.078 0.052-0.104	0.12 0.092-0.165	0.14 0.13-0.14	0.091 0.090-0.092	0.11 0.11-0.12
MgO	2.40	6.10 5.78-6.60	4.30 3.62-6.46	5.11 4.62-5.54	4.87 3.87-5.68	3.52 3.51-3.53	3.85 3.36-4.71
CaO	5.39	6.66 5.15-7.55	13.59 6.99-16.25	8.47 6.97-11.33	9.43 8.57-10.62	14.33 13.06-15.60	11.41 10.10-12.13
Na ₂ O	21.39	5.11 4.83-5.81	3.61 2.96-5.75	3.32 2.85-3.87	3.00 2.61-3.20	2.30 2.20-2.40	2.50 2.32-2.97
K ₂ O	1.26	2.34 2.20-2.45	1.60 1.51-1.83	2.47 2.10-2.78	2.36 2.24-2.46	1.87 1.66-2.07	2.20 2.13-2.28
P ₂ O ₅	0.09	0.16 0.15-0.17	0.16 0.14-0.19	0.19 0.18-0.21	0.21 0.19-0.22	0.20 0.20	0.20 0.18-0.22
H ₂ O ⁻	3.69	7.23 6.57-8.58	8.80 7.18-9.49	4.17 2.84-5.05	5.68 4.90-6.29	7.18 6.17-8.20	5.42 3.57-7.25
H ₂ O ⁺	8.51	21.88 17.67-26.00	20.07 18.43-24.18	20.51 17.93-24.70	18.91 15.76-22.83	13.65 13.11-14.20	18.67 15.08-22.35
CO ₂	1.82	4.98 3.82-5.58	4.16 3.44-5.01	6.52 4.92-8.91	7.40 7.04-8.00	4.67 4.50-4.83	5.83 4.87-6.96
SO ₃	36.18	13.56 12.25-15.98	20.69 17.40-23.04	8.26 6.64-9.99	8.60 7.94-9.85	17.04 14.46-19.62	10.80 3.07-5.27
Сумма	97.66	101.17 99.97-103.5	102.62 101.4-104.1	103.19 101.2-104.3	98.72 97.87-99.62	98.73 98.66-98.80	101.23 98.70-103.7
S _{общ}	14.47	5.42 4.9-6.4	8.28 8.0 -9.2	3.30 2.7-4.0	3.44 3.2-3.9	6.82 5.8 -7.9	4.32 2.8-5.3
S ²⁻	0.58	0.80 0.6-1.0	0.88 1.03-1.90	0.91 0.7-1.2	1.25 1.1-1.4	0.64 0.4 -0.9	0.85 0.5-1.1
Li, мкг/г	16	41	51	49	40	28	38
Be	0.6	1.2	1.0	1.4	1.3	1.0	1.3
Sc	2.4	7.6	5.3	7.5	7.1	8.0	7.1
V	20.1	49.1	36.1	61.4	57.9	39.0	57.7
Cr	18.2	40.1	41.8	54.1	46.4	36.0	48.4
Co	3.8	7.7	6.7	9.5	8.4	7.7	9.1
Ni	13.4	22.9	20.9	29.0	25.3	22.8	27.1
Zn	10	36	46	33	29	15	41
Ga	3.9	10.0	7.2	12.4	10.7	8.3	11.4
Ge	<0.1	0.5	0.5	0.5	0.3	1.3	0.4
Rb	20.2	46.9	34.7	58.0	50.8	38.1	55.0
Sr	916	474	1510	672	698	755	888
Y	3.9	9.4	7.1	11.3	10.0	8.0	10.6
Zr	19.4	47.0	37.4	53.1	48.6	38.4	48.5
Nb	2.0	4.9	3.8	5.8	5.0	4.3	5.4
Sb	3.3	1.0	0.9	0.2	0.3	1.7	0.7
Cs	1.3	3.0	2.1	3.5	3.1	2.8	3.3

Ba	118	289	214	314	329	214	307
La	5.98	14.1	10.3	16.8	14.8	11.4	16.1
Ce	12.0	28.2	20.6	33.7	29.6	22.5	31.6
Pr	1.46	3.26	2.40	3.85	3.37	2.61	3.60
Nd	5.36	12.1	8.69	14.6	12.7	9.65	13.6
Sm	1.03	2.36	1.66	2.83	2.47	1.62	2.66
Eu	0.25	0.52	0.39	0.64	0.55	0.41	0.61
Gd	0.90	2.04	1.48	2.48	2.16	1.63	2.43
Tb	0.14	0.31	0.22	0.38	0.35	0.22	0.37
Dy	0.83	1.89	1.37	2.26	2.01	1.40	2.16
Ho	0.16	0.36	0.26	0.43	0.39	0.30	0.40
Er	0.43	0.99	0.74	1.24	1.11	0.86	1.16
Yb	0.42	0.92	0.69	1.16	1.01	0.78	1.06
Lu	0.06	0.13	0.10	0.17	0.15	0.11	0.16
Hf	0.62	1.45	1.09	1.67	1.49	1.15	1.52
Ta	0.16	0.44	0.32	0.50	0.44	0.33	0.45
Pb	2.2	8.8	8.4	11.4	9.5	3.7	10.2
Th	1.87	4.44	3.30	5.58	4.78	3.56	5.13
U	1.31	0.97	3.17	1.32	1.43	1.93	2.18

Окончание табл. 1
End of Table. 1

№ п/п	8	9	10	11	12	13	14
Глубина бора, см	от- 120–130	130–145	145–158	158–173	173–191	191–196	196–220
Число проб	3	4	2	7	4	1	4
SiO ₂ , мас. %	25.11 23.17–26.66	19.15 15.32–20.98	23.19 20.93–25.45	20.17 16.22–32.16	29.76 24.14–33.82	26.88	25.41 22.46–30.51
TiO ₂	0.35 0.34–0.37	0.28 0.27–0.31	0.32 0.28–0.36	0.30 0.22–0.42	0.45 0.36–0.52	0.38	0.39 0.34–0.46
Al ₂ O ₃	7.90 7.30–8.66	6.11 4.89–6.59	6.52 5.36–7.68	6.47 4.97–8.57	9.56 8.07–11.06	8.69	8.25 7.29–9.71
Fe ₂ O ₃	1.78 1.49–2.06	1.54 1.30–1.75	1.95 1.85–2.05	1.90 1.15–2.78	2.68 2.52–3.00	2.75	2.62 2.49–2.78
FeO	1.04 1.00–1.10	0.66 0.46–0.83	0.74 0.61–0.88	0.60 0.55–0.71	0.85 0.68–0.99	0.71	0.67 0.55–0.94
MnO	0.11 0.093–0.13	0.093 0.073–0.11	0.072 0.069–0.075	0.066 0.045–0.083	0.14 0.12–0.15	0.11	0.10 0.078–0.15
MgO	3.64 3.29–3.94	3.41 2.23–4.33	3.68 3.49–3.87	3.18 2.65–3.57	3.67 3.38–3.91	4.06	4.05 3.70–4.79
CaO	13.81 12.92–15.28	15.94 13.40–18.39	14.43 13.79–15.07	16.09 13.12–17.85	12.09 9.76–14.43	12.71	12.66 10.38–15.00
Na ₂ O	2.17 1.86–2.52	1.92 1.21–2.41	2.44 2.38–2.50	1.84 1.57–2.17	2.05 1.75–2.17	2.53	2.40 2.08–2.48
K ₂ O	2.04 1.95–2.15	1.58 1.27–1.74	1.68 1.49–1.86	1.60 1.40–1.97	2.15 1.88–2.46	2.04	2.00 1.88–2.31
P ₂ O ₅	0.19 0.18–0.20	0.17 0.14–0.18	0.20 0.19–0.21	0.19 0.17–0.22	0.20 0.20	0.19	0.19 0.18–0.20
H ₂ O ⁻	6.36 5.41–7.46	9.65 8.68–11.72	4.49 4.33–4.65	9.01 6.23–11.16	4.57 3.67–6.16	3.82	5.71 4.61–6.86
H ₂ O ⁺	15.87 14.12–17.78	18.05 13.91–21.13	21.57 19.74–23.41	15.74 13.48–17.91	17.66 16.65–18.51	18.38	16.66 13.63–19.92
CO ₂	7.29 5.39–9.59	4.06 2.86–4.52	10.27 9.79–10.74	4.41 3.74–5.14	7.44 4.52–8.53	8.24	5.74 4.52–7.14
SO ₃	10.48 6.94–14.42	19.73 17.59–24.12	6.79 6.71–6.87	19.41 13.80–22.95	8.15 5.65–11.80	7.64	13.08 8.26–16.12
Сумма	98.16 97.22–98.88	102.31 99.34–103.9	98.35 97.21–99.48	100.97 98.61–104.5	101.41 98.74–103.2	99.13	99.93 98.64–103.04
S _{общ}	4.19 2.8–5.8	7.89 7.0 –9.7	2.72 2.7–2.8	7.70 5.5 –9.2	3.26 2.3–6.5	3.06	5.23 3.3–6.5
S ²⁻	1.15 1.0–1.5	0.48 0.2–0.8	1.10 0.9–1.3	0.59 0.5–0.8	0.71 0.4–3.3	3.33	0.84 0.4–1.6
Li, мкг/г	33	30	28	28	37	35	33
Be	1.1	1.0	0.9	1.0	1.3	1.1	1.1
Sc	6.0	6.9	6.2	5.5	10.8	6.4	7.1

