

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ЛАНТАНОИДЫ) В ГОЛОЦЕНОВОМ РАЗРЕЗЕ САПРОПЕЛЯ ОЗЕРА КОТОКЕЛЬ (ВОСТОЧНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

RARE-EARTH ELEMENTS (LANTANOIDS) IN THE HOLOCENE SECTION OF SAPROPEL LAKE KOTOKEL (EASTERN PRE BAIKAL REGION)



В. А. Бобров,
*Институт геологии
и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
bobr@igm.nsc.ru*

V. Bobrov,
*Sobolev Institute of Geology
and Mineralogy SB RAS,
Novosibirsk*



Г. А. Леонова,
*Институт геологии
и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
leonova@igm.nsc.ru*

G. Leonova,
*Sobolev Institute of Geology
and Mineralogy SB RAS,
Novosibirsk*



А. Е. Мальцев,
*Институт геологии
и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
maltsev@igm.nsc.ru*

A. Maltsev,
*Sobolev Institute of Geology
and Mineralogy SB RAS,
Novosibirsk*

Определено содержание и распределение 14 редкоземельных элементов группы лантаноидов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в шестиметровом керне сапропеля с ненарушенной стратификацией. Использован метод вибрационного бурения центральной части дна оз. Котокель. Проведено сравнение нормированных на хондрит и иттербий средних содержаний лантаноидов в образцах сапропеля оз. Котокель, стандартном образце ила из центральной котловины оз. Байкал (БИЛ-1) и стандартных образцах глинистых сланцев. Установлена близость спектров лантаноидов между собой в образцах сапропеля оз. Котокель и байкальском иле (БИЛ-1) и существенное отличие от спектра лантаноидов в палеозойских глинистых сланцах Европы (ES) и Северной Америки (NASC), а также постархейских глинистых сланцах Австралии (PAAS). Показано, что спектр лантаноидов в разрезе сапропеля оз. Котокель совпадает со спектром лантаноидов в образце байкальского ила (БИЛ-1), а также в ранее изученном трехметровом разрезе сапропеля оз. Очки и четырехметровом разрезе торфяника верхового Выдринского болота, минеральное вещество которого имеет атмосферный генезис. Это совпадение типов распределения лантаноидов выдерживается в течение всего голоценового периода, что дает основание говорить о «байкальском типе» распределения лантаноидов, отличного от распределения лантаноидов в стандартах глинистых сланцев (ES, NASC, PAAS). Спектр распределения лантаноидов можно считать постоянным для минеральной компоненты голоценового разреза оз. Котокель, характерного также и для эолового материала современного аэрозоля Прибайкальского региона

Ключевые слова: лантаноиды; голоценовый разрез сапропеля; органическое вещество; породообразующие минералы; коэффициенты обогащения; глинистые сланцы; хондрит; байкальский ил; стандартные образцы сравнения; эоловая взвесь

Concentration and distribution of 14 rare earth elements of lanthanide group (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) in a 6-meter core of sapropel with undisturbed stratification received by method of vibratory drilling of the central part of a bottom of the lake Kotokel are determined. Comparison of average concentrations of lanthanides normalized on chondrite and ytterbium in samples of sapropel of the Lake Kotokel, a standard sample of silt from the central basin of Lake Baikal (BIL-1) and standard samples of clay shales is carried out. The similarity of spectra of lanthanides in samples of sapropel of the Lake Kotokel and the Baikal silt (BIL-1) and their essential difference from a spectrum of lanthanides in Paleozoic clay shales of Europe (ES) and North America (NASC) and also post-archaeal clay shales of Australia (PAAS) are established. It is shown that the spectrum of lanthanides in a section of sapropel of the Lake Kotokel agrees with studied earlier spectra of lanthanides in a sample of the Baikal silt (BIL-1) and in 3-meter section of sapropel of the Lake Ochki and in 4-meter section of a peat bog of the high Vydrinsky moor bog which mineral substance has atmospheric genesis. This coincidence of types of distribution of lanthanides is maintained during all Holocene period. This fact gives a good reason to talk about "the Baikal type" of the lanthanides distribution different from the lanthanides distribution in the standards of clay shales (ES, NASC and PAAS). The spectrum of the lanthanides distribution can be considered constant for mineral components of the Holocene section of the Lake Kotokel also typical for eolian material of a modern aerosol of the Baikal region

Key words: lanthanides; Holocene section of sapropel; organic substance; rock forming minerals; enrichment factors; clay shales; chondrite; Baikal silt; standard samples of comparison; eolian suspension

Введение. Накопление сапропелевых отложений является характерной чертой малых озер умеренных широт [9; 22], в том числе юга Западной Сибири, где физико-географические условия благоприятны для сапропелеобразования [3; 8; 13]. Гористый рельеф Прибайкалья обуславливает преимущественное минеральное осадконакопление в озерах, а условия для накопления органических осадков существуют, в частности, в озерах конечно-моренных возвышенностей, образованных плейстоценовыми ледниками на юго-восточном побережье Байкала. Крупные морены с сапропелевыми озерами расположены на Танхойской равнине южного побережья Байкала, в долинах рек Снежная и Выдринная, например, оз. Очки [7; 12; 14]. Прибрежные байкальские озера [17] также относятся к озерам с преимущественно сапропелевым типом осадконакопления, например, оз. Духовое [23] и оз. Котокель — объект данного исследования (рис. 1).