V	51.7	38.5	35.7	38.8	55.5	48.7	45.0
Cr	53.3	29.0	32.9	35.3	47.5	39.3	38.4
Co	8.1	7.9	7.3	7.2	10.0	8.5	7.9
Ni	24.4	23.2	20.5	21.1	28.6	24.4	24.1
Zn	34	31	26	44	35	12	34
Ga	9.8	8.1	7.7	7.7	11.3	9.6	9.3
Ge	0.3	1.0	0.8	0.3	1.3	0.3	0.9
Rb	47.5	37.8	35.2	36.9	54.4	47.2	43.6
Sr	1461	1408	1992	1081	1408	1682	1318
Y	9.4	7.8	7.1	7.3	11.2	9.0	8.7
Zr	43.0	36.5	33.9	36.4	60.8	43.5	43.7
Nb	4.9	3.8	3.7	3.7	5.7	4.7	4.6
Sb	0.3	1.9	1.1	1.1	4.0	0.8	1.2
Cs	2.9	2.6	2.2	2.2	3.8	2.8	2.9
Ba	270	228	196	204	299	257	239
La	14.0	11.1	10.2	10.6	15.9	13.3	12.8
Ce	28.0	22.0	20.4	21.2	31.3	26.8	25.4
Pr	3.23	2.53	2.37	2.46	3.65	3.14	2.92
Nd	12.1	9.41	8.80	9.22	13.6	11.5	11.0
Sm	2.37	1.73	1.62	1.79	2.63	2.12	2.08
Eu	0.54	0.40	0.38	0.41	0.58	0.51	0.47
Gd	2.08	1.65	1.47	1.58	2.38	1.92	1.88
Tb	0.33	0.22	0.21	0.25	0.33	0.32	0.28
Dy	1.92	1.40	1.36	1.52	2.05	1.91	1.65
Ho	0.37	0.29	0.26	0.29	0.41	0.35	0.33
Er	1.01	0.84	0.75	0.78	1.20	1.00	0.94
Yb	0.99	0.75	0.70	0.72	1.08	0.96	0.86
Lu	0.14	0.11	0.10	0.10	0.16	0.13	0.13
Hf	1.38	1.11	1.06	1.12	1.74	1.32	1.32
Ta	0.41	0.28	0.28	0.30	0.42	0.39	0.34
Pb	9.0	7.7	4.6	5.9	10.4	7.8	7.8
Th	4.50	3.44	3.11	3.31	5.11	4.33	4.06
U	1.85	3.00	2.49	3.51	2.19	1.73	1.87

Примечание: жирным шрифтом выделены значения содержания $S_{\text{общ}} > 6$ мас. %.

Содержания SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 и $\text{FeO}_{\text{общ}}$ в пелоидах центральной колонки меняются с глубиной сходным образом. Значение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ меняется подобно содержанию $\text{FeO}_{\text{общ}}$, за исключением интервалов 82–96, 130–145 и 158–173 см, в которых при высоком содержании общей серы $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ возрастает.

В материале центральной колонки содержания CaO варьируются от 5.2 до 16.3 мас. %. Породы с высоким содержанием общей серы нередко обладают высоким или повышенным CaO , в то время как CO_2 снижается. Очевидно, что в этом случае оксид кальция концентрируется в некарбонатной минеральной фазе. В глубинных интервалах 70–82, 120–130, 145–158 и 191–196 см одновременно возрастают содержания сульфидной серы и CO_2 . В этом случае возрастание роли сульфида сопровождается развитием карбоната.

В краевых колонках поведение общей серы изменчиво. Пелоиды колонки 1 отличаются повышенным содержанием Na_2O .

Содержание CaO в них увеличивается с глубиной. В пелоидах верхней части колонки 2 содержание $S_{\text{общ}}$ понижено и на глубине около 40 см резко возрастает. В пелоидах верхней части колонки 3 содержание $S_{\text{общ}}$, наоборот, повышено и с глубиной последовательно снижается (рис. 4, табл. 2). В пелоидах с высоким содержанием серы возрастают отношения CaO/MgO и CaO/CO_2 .

В материале светлых полос, по сравнению с темными, повышены содержания CaO . По относительной роли CaO пелоиды краевой колонки 3 подразделяются на кальциевые (CaO 4.2–10.5 мас. %) и низкокальциевые (CaO <1.4 мас. %). Последние находятся глубже 35 см. В пелоидах краевой колонки 2 в светлых включениях на глубине 33–44 см содержание CaO максимально (34–36 мас. %). Вблизи основания разреза содержание кальция понижено до 2.3 мас. %. В породах других колонок аналогов низкокальциевых составов не обнаружено. Во всех колонках содержания MgO и Na_2O понижаются с

глубиной, за исключением нижней части колонки 2.

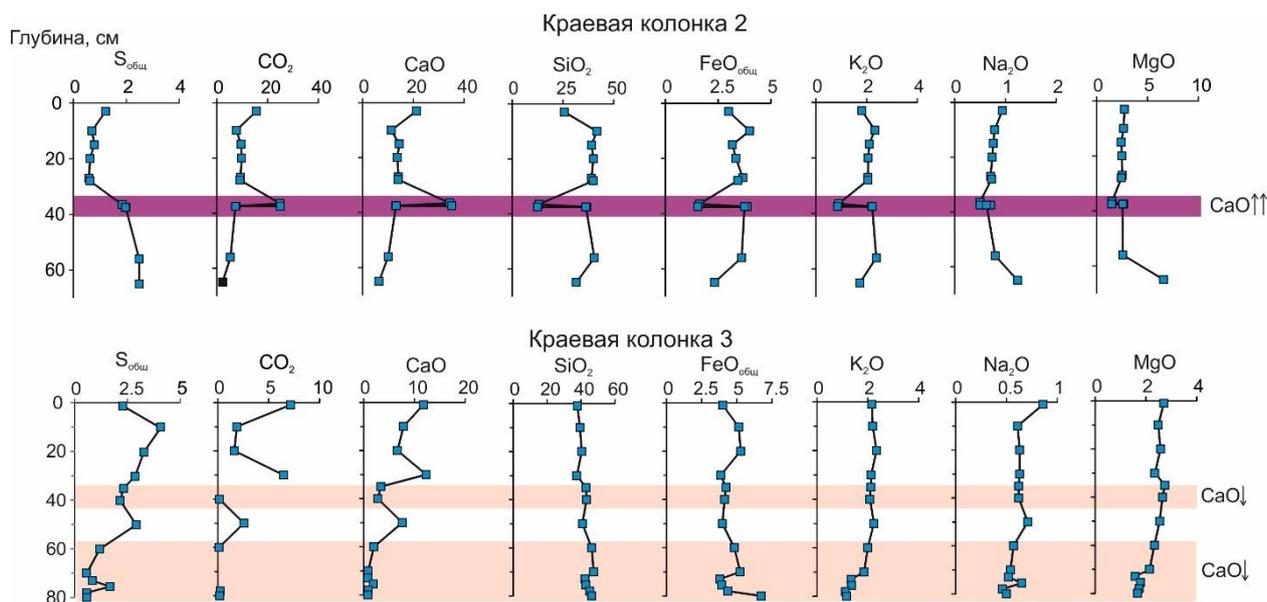


Рис. 4. Вариации содержаний $S_{общ}$ и петрогенных оксидов (мас. %) в пелоидах краевых колонок 2 и 3 оз. Нуху-Нур в зависимости от глубины отбора проб. Символы: $CaO\uparrow\uparrow$ – слой с относительным возрастанием оксида кальция; $CaO\downarrow$ – слой с относительным снижением оксида кальция.

Fig. 4. Variations in S_{tot} and major oxides contents (wt. %) in peloids from marginal columns 2 and 3 in Lake Nuhu Nur versus depths of sampling. Symbols are $CaO\uparrow\uparrow$ – a layer with relative increase in calcium oxide; $CaO\downarrow$ is a one with its relative decrease.

Т а б л и ц а 2

Представительные составы пелоидов прибрежных частей оз. Нуху-Нур

Table 2

Representative compositions of peloids from near-coastal parts of Lake Nuhu Nur

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец	NN-1-10	NN-1-30	NN-1-40	NN-2top	NN-2-10	NN-2-28	NN-2-40/44D	NN-2-40/44L
Колонка	1	1	1	2	2	2	2	2
Глубина отбора, см	10	30	40	3	10	28	40	44 (вкл.)
SiO_2 , мас. %	43.39	34.49	33.41	25.78	41.72	39.98	36.26	12.54
TiO_2	0.58	0.46	0.45	0.35	0.49	0.49	0.50	0.21
Al_2O_3	11.62	9.13	9.17	7.23	10.24	9.08	10.61	4.12
Fe_2O_3	3.56	2.65	2.57	2.09	3.18	2.54	2.86	0.96
FeO	0.68	0.76	0.73	1.10	1.13	1.15	1.16	0.68
MnO	0.097	0.20	0.17	0.13	0.13	0.15	0.14	0.18
MgO	2.63	2.33	2.33	2.74	2.65	2.44	2.56	1.48
CaO	9.86	17.24	17.48	21.28	11.38	13.99	13.22	35.11
Na_2O	0.83	0.85	0.82	0.94	0.79	0.73	0.63	0.50
K_2O	2.42	2.05	1.98	1.81	2.33	2.05	2.22	0.86
P_2O_5	0.16	0.13	0.14	0.13	0.12	0.12	0.13	0.11
H_2O^-	2.08	2.54	3.00	2.66	2.20	1.90	3.39	2.71
H_2O^+	12.52	9.73	10.35	15.16	10.88	11.78	11.88	9.36
CO_2	6.88	11.80	11.41	15.65	7.76	9.16	7.40	25.03
SO_3	1.47	3.64	4.64	3.05	1.76	1.56	4.94	4.97
Сумма	98.78	98.01	98.66	100.10	96.75	97.12	97.91	98.81
$S_{общ}$	0.59	1.46	1.86	1.22	0.70	0.62	1.98	1.99

S ²⁻	0.28	0.39	0.28	0.26	0.76	0.69	0.42	0.19
Li, мкг/г	53	41	40	34	44	48	34	17
Be	2.2	1.6	1.6	1.1	1.8	1.5	1.4	0.8
Sc	8.7	5.4	6.3	5.4	6.7	8.3	7.8	3.3
V	72.7	60.0	73.3	57.6	70.4	71.9	72.5	37.0
Cr	56.3	40.9	50.1	39.5	49.2	44.7	60.7	65.4
Co	10.9	9.1	9.6	10.0	11.8	10.1	10.9	11.9
Ni	30.9	23.8	27.4	26.7	30.0	31.8	32.3	28.2
Zn	52	46	48	38	48	63	40	15
Ga	4.0	3.4	2.6	4.5	4.3	12.7	12.6	5.4
Rb	73	64	57	45	67	60.9	63.3	27.3
Sr	1153	1172	2530	3129	985	1457	1189	4471
Y	14.4	11.8	12.5	10.2	12.7	12.6	13.0	6.0
Zr	70	56	61	48	65	62.1	57.5	25.7
Nb	7.6	5.8	6.2	5.3	7.2	6.2	6.3	2.9
Cs	4.3	3.0	3.4	2.7	3.6	3.4	3.7	1.7
Ba	390	412	342	279	410	420	416	252
La	20.4	17.6	16.7	14.7	19.3	17.8	18.8	8.5
Ce	39.5	33.7	32.8	29.1	38.3	35.99	38.06	17.16
Pr	4.42	3.75	3.82	3.13	4.33	4.19	4.39	2.04
Nd	17.3	14.1	14.9	11.7	16.5	15.6	16.5	7.61
Sm	3.31	2.65	2.83	2.28	3.16	3.08	3.25	1.48
Eu	0.59	0.49	0.52	0.54	0.73	0.69	0.76	0.35
Gd	2.85	2.18	2.32	1.98	2.70	2.61	2.99	1.40
Tb	0.42	0.34	0.35	0.31	0.43	0.41	0.44	0.22
Dy	2.61	2.06	2.23	1.84	2.38	2.33	2.59	1.28
Ho	0.51	0.44	0.43	0.37	0.50	0.46	0.49	0.23
Er	1.41	1.24	1.28	1.04	1.41	1.28	1.46	0.66
Yb	1.41	1.18	1.19	0.93	1.36	1.13	1.33	0.58
Lu	0.23	0.18	0.19	0.15	0.20	0.19	0.18	0.08
Hf	1.99	1.59	1.72	1.34	1.91	1.78	1.88	0.81
Ta	0.68	0.38	0.43	0.37	0.53	0.50	0.53	0.25
Pb	14.2	11.8	11.4	9.9	13.7	16.2	11.7	5.6
Th	6.19	4.81	4.98	4.08	6.33	5.80	5.99	2.70
U	2.34	3.04	3.80	4.77	4.29	3.47	3.71	7.14

Окончание табл. 2

End of Table. 2

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Образец	NN-4-30	NN-3-10	NN-3-30s	NN-3-40	NN-3-50s	NN-3-70s	NN-3-73k	NN-3-80bL
Колонка	4	3	3	3	3	3	3	3
Глубина бора, см	от- 30	10	30	40	50	70	73	80)
SiO ₂ , мас. %	41.07	39.4	37.51	43.25	40.79	47.39	42.38	46.25
TiO ₂	0.48	0.42	0.48	0.54	0.48	0.62	0.36	0.69
Al ₂ O ₃	11.50	11.86	11.27	14.86	13.17	16.06	13.24	18.30
Fe ₂ O ₃	3.50	4.69	3.50	3.92	3.70	5.08	3.60	6.75
FeO	0.82	0.90	0.70	0.59	0.63	0.66	0.55	0.64
MnO	0.11	0.097	0.13	0.016	0.047	0.018	0.017	0.014
MgO	2.82	2.48	2.35	2.65	2.54	2.14	1.57	1.67
CaO	9.15	7.84	12.31	2.79	7.61	0.90	0.83	0.84
Na ₂ O	0.67	0.61	0.63	0.62	0.71	0.54	0.52	0.50
K ₂ O	2.20	2.19	2.13	2.08	2.24	1.85	1.34	1.17
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.13	0.11	0.12	0.11	0.06	0.14
H ₂ O ⁻	2.17	5.82	4.72	4.47	5.25	3.49	3.5	2.95
H ₂ O ⁺	14.97	3.54	3.11	14.99	5.53	18.63	28.53	17.63
CO ₂	6.33	1.87	6.45	0.15	2.57	н. о.	н. о.	0.18
SO ₃	1.28	10.18	7.14	5.36	7.27	1.40	2.07	1.43
Сумма	97.23	92.04	92.56	96.40	92.66	98.89	98.57	99.15
S _{общ}	0.51	4.07	2.86	2.15	2.91	0.56	0.83	0.57
S ²⁻	0.88	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Li, мкг/г	59	42	39	49	46	40	32	46
Be	1.9	2.3	1.9	3.5	2.5	2.8	4.5	1.6
Sc	11.9	7.4	7.1	8.0	9.5	11.9	6.4	10.9

V	82.7	75.3	72.1	86.9	84.3	94.9	65.2	105
Cr	54.8	54.9	52.8	61.2	58.7	71.1	51.2	71.9
Co	11.0	15.8	14.3	22.7	13.7	8.7	16.0	7.8
Ni	36.3	31.2	32.7	45.6	31.2	34.0	36.9	18.7
Zn	230	53	70	73	59	88	54	55
Ga	16.0	12.3	6.3	6.9	6.3	6.4	10.0	15.4
Rb	73.5	72	65	87	80	82	51	74
Sr	872	578	1150	237	649	192	451	191
Y	14.1	13.3	13.1	15.8	14.0	17.2	8.9	11.3
Zr	85.8	70	65	78	72	85	56	90
Nb	7.7	6.9	6.8	8.6	7.8	8.9	5.8	10.3
Cs	4.0	4.2	3.9	4.9	4.5	5.6	3.8	6.1
Ba	386	476	444	508	514	641	3506	396
La	20.4	20.4	18.7	27.2	19.3	25.5	18.9	19.8
Ce	40.54	40.2	36.5	51.5	38.3	49.8	28.6	36.9
Pr	4.63	4.44	4.23	5.60	4.72	5.67	3.01	4.19
Nd	17.5	17.3	16.2	21.1	17.6	21.8	11.3	15.7
Sm	3.32	3.24	3.08	3.81	3.31	4.07	2.07	2.87
Eu	0.71	0.56	0.53	0.70	0.59	0.72	0.11	0.51
Gd	2.88	2.66	2.50	3.32	2.69	3.40	1.71	2.31
Tb	0.44	0.40	0.38	0.46	0.41	0.48	0.21	0.33
Dy	2.61	2.40	2.38	2.82	2.45	3.00	1.32	2.08
Ho	0.52	0.47	0.46	0.57	0.51	0.57	0.27	0.42
Er	1.38	1.41	1.36	1.60	1.51	1.66	0.80	1.25
Yb	1.39	1.27	1.29	1.58	1.35	1.50	0.75	1.28
Lu	0.22	0.21	0.20	0.24	0.20	0.24	0.13	0.21
Hf	2.35	1.97	1.76	2.32	1.85	2.32	1.68	2.72
Ta	0.58	0.55	0.50	0.60	0.58	0.63	0.47	0.74
Pb	17.6	14.9	13.8	18.2	16.6	18.7	19.3	22.0
Th	6.57	6.13	5.96	6.88	6.77	7.61	6.00	8.56
U	1.93	1.43	2.15	4.79	2.27	1.75	3.64	1.63

Микроэлементы

В пелоидах центральной колонки содержания микроэлементов с глубиной изменяются сходным образом. Среди них заметно выделяется поведение Sr и U (рис. 5). При этом они зависят от содержания серы, особенно в верхней части, примерно до 70 см глубины. В целом, значимую обратную корреляцию с содержанием $S_{\text{общ}}$ в гязях центра озера имеют содержания SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 ,

FeO , CO_2 и большинства микроэлементов (Be, V, Co, Ni, Ga, Rb, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, РЗЭ, Hf, Ta, Th) (рис. 6). Для них коэффициент корреляции с серой изменяется от -0.74 (Zr, Ta) до -0.89 (SiO_2). В пелоидах краевых колонок значимых корреляций содержаний петрогенных оксидов и микроэлементов с содержанием $S_{\text{общ}}$ нет. В них $S_{\text{общ}}$ изменяется с глубиной отбора проб, при ее увеличении в первой и второй колонках $S_{\text{общ}}$ повышается, а в третьей – понижается (рис. 3, табл. 2).

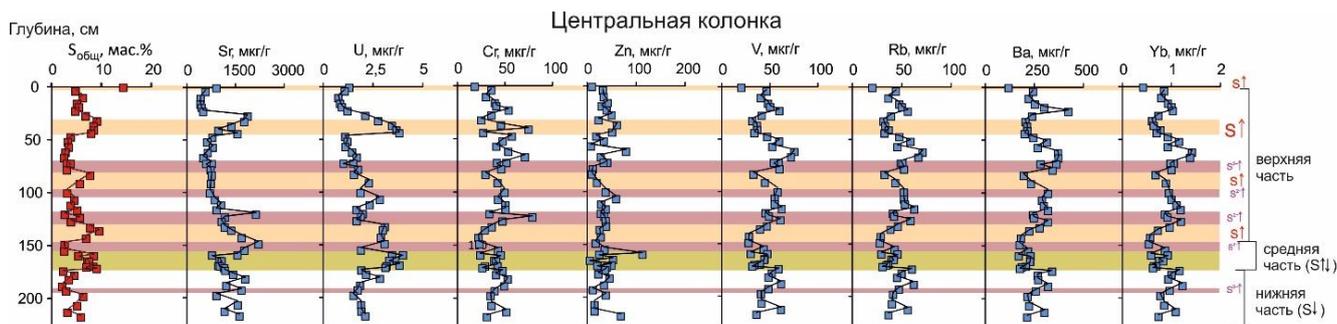


Рис. 5. Вариации содержания $S_{\text{общ}}$ и микроэлементов в пелоидах из центральной колонки оз. Нуху-Нур в зависимости от глубины отбора проб.