Озеро Котокель находится в гольцовой, таежной, горной ландшафтной зоне Восточного Прибайкалья. Оно занимает большую часть Котокельской впадины, расположенной на юго-восточном побережье Среднего Байкала. В морфоструктурном отношении Котокельская впадина представляет собой южный отрезок Ки-

кинско-Котокельско-Каточик-Туркинской группы впадин в пределах переходной зоны от Байкальского рифта к передовой ступени хребта Улан-Бургасы [18].

Озеро Котокель, расположенное на сниженной тектонической ступени, заполненной песчаными отложениями, имеет превышение над оз. Байкал немногим более 2 м. Ряд исследователей считает оз. Котокель бывшим заливом оз. Байкал, обособившимся в результате понижения уровня последнего [5; 10]. Другие геологи обосновывали генетическую связь с Байкалом не самого озера, а всего поля песчаных отложений [4]. Однако изучение собственно отложений оз. Котокель не показало наличие остатков байкальских организмов [6]. В настоящее время известна независимая от Байкала история оз. Котокель в течение последних 50 тыс. лет [7; 27].

Абсолютная отметка водного зеркала оз. Котокель — 458 м над уровнем моря, а Байкала — 455,5 м. Длина озера составляет 15 км, средняя ширина — 4,6 км, средняя глубина 4,0...4,5 м (максимальная 14 м), площадь акватории — 70 км², площадь водосбора — 183 км², мощность сапропелевой толщи ~20 м. Озеро Котокель является слабопроточным водоемом с замедленным водообменном, по низкому показателю удельного водосбора (2,6) относится к аккумулятивным водоемам [16].

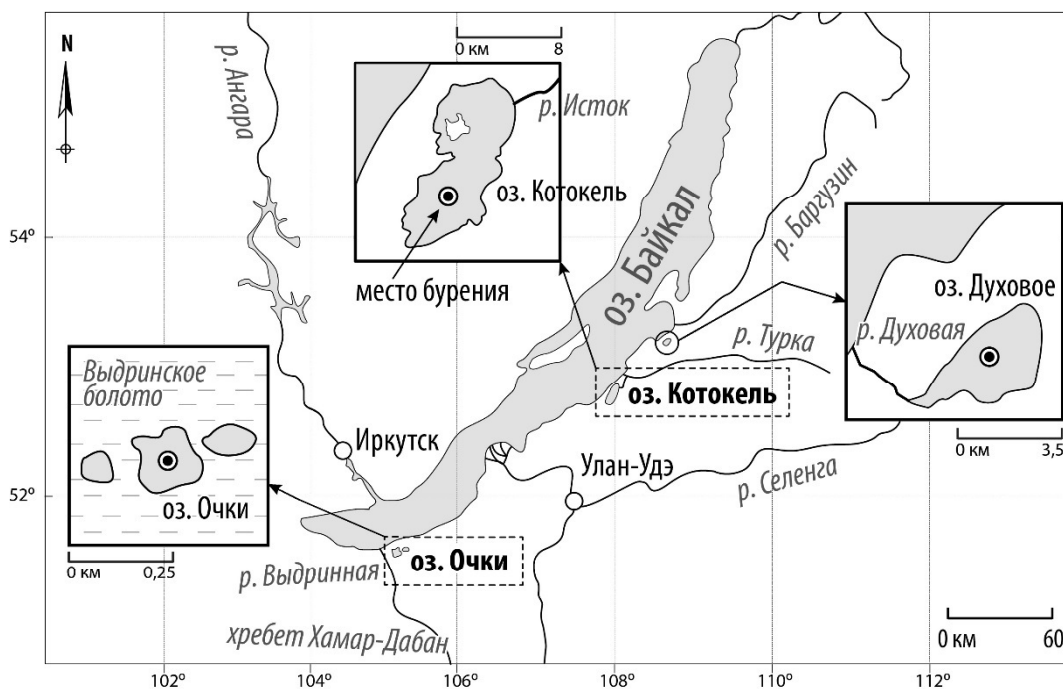


Рис. 1. Карта-схема расположения малых прибрежных озер Восточного Прибайкалья (Котокель, Духовое, Очки) и места бурения скважин / Fig. 1. Map-scheme of small coastal lakes location of the Eastern Pre-Baikal region (Kotokel, Dukhovoe, Oчки) and location of drilling wells

Цель данной работы – исследование распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) по шестиметровому разрезу сапропеля оз. Котокель. В целом РЗЭ в озерных сапропелях Сибирского региона мало изучены [11; 19; 20]. Главное свойство РЗЭ – полная инертность к биохимическим реакциям в депонирующем органическое вещество сапропелевых отложениях. РЗЭ дают возможность оценить терригенную и биогенную зольность сапропелей и сапропелеобразующего материала (планктон, макрофиты), а также долевых вкладов микроэлементов ($Me_{био}$ и $Me_{тер}$) в озерные сапропели [12].