Fig. 5. Variations in S_{tot} and trace elements contents in peloids from the central column of Lake Nuhu Nur versus depths of sampling.

В пелоидах центральной колонки Sr в интервалах глубины 26–46, 145–158 и 191–196 см и U в интервалах 26–46, 130–145 и 158–173 см имеют существенно повышенные содержания. Интервалы 26–46 и 130–145 см – с высоким содержанием серы (до 9.7 мас. %). В интервалах 130–145 и 158–173 см вместе с содержанием U повышается значение Fe_2O_3/FeO . В интервалах 46–82 и 120–130 см с повышенными долями сульфидной серы (S^{2-}) и CO_2 повышается содержание Sr.

Пелоиды верхней части колонки 3 по содержанию серы, кальция и микроэлементов близки пелоидам центральной части озера с содержанием $S_{общ} < 5.5$ мас. %. При этом в пелоидах краевых колонок озера содержание серы не превышает 3 мас. %. Максимальному CaO в слое средней части краевой колонки 2 соответствуют максимумы Sr и Ba (табл. 2).

Редкоземельные спектры пелоидов центра оз. Нуху-Нур имеют сходную форму и характеризуются слабыми отрицательными Eu аномалиями. Содержания РЗЭ в высокосернистых разновидностях ($S_{общ} > 5.5$ мас. %) и в карбонатных включениях понижены. Подобное снижение содержаний РЗЭ без изменения формы спектра в целом характерно для карбонатных и органогенных озерных донных отложений (Страховенко и др., 2010).

По спектрам РЗЭ высококальциевые пелоиды краевых колонок подобны пелоидам центральной колонки озера ($S_{общ} < 5.5$ мас. %) (рис. 6). Обр. 73к низкокальциевого пелоида из колонки 3 отличается повышенным значением La/Yb и более выраженной отрицательной Eu аномалией.

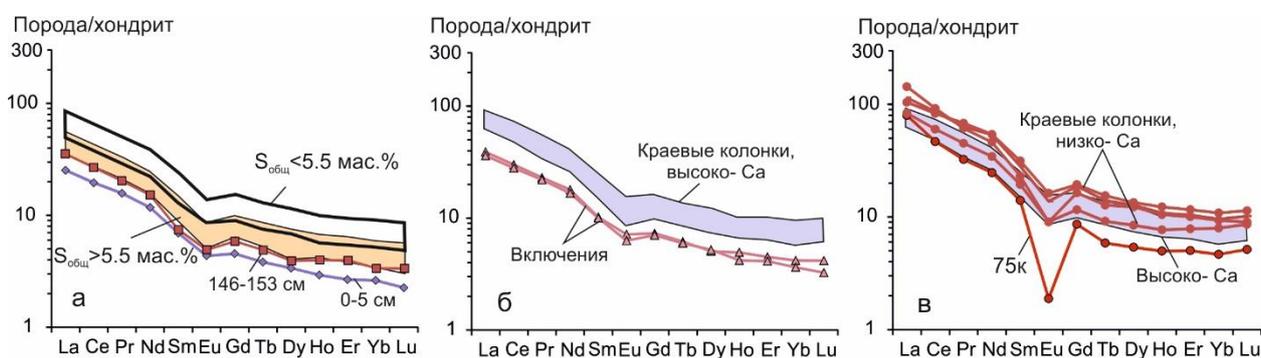


Рис. 6. Спектры редкоземельных элементов пелоидов оз. Нуху-Нур: *а* – центральная колонка, *б* – краевые колонки, высококальциевые составы, *в* – низкокальциевые пелоиды. Нормирование к хондриту (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 6. Spectra of rare earth elements of peloids of Lake Nuhu-Nur: *a* – central column, *б* – near-coastal columns, high-calcic compositions, *в* – low-calcic ones. Normalizing is to chondrite (McDonough, Sun, 1995).

Минеральный состав пелоидов по данным рентгенофазового анализа

По соотношению минеральных фаз пелоиды озера разделяются на три типа: I – прибрежно-центральный, II – центральный, сульфатный и III – центральный, сульфидный (табл. 3).

Первый тип дифракционной картины (рис. 7,а) характерен для большинства лечебных грязей оз. Нуху-Нур с содержанием серы $S_{общ} < 5.8$ мас. %. В верхней части тенардит и гексагидрит в примерно равных долях (в целом до 30 ± 5 %), а также кальцит и кварц, ниже в варьирующих, но примерно сопоставимых долях присутствуют кварц, арагонит,

кальцит, гипс или гексагидрит, иногда полевой шпат (альбит). Глинистые минералы в основном те же, что и в пелоидах первого типа, но доля их выше (от 10 до 30 %). Присутствует рентгеноаморфная фаза.

Из глинистых минералов рентгенофазовым анализом определяются в верхней части центральной колонки (до ~70 см) преимущественно каолинит, ниже по всей центральной колонке и в краевых колонках преобладают гидрослюды (монтмориллонит и иллит), реже определяется каолинит, еще реже – смектит, что соответствует выветриванию полевых шпатов во влажной (низкотемпературной?) среде. Все глинистые минералы структурно несовершенны.

Дифракционная картина второго типа (рис. 7,б,в) соответствует пелоидам из центральной колонки с высоким содержанием серы ($S_{\text{общ}}$ от 5.8 до 14.5 мас. %), представленной преимущественно сульфатами (70 % и более). В самой верхней части колонки – те-нардит (по межплоскостным расстояниям близок также и астраханит) – 50 ± 5 %, гипс (30 ± 5 %), ниже – преобладает гипс (70–90 %), в интервале 140–147 см добавляется гексагидрит (~20 %). Другие минералы – кварц, кальцит, в некоторых образцах – арагонит (по 5–10 %). Глинистые минералы (менее 15 %) – в верхней части (выше 45 см) каолинит

и, в очень малых количествах, минералы группы гидрослюд (монтмориллонит, иллит), ниже – в основном монтмориллонит, реже каолинит и смектит.

В образцах с дифракционной картиной третьего типа (рис. 7,г) определены повышенные содержания сульфидной серы и CO_2 ($S_{\text{общ}} < 5.8$ мас. %). Основные минералы карбонатные – кальцит либо арагонит (до 60 %). Кроме них в пробах содержатся глинистые минералы и кварц (по ~20 %), сульфаты – не более 10 %. Среди глинистых минералов преобладает иллит.

Т а б л и ц а 3

Результаты рентгенофазового анализа пелоидов оз. Нуху-Нур (минералы в %)

Table 3

Results of X-ray phase analysis of peloids from Lake Nuhu Nur (minerals in %)

Глубина, см	Гипс	Те-нардит	Гекса-гидрит	Каль-цит	Ара-гонит	Кварц	Поле-вой шпат	Глини-стые минералы	Суль-фаты/ карбо-наты	Тип
Номер образца	Центральная колонка									
0–2	30	50	–	5	–	10	–	5	80/5	II
18–21	–	30	30	20	–	10	–	10	60/20	I
35–40	90	–	–	5	–	5	–	–	90/5	II
43–46	80	–	10	–	–	5	–	–	90/–	II
60–65	–	–	25	15	–	20	20	15	25/15	I
76–82	–	–	–	60	–	20	–	15	–/60	III
105–110	35	–	–	15	15	20	–	15	35/30	I
115–119	20	–	–	–	35	20	–	20	20/35	I
120–122	30	–	–	10	20	10	3	15	30/30	I
140–147	50	–	20	10	–	10	сл.	<10	70/10	II
147–153	10	–	–	15	40	15	–	20	10/55	III
158–162	>95	–	–	–	–	<5	–	сл.	95/–	II
187–191	15	–	–	10	20	25	–	20	15/30	I
211–216	70	–	–	5	5	5	–	15	70/10	II
	Колонка 3									
30s	30	–	–	15	20	20	–	15	30/35	I
35ch	45	–	–	–	–	20	–	30	45/–	I
78b	15	–	–	–	–	30	–	50	15/–	I

Примечание: прочерк – не обнаружено, сл. – следы.

Коэффициент
корреляции R^2

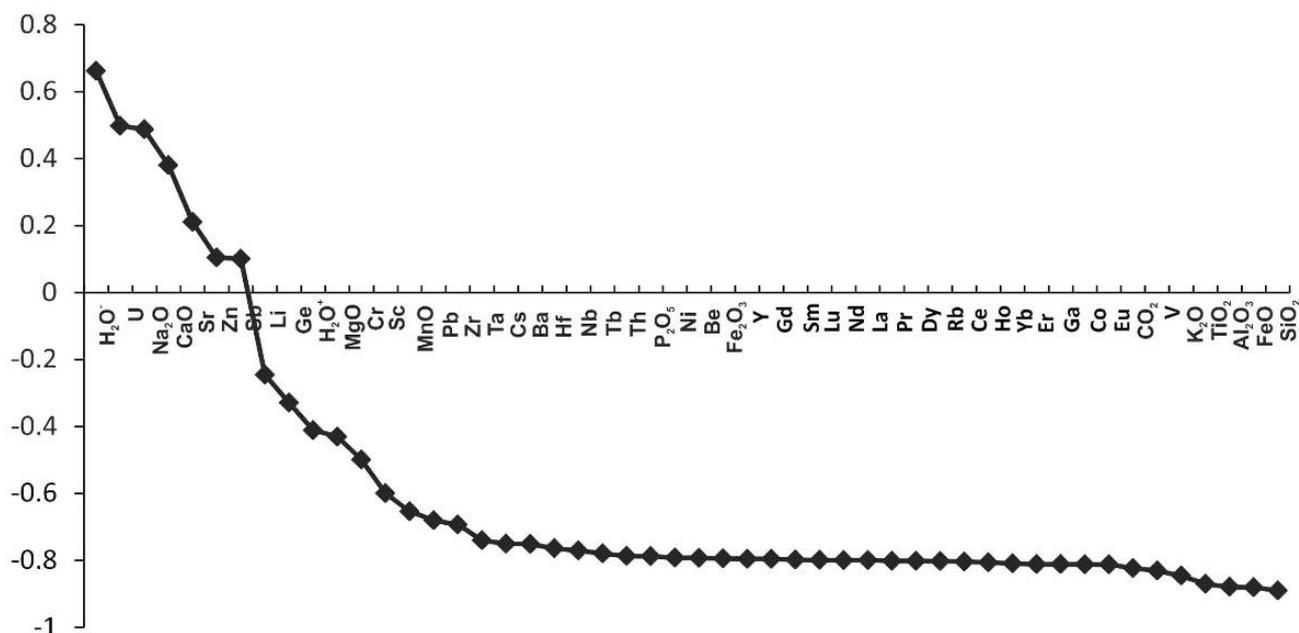


Рис. 8. Коэффициенты корреляции содержаний петрогенных оксидов и микроэлементов с содержанием общей серы в пелоидах центральной части оз. Нуху-Нур.

Fig. 8. Correlation coefficients of major oxides and trace elements with content of total sulfur in peloids from the central part of Lake Nuhu-Nur.

Факторный анализ пелоидов

Для всех пелоидов оз. Нуху-Нур выполнен факторный анализ по содержаниям $S_{общ}$ и петрогенных оксидов и отдельно – микроэлементов. Выделены по два значимых главных компонента (фактора), доли которых в выборках составили 42 % и 21 % от общей изменчивости для серы и петрогенных оксидов, 70 % и 8 % – для микроэлементов.

В совокупности $S_{общ}$ и петрогенных оксидов (рис. 9,а) первый фактор (максимальная изменчивость) определяется совместным нахождением в пелоидах серы, кальция и натрия и противоположным поведением $S_{общ}$ по отношению к SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , и Fe_2O_3 . Во втором факторе (вес которого в два раза ниже, чем первого фактора) в группу с отрицательной корреляцией по отношению к сере объединяются CaO , MnO , FeO , CO_2 . Первый

фактор, по-видимому, отражает роль сульфатов в составе пелоидов (гипс, гексагидрит, тенардит), второй – роль карбонатов (кальцит, арагонит). Выделяются три тренда: первый характеризует высокосернистые грязи, содержащие гипс, второй – богатые кальцием карбонатные включения, третий – различия между высококальциевыми и низкокальциевыми составами.

В совокупности микроэлементов (рис. 9,г) первый фактор определяется группой РЗЭ, Y, Nb, Zr, Ta и Th (группа I), отрицательно коррелирующей с содержанием серы, в отличие от Sr и U (см. рис. 7). Вторым фактором обозначает разделение групп Be, Co, Ni, Sr, Ba, U (высокие значения, группа II) и Li, Sc, Ga, Eu (низкие значения, группа III). Этот фактор дает разделение пелоидов краевых колонок и центральной колонки. Тренд пелоидов краевых колонок отражает накопление Ba, Sr и U в карбонатах.

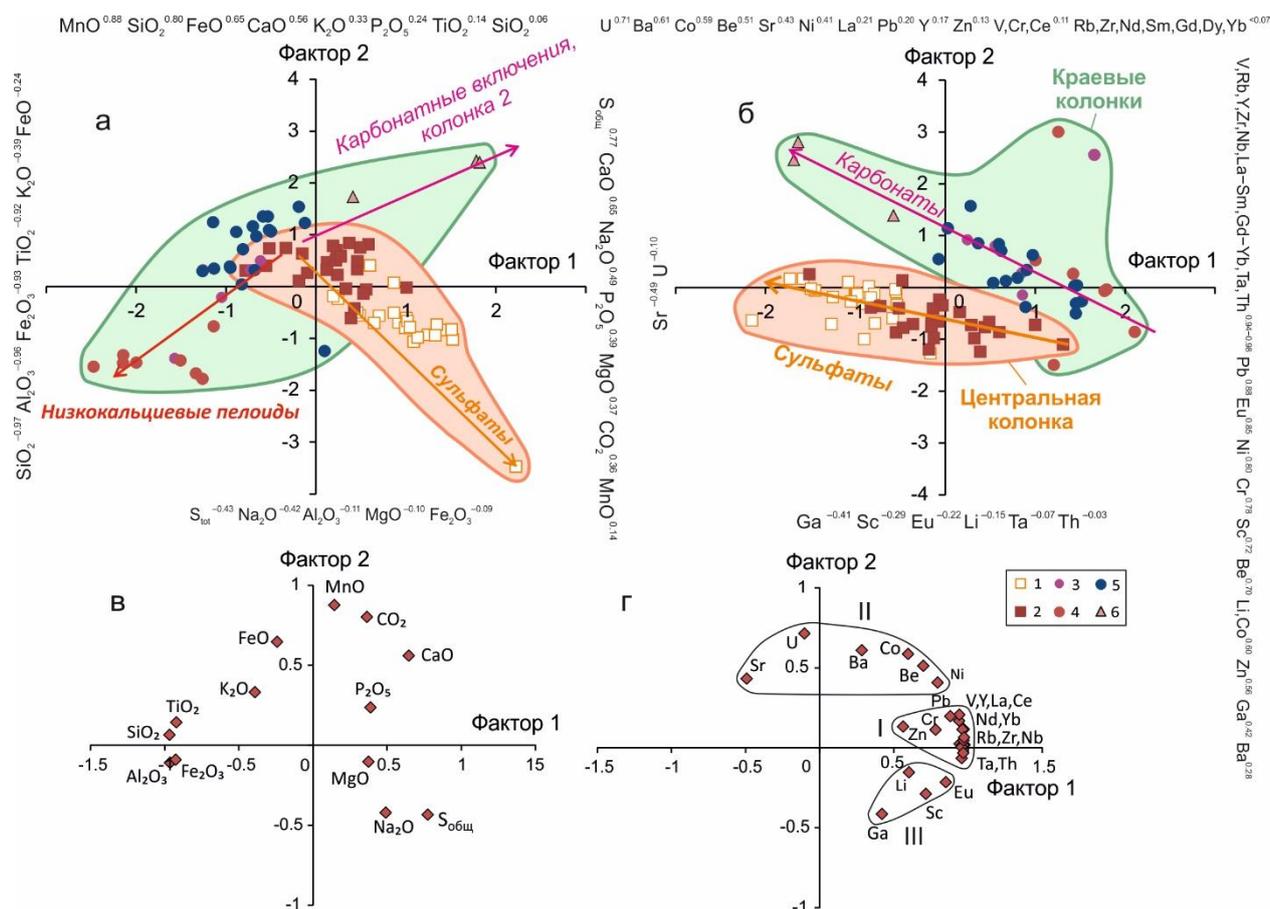


Рис. 9. Результаты факторного анализа пелоидов оз. Нуху-Нур по содержаниям $S_{\text{общ}}$ и петрогенных оксидов (а) и микроэлементов (б) с соответствующими факторными нагрузками (в, г). На осях диаграмм а, б значения факторных нагрузок показаны индексами над элементами. На диаграмме г римскими цифрами показаны группы микроэлементов (см. текст). 1–6 – пелоиды оз. Нуху-Нур: 1–2 – центральная колонка: 1 – $S_{\text{общ}} > 5.5$ мас. %, 2 – $S_{\text{общ}} < 5.5$ мас. %; 3–6 – краевые колонки: 3 – высококальциевые (колонка 3), 4 – низкокальциевые, 5 – колонки 1, 2 и 4; б – карбонатные включения.

Fig. 9. Results of factor analysis of peloids from Lake Nuhu-Nur for S_{total} and major oxide contents (a) and trace elements (б) with corresponding factor loads (в, г). On axes of diagrams а, б, values of factor loads are shown by indices above elements. 1–6 – peloids from Lake Nuhu Nur: 1–2 – central column: 1 – $S_{\text{total}} > 5.5$ wt.%, 2 – $S_{\text{total}} < 5.5$ wt.%; 3–6 – near-coastal columns: 3 – high-calcium (column 3), 4 – low-calcium, 5 – columns 1, 2, and 4; б – carbonate inclusions.

Сопоставление состава пелоидов оз. Нуху-Нур и пелоидов мира

Сравнительный анализ полученных данных ограничен месторождениями, для которых имеются качественные опубликованные материалы. По содержаниям оксидов натрия, калия и микроэлементов (Mn, Zr, Ba и др.) пелоиды оз. Нуху-Нур частично подобны иловым лечебным грязям месторождения Перуйба (Da Silva et al., 2015), на побережье Атлантического океана (юго-восток Бразилии), и лечебным грязям приморских районов Грузии, Турции и Испании. Высокие содержания

серы (преимущественно в сульфатной форме) характерны для пелоидов, связанных с деятельностью вулкана Копачуэ в Аргентине (Baschini et al., 2010). Пелоиды краевых колонок оз. Нуху-Нур (в том числе низкокальциевые породы) по содержаниям SiO_2 , CaO, $FeO_{\text{общ}}$ и другим показателям сопоставимы с лечебными грязями Удаляньчи Северо-Восточного Китая. Однако лечебные грязи этого месторождения не содержат серы. Оно находится на вулканическом поле Удаляньчи, активном в последние 2.5 млн лет с последними извержениями в 1720–1776 гг. (Rasskazov et al., 2016). Высокие содержания

серы в составе сульфидов имеют палеопелоиды Лесной Фермы, обнаруженные на восточном краю вулканического поля Удаляньчи (Рассказов и др., 2019). По минеральному составу пелоиды оз. Нуху-Нур имеют сходство с пелоидами некоторых озер Крыма, которые используются в качестве лечебных грязей (оз. Сасык, Саки, Кучук-Аджиголь, (Kotova et al., 2016)), отличаясь от большинства из них отсутствием хлоридов.

На факторных диаграммах выборки, включающей данные по содержанию серы и петрогенных оксидов в пелоидах озера Нуху-Нур, Удаляньчи, Перуибы, Копажуэ, а также представительные составы лечебных грязей из регионов Грузии, Испании, Турции и

Туниса, используются три главных компонента (фактора) (рис. 10). На первый приходится 42.2 % общей изменчивости выборки, на второй и третий – соответственно, 14.1 % и 12.2 %. Значение первого фактора определяется содержанием $S_{общ}$ вместе с CaO , MgO и Na_2O и отрицательной корреляцией $S_{общ}$ с содержаниями SiO_2 и Al_2O_3 . Как и в расчетах для пелоидов оз. Нуху-Нур, первый фактор характеризует вхождение сульфатов. Второй фактор отражает разграничение между низкокальциевыми и высококальциевыми высокосернистыми составами пелоидов. Третий фактор показывает различие в поведении MgO , Na_2O , K_2O и серы (рис. 10,б,г).

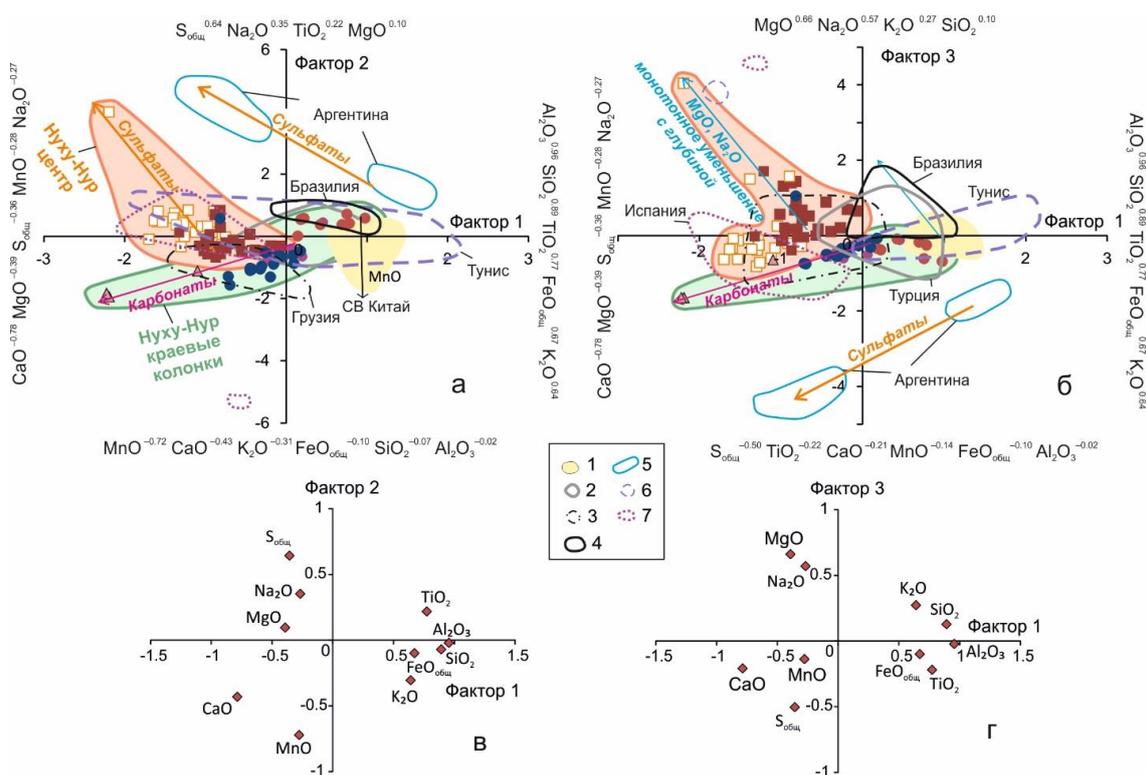


Рис. 10. Результаты факторного анализа (а, б) и факторные нагрузки (в, г) для пелоидов оз. Нуху-Нур и других районов мира. На осях диаграмм рис. а, б значения факторных нагрузок показаны индексами над элементами. Усл. обозн. см. рис. 9. Дополнительные обозначения: 1–7 – лечебные грязи различных районов мира (в скобках источники использованных данных): 1 – Северо-Восточный Китай (Rasskazov et al., 2017), 2 – Турция (Karakaya et al., 2010), 3 – Грузия (Бокучава, 2009), 4 – Бразилия (Da Silva et al., 2015), 5 – Аргентина (Baschini et al., 2010), 6 – Тунис (Khiari et al., 2014), 7 – Испания (Carretero et al., 2010).

Fig. 10. Results of factor analysis (a, b) and factor loads (c, d) for peloids from Lake Nuhu Nur and for those from other regions of the world. On axes of the diagrams in Figs a, b, values of factor loads are shown by indices above elements. Symbols are as in Fig. 9. Additional symbols: 1–7 – therapeutic mud of different parts of the world (sources of data used are shown in parentheses): 1 – Northeast China (Rasskazov et al., 2017), 2 – Turkey (Karakaya et al., 2010), 3 – Georgia (Bokuchava, 2009), 4 – Brazil (Da Silva et al., 2015), 5 – Argentina (Baschini et al., 2010), 6 – Tunisia (Khiari et al., 2014), 7 – Spain (Carretero et al., 2010).

Направления трендов составов высокосернистых пелоидов оз. Нуху-Нур и сульфатных грязей Копахуэ, Аргентина ($S_{\text{общ}}$ 40–53 мас. %), практически совпадают. Понижение значений второго фактора в лечебных грязях Удаляньчи связано в основном с увеличением содержания MnO. Тренд с повышением значения третьего фактора характерен для пелоидов верхней части центральной колонки оз. Нуху-Нур со сравнительно невысоким содержанием серы ($S_{\text{общ}} < 5.5$ мас. %, кроме образца, отобранного с самой верхней части колонки) и повышенным содержанием натрия. На рис. 10,б подобный тренд отмечается и для лечебных грязей залива Перуиба. Низкокальциевые составы пелоидов оз. Нуху-Нур имеют сходство с составами лечебных грязей Турции и Северо-Восточного Китая.

Сапропелевые илы подобно другим осадкам образуются в результате вторичных изменений (выветривания) магматических и метаморфических горных пород, поэтому при сопоставлении пелоидов разных регионов мира учитываются литогеохимические показатели, такие как, например, гидролизатный модуль осадочных пород ($ГМ = (TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2$) (Юдович, Кетрис, 2011). Пелоиды оз. Нуху-Нур попадают по этому показателю (от 0.39 до 0.51) в интервал значений платформенных глин ($ГМ = 0.30 - 0.55$). Значения нормированной щелочности ($НКМ = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$) в пелоидах центральной колонки оз. Нуху-Нур меняются в интервале от 0.42 до 1.43 и достигает максимума (6.12) в пелоиде верхних 2 см разреза (рис. 11,а).

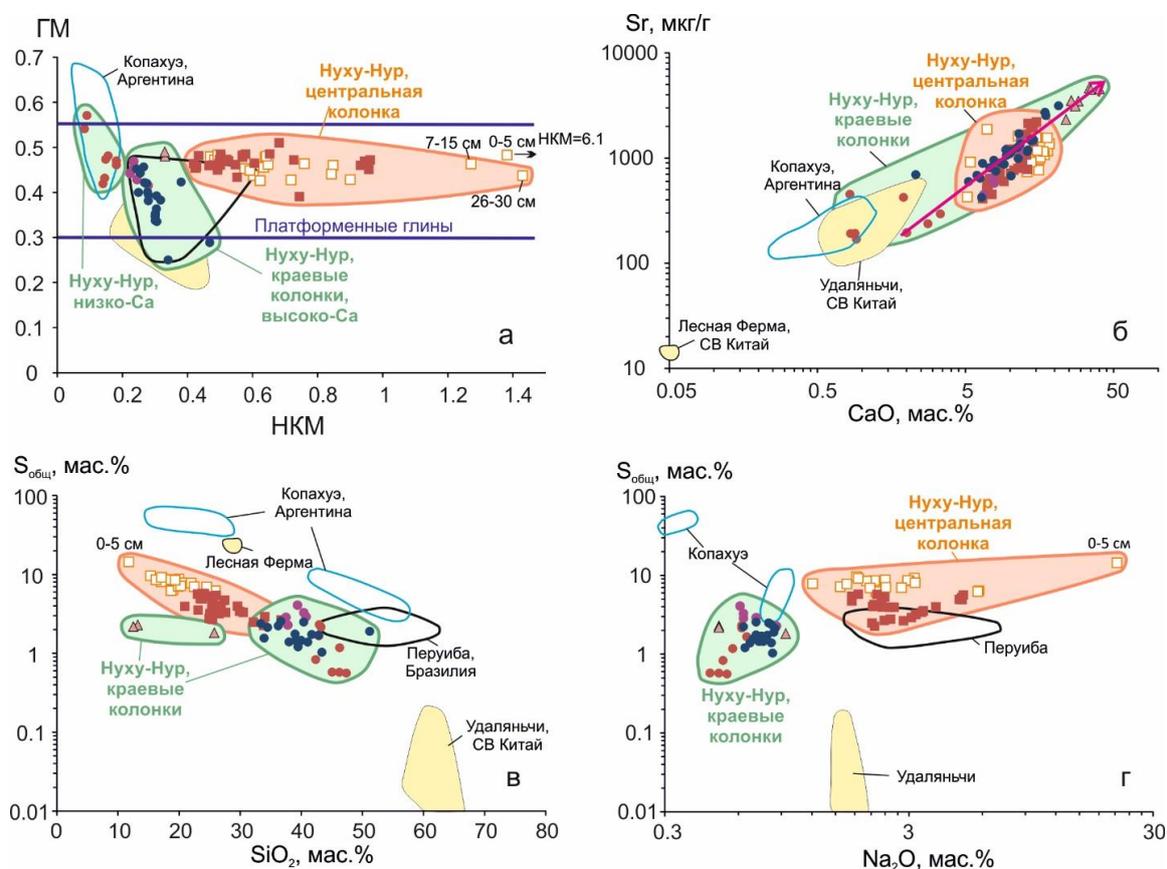


Рис. 11. Диаграммы ГМ – НКМ (а), Sr – CaO (б), $S_{\text{общ}}$ – SiO₂ (в), $S_{\text{общ}}$ – Na₂O (г) в пелоидах оз. Нуху-Нур и других районов мира. $ГМ = (TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2$ – гидролизатный модуль, $НКМ = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ – нормированная щелочность. На диаграмме а высокие значения ГМ (> 0.55) обозначают размыв гумидных кор выветривания, промежуточные значения ($30 < ГМ < 0.55$) – платформенные глины (Юдович, Кетрис, 2011). На рис. б стрелкой показано изменение составов пелоидов краевых колонок от низкокальциевых отложений до карбонатных включений с линейной зависимостью CaO от Sr. Усл. обозн. см. рис. 9, 10. Для сопоставления использованы данные (Baschini et al., 2010; Da Silva et al., 2015; Rasskazov et al., 2017; Рассказов и др., 2019).

Fig. 11. Diagrams of GM – NKM (*a*), Sr – CaO (*b*), $S_{tot} - SiO_2$ (*c*), $S_{tot} - Na_2O$ (*d*) in peloids from Lake Nuhu Nur and other regions of the world. GM = $(TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2$ – hydrolysate module, NCM = $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ – normalized alkalinity. In diagram *a*, high values of GM (>0.55) indicate the erosion of humid weathering crusts, intermediate values ($30 < GM < 0.55$) – platform clays (Yudovich, Ketris, 2011). In panel *b*, arrow shows change in compositions of peloids from near-coastal columns from low-calci-nate deposits to carbonate inclusions with a linear correlation between CaO and Sr. Symbols are as in Figs 9 and 10. Data used for comparison are from (Baschini et al., 2010; Da Silva et al., 2015; Rasskazov et al., 2017, 2019).

В пелоидах краевых колонок оз. Нуху-Нур значения ГМ (0.26–0.48) почти перекрывают интервал этого показателя пелоидов центральной колонки, при интервале сравнительно низких значений НКМ (0.22–0.47). Значения НКМ для пелоидов центральной части озера контролируются вхождением сульфатов, для пелоидов краевых частей озера такая зависимость не очевидна.

Высокие значения ГМ (0.41–0.57) и низкие значения НКМ (0.08–0.18) дают низкокальциевые пелоиды краевой колонки 3. На рис. 11,*a* эти составы перекрываются с составами пелоидов Копахуэ.

Основная часть пелоидов оз. Нуху-Нур имеет $S_{общ} < 5.5$ мас. %, в том числе, высококальциевые включения. Пелоиды характеризуются прямой и практически линейной корреляцией содержаний CaO и Sr (рис. 11,*b*). В низкокальциевых и высокосернистых пелоидах такая зависимость отсутствует. Корреляция содержаний CaO и Sr проявляется у части образцов пелоидов Удаляньчи и Копахуэ. В водных растворах с низкой и средней минерализацией поведение Sr аналогично поведению кальция, так как для обоих катионов характерна сравнительно низкая растворимость карбонатов и сульфатов. В природные воды Sr поступает из гипсово-ангидритовых пород, в которых присутствует целестин ($SrSO_4$) (Самарина, 1977).

В литологии часто используются также два других показателя: химический индекс выветривания $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ (chemical index of alteration, в молекулярных количествах (Nesbitt, Young, 1982)) и индекс зрелости осадков $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$ (Cox et al., 1995). В пелоидах верхней и средней частей центральной колонки (глубина < 100 см) оз. Нуху-Нур повышение содержания общей серы сочетается с понижением CIA ($CIA < 64$) и повышением ICV

(> 1.8). Такие показатели характеризуют низкую степень зрелости осадков. В высококальциевых пелоидах краевых колонок CIA в целом выше, чем в образцах из центра озера (от 57 до 77). В низкокальциевых пелоидах третьей колонки с увеличением глубины отбора пробы CIA повышается от 61 до 84, а ICV в целом понижается от 0.89 до 0.48. Высокие значения CIA (Nesbitt, Young, 1982) хорошо подчеркивают преобладание глинистых минералов, образующихся при выветривании. В формуле для расчета этого показателя, в отличие от ICV, однако, используется CaO, входящий только в силикаты, но не в карбонаты. По данным рентгенофазового анализа содержание силикатов в пелоидах оз. Нуху-Нур низкое (в высококальциевых пелоидах менее 20 % и в низкокальциевых пелоидах ~30 %). Вхождение карбонатов вносит искажения в обычную интерпретацию значений CIA, они могут быть занижены.

В пелоидах оз. Нуху-Нур (особенно его центральной части) преобладает гипс. Два следующих по встречаемости минерала по данным PCA – это кварц и кальцит. Гипс образуется преимущественно в мелководных условиях засушливого климата. Его наличие – показатель повышенной солености среды при осадконакоплении. Кварц и кальцит, как и гипс, могут встречаться в глинах соленых толщ, в осадках небольших бессточных слабоминерализованных озер районов с аридным климатом (Викулова и др., 1973).

Для определения источников размыва пород основного и кислого состава используется диаграмма Th/Co – La/Sc (Cullers, 2002). На этой диаграмме практически все фигуративные точки лечебных грязей (кроме включений) лежат в области выветривания пород кислого состава (рис. 12,*a*). Низкокальциевые пелоиды имеют повышенные значения Th/Co. В сульфидных глинистых отложениях Лесной Фермы (СВ Китай) Th/Co слегка

повышается, а в карбонатных включениях – понижается вместе со значениями La/Sc , для сульфидных глин характерны резко выраженные отрицательные Eu -аномалии (Rasskazov et al., 2017). Значения La/Yb в сернистых глинах оз. Нуху-Нур и Копажуэ в

целом невысокие, за исключением двух низкокальциевых образцов с наиболее заметными отрицательными Eu аномалиями (рис. 6, в, 12, б). В пелоидах Удаляньчи значения La/Yb немного повышены.

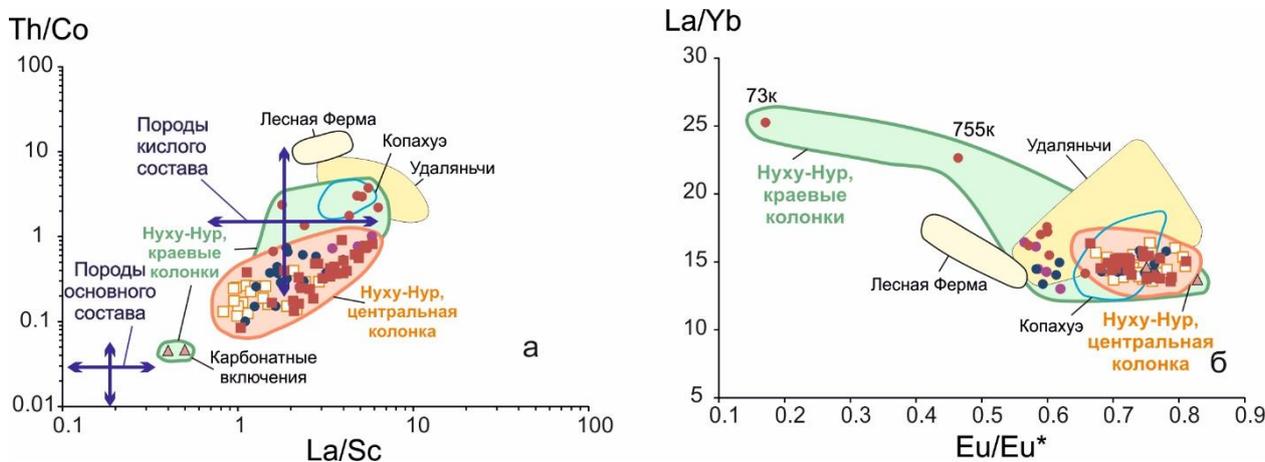


Рис. 12. Диаграммы $Th/Co - La/Sc$ (а) и $La/Yb - Eu/Eu^*$ (б) для составов пелоидов оз. Нуху-Нур (Россия, Сибирская платформа), низкосернистых лечебных грязей курорта Удаляньчи, высокосернистых сульфидных глин района Лесная Ферма (Северо-Восточный Китай) и лечебных грязей Копажуэ (Аргентина). Усл. обозн. см. рис. 9, 10. Для сопоставления использованы данные (Baschini et al., 2010; Rasskazov et al., 2017; Рассказов и др., 2019). На диаграмме а стрелками показаны области, соответствующие выветриванию пород кислого и основного состава (Cullers, 2002). $Eu/Eu^* = Eu_n / \sqrt{Sm_n \times Gd_n}$ (Taylor, McLennan, 1985).

Fig. 12. Diagrams $Th/Co - La/Sc$ (a) and $La/Yb - Eu/Eu^*$ (b) for peloids from Lake Nuhu Nur (Russia, Siberian platform), low-sulfur therapeutic mud from the Wudalianchi resort, high-sulfur sulfide clays of the Forest Farm area (Northeast China), and therapeutic mud from Kopahué (Argentina). Symbols are as in Figs 9 and 10. Data used for comparison are from (Baschini et al., 2010; Rasskazov et al., 2017, 2019). Diagram a shows areas corresponding to weathering of rocks of silicic and basic compositions (Cullers, 2002). $Eu/Eu^* = Eu_n / \sqrt{Sm_n \times Gd_n}$ (Taylor, McLennan, 1985).

Заключение

Пелоиды оз. Нуху-Нур характеризуются высоким содержанием общей серы, входящей в них преимущественно в сульфатной форме. С содержаниями серы коррелируются содержания H_2O^- (сорбированная влага), U, Na_2O , CaO, Sr и Zn. Другие компоненты пелоидов имеют отрицательную корреляцию с серой. Вместе с тем в пелоидах центральной и краевых колонках озера выявляются нарушения корреляций $S_{общ}$ с CaO, Sr, U и различия в поведении Na_2O , K_2O , $FeO_{общ}$ и вариации отношения Fe_2O_3/FeO .

По вариациям $S_{общ}$, петрогенных оксидов и микроэлементов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $FeO_{общ}$, K_2O , Cr, Sr, PЗЭ, U, отношение CaO/CO_2), а

также минеральных фаз в пелоидах намечается слоистость. В центре оз. Нуху-Нур чередуются слои с высоким и пониженным содержанием общей и сульфидной серы, на краях озера – слои с высоким и низким содержанием кальция. По литогеохимическим показателям (ГМ, НМК) пелоиды оз. Нуху-Нур сопоставляются с глинистыми осадочными породами, образующимися в условиях холодного аридного климата при выветривании пород кислого состава.

Выполненные сопоставления свидетельствуют о том, что как лечебные высокосернистые сапропелевые илы, пелоиды оз. Нуху-Нур по химическому составу и микроэлементам обнаруживают общее сходство с лечебными грязями Удаляньчи, Северо-

Восточного Китая и, в меньшей степени, с глинами приморских районов Бразилии, Грузии и Испании (по высокому содержанию Na_2O и низкому – SiO_2). Установлено наибольшее сходство нухунурских пелоидов с высокосернистыми пелоидами Копахуэ, Аргентина.

Благодарности

Изучение лечебных грязей оз. Нуху-Нур проводилось в рамках работ Китайско-Российского исследовательского центра Удаляньчи–Байкал по новейшему вулканизму и окружающей среде. Измерения содержаний микроэлементов проводились на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИН СО РАН и масс-спектрометре с высоким разрешением Element II ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН (А.П. Чебыкин и В.И. Ложкин). Петрогенные оксиды анализировались М.М. Самойленко, Е.Г. Колтуновой, Г.В. Бондаревой, Н.Ю. Царевой. В работе использовалось также оборудование для силикатного анализа и рентгеновский дифрактометр ДРОН ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Литература

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

Викулова М.Ф., Бурков Ю.К., Македонов А.В., Тихомирова Н.Я., Осипова А.И., Феофилова А.П., Кулакова Г.В., Земова Н.Н. Фациальные типы глинистых пород и их первичные литологические особенности. Л. Недра, 1973. 288 с.

Гаськова О.Л., Солотчина Э.П., Склярова О.А. Реконструкция эволюции состава растворов по данным осадочной летописи соленых озер Приольхонья // Геология и геофизика 2011. Т. 52, № 5. С. 704–711.

Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Книжный дом «Университет», 2001. 256 с.

Крутикова А.И., Кауров В.Ф. Минеральные воды северо-восточной части Кудинской депрессии // Минеральные воды Восточной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 89–95.

Критерии оценки качества лечебных грязей при их разведке, использовании и охране. Методические указания: утверждено Минздравом СССР 11.03.1987 № 10-11/40. М.: Минздрав СССР, 1987. 24 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. doi: 10.7868/S0016752518030068

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.

Расказов С.В., Сие Ж., Сунь Й., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С. Образование пластичных глин в разрывах слоя палеопелоидов: вероятный механизм зарождения источника грязевого вулкана в бассейне Сунляо // Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы. Материалы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2019. С. 149–151.

Самарина В.С. Гидрогеохимия. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1977. 360 с.

Сизых Ю.И. Комплексная схема химического анализа горных пород и минералов. Отчёт. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1985. 61 с.

Скляров Е.В., Солотчина Э.П., Вологина Е.Г., Игнатова Н.В., Изох О.П., Кулагина Н.В., Склярова О.А., Солотчин П.А., Столповская В.Н., Ухова Н.Н., Федоровский В.С., Хлыстов О.М. Детальная летопись климата голоцена из карбонатного разреза соленого озера Цаган-Тырм (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 3. С. 303–328.

Солотчина Э.П., Скляров Е.В., Страховенко В.Д., Солотчин П.А., Склярова О.А. Минералогия и кристаллохимия карбонатов современных осадков малых озер Приольхонья (Байкальский регион) // Доклады Академии наук. 2015. Т. 461, № 5. С. 579–585. doi:10.7868/S0869565215110213

Страховенко В.Д., Солотчина Э.П., Восель Ю.С., Солотчин П.А. Геохимические факторы аутигенного минералообразования в донных отложениях озер Тажеранского системы (Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 10. С. 1825–1841. doi:10.15372/GiG20151006

- Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н., Восель Ю.С. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер Сибири // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 11. С. 1501–1514.
- Ступникова Н.А., Мурадов С.В. Физико-химические и микробиологические исследования лечебной грязи месторождения Озеро Утиное Камчатской области // *Вестник ДВО РАН*. 2005, № 3. С. 76–82.
- Шпейзер Г.М., Яковлев Т.Н., Бехтерев Н.В. К гидрохимии минерального озера Нуха-Нур // *Труды Иркутского государственного университета*. Т. L, сер. химическая. Вып. 3, ч. II. Иркутск, 1970. С. 131–136.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
- Ясныгина Т.А., Рассказов С.В., Маркова М.Е., Пахомова Н.Н. Определение редкоземельных элементов, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Th в стандартных образцах серии ДВ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81, № 2. С. 10–20.
- Ясныгина Т.А., Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Саранина Е.В., Сунь Й. Состав иловых лечебных грязей оз. Нуха-Нур (Баяндаевский район Иркутской области), сопоставление с популярными лечебными грязями мира // *Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы*. Мат-лы IV Всероссийского симпозиума с участием иностранных ученых, посвященного 90-летию со дня рождения Н.А. Логачева. Иркутск: ИЗК СО РАН. С. 260–262.
- 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. doi:10.1016/j.clay.2010.05.008
- Carretero M.I., Pozo M., Martin-Rubi J.A., Pozo E., Maraver F. Mobility of elements in interaction between artificial sweat and peloids used in Spanish spas // *Applied Clay Sci*. 2010. V. 48. P. 506–515. doi:10.1016/j.clay.2010.02.016
- Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. P. 2919–2940. doi:10.1016/0016-7037(95)00185-9
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem. Geol*. 2002. V. 191 (4). P. 305–327. doi:10.1016/S0009-2541(02)00133-X
- Da Silva P.S.C., Torricilha J.K., de Macedo Gouvea P.F., Maduar M.F., de Oliveira S.M.B., Scapin M.A. Chemical and radiological characterization of Peruibe Black Mud // *Applied Clay Sci*. 2015. V. 118. P. 221–230. doi:10.1016/j.clay.2015.09.016
- Goldhaber M.B. Sulfur-rich sediments. Sediments, diagenesis, and sedimentary rocks // *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, 2005. V. 7. P. 257–288.
- Karakaya M.C., Karakaya N., Sarioglan S., Koral M. Some properties of thermal mud of some spas in Turkey // *Applied Clay Sci*. 2010. V. 48, P. 531–537. doi:10.1016/j.clay.2010.02.005
- Khiari I., Mefteh S., Sanchez-Espejo R., Cerezo P., Aguzzi C., Lopez-Calindo A., Jamoussi F., Iborra C.V. Study of traditional Tunisian medina clays used in therapeutic and cosmetic mud-packs // *Applied Clay Sci*. 2014. V. 101. P. 141–148. doi:10.1016/j.clay.2014.07.029
- Kotova I., Kayukova E., Kotov S. Peloids of Crimean salt lakes and the Dead Sea: controls on composition and formation // *Environ Earth Sci*. 2016. V. 75, 1207. doi:10.1007/s12665-016-5999-1
- McDonough W.F., Sun S.-S. The composition of the Earth // *Chem. Geol*. 1995. V. 120. P. 223–253. doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4
- Nesbitt H.W., Young, G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature* 1982. V. 299. P. 715–717.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Sun Y., Yang Ch., Xie Zh., Yasnygina T.A., Saranina E.V., Fang Zh. 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.
- 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
- Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell: Scientific Publications, 1985. 312 p.

Ясныгина Татьяна Александровна,

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: ty@crust.irk.ru.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. лабораторией, зав. кафедрой,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
email: rassk@crust.irk.ru.

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: ercheb@yandex.ru.

Филева Татьяна Семеновна,

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

Саранина Елена Владимировна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
664033 Иркутск, ул. Фаворского, д. 1а,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
email: e_v_sar@mail.ru.

Сунь Йи-минь,

научный сотрудник,
Институт природных ресурсов и экологии Хэйлунцзянской академии наук, Харбин, Китай,
email: 894817259@qq.com.

Yasnygina Tatyana Aleksandrovna,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ty@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilyevich,

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Laboratory, Head of Chair,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
email: rassk@crust.irk.ru.

Chebykin Evgeny Pavlovich,

*Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Ulaanbaatarskaya str., 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru.*

Fileva Tatyana Semenovna,
*Leading Engineer,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS.*

Saranina Elena Vladimirovna,
*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Engineer,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
664033 Irkutsk, Favorskogo str., 1a,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
email: e_v_sar@mail.ru.*

Sun Yi-min,
*Researcher,
Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China,
email: 894817259@qq.com.*