Методология и методика исследования. Для достижения поставленной цели в сентябре 2012 г. в центральной части оз. Котокель пробурена скважина глубиной 14 м и получен непрерывный керн донных отложений с ненарушенной стратификацией (координаты бурения – $52^{\circ}79'50''$ с. ш., $108^{\circ}13'39''$ в. д.). Бурение проведено с помощью самостоятельно созданного в ИГМ СО РАН оборудования, неоднократно

но опробованного на многих озерах. Установка компактная, разборная, перевозится на автомобиле. Она состоит из надувного понтона водоизмещением около 5 т, вышки с грузоподъемными механизмами, бура с набором штанг, общей длиной 30 м. Оборудование и технология рассчитаны на бурение в водоемах с глубинами до 10...15 м и проникновение в отложения на 15...20 м. Принцип бурения вибрационный. Используется модифицированный поршневой бур Ливингстона, позволяющий брать колонки ненарушенного осадка длиной 2 м и диаметром 7 см. Как правило, этим буром мы проходим всю толщу озерных отложений и проникаем в подстилающие породы. Получение непрерывных кернов на всю глубину осадочной толщи до подстилающих пород является несомненным достоинством нашего подхода к исследованию геохимии донных осадков малых озер Сибири в отличие от большинства работ, выполненных по неполным разрезам (керны длиной до 100 см) [19; 20]. Нами детально исследован шестиметровый интервал керна оз. Котокель.

Для определения содержаний РЗЭ в донных осадках оз. Котокель использовали масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой (ИСП МС). Использование высокочувствительного масс-спектрометра ELEMENT в сочетании с ультразвуковым распылителем U-5000AT (для введения растворов) позволило снизить инструментальные пределы обнаружения РЗЭ и анализировать растворы с высокой степенью разбавления без потери данных (аналитики ЦКП ИГМ СО РАН – канд. хим. наук И. В. Николаева, канд. хим. наук С. В. Палесский, С. Ф. Нечепуренко). Правильность методики подтверждена сравнением результатов, полученных для наиболее достоверно аттестованных ГСО (государственный стандартный образец) с принятыми значениями. Относительное стандартное отклонение анализа составляет в среднем 2...5 % в зависимости от элементов и уровней их содержания [15].

Определение основных породообразующих оксидов выполнено рентгенофлуоресцентным анализом (РФА) в лаборатории рентгеноспектральных методов исследований ЦКП ИГМ СО РАН (аналитик Н. Г. Карманова).

Минеральный состав сапропеля исследован рентгеноструктурным анализом (метод порошковой дифрактометрии) на дифрактометре ДРОН-4 (режим съемки 40 кВ, 24 мА, медное излучение (Cu- α) в лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ЦКП ИГМ СО РАН (аналитик Л. В. Мирошниченко).

Изучение микроморфологии и вещественного состава образцов сапропеля и сапропелеобразующего материала (планктон, макрофиты) проводили с применением СЭМ (сканирующего электронного микроскопа) TESCAN MIRA 3 LMU.

Результаты исследования и их обсуждение. Опробованный шестиметровый

интервал керна оз. Котокель представляет собой тонкоструктурный коллоидальный осадок оливкового цвета, вещество которого, по данным СЭМ, состоит из полуразложившихся органических остатков цианобактерий и большого количества диатомовых водорослей. Результаты комплексного биологического анализа (подсчет сохранившихся по глубине разреза остатков организмов), приведенные в публикации Н. В. Кордэ, свидетельствуют о планктонном генезисе захороненного органического вещества и позволяют классифицировать донные отложения оз. Котокель как планктоногенный сапропель. Однородность вещественного состава сапропеля по всему разрезу иллюстрирует равномерное распределение значений плотности, варьирующихся в небольших пределах (рис. 2). Плотность сапропеля увеличивается по глубине разреза от 0,04...0,06 г/см³ в интервале керна (0...200 см) до 0,05...0,07 г/см³ в интервале (200...400 см) и до 0,07...0,10 г/см³ в интервале (400...600 см). Обводненность (влажность) осадка по глубине разреза очень высокая и составляет 89...96 %. В целом от верхних слоев к нижним по разрезу наблюдается тенденция увеличения плотности и уменьшения влажности сапропеля. Содержание органического вещества изменяется от 60 до 70 %, зольность соответственно от 40 до 30 %.

В химическом составе сапропеля оз. Котокель преобладает оксид кремния (SiO₂). Его среднее содержание по разрезу составляет ~25 % (табл. 1). Средние содержания оксида алюминия (Al₂O₃) и оксида железа (Fe₂O₃) составляют ~4 %, а оксида кальция (CaO) довольно низкие – около 1 %. Высокие содержания железа и низкие кальция являются геохимической особенностью планктоногенного сапропеля оз. Котокель.

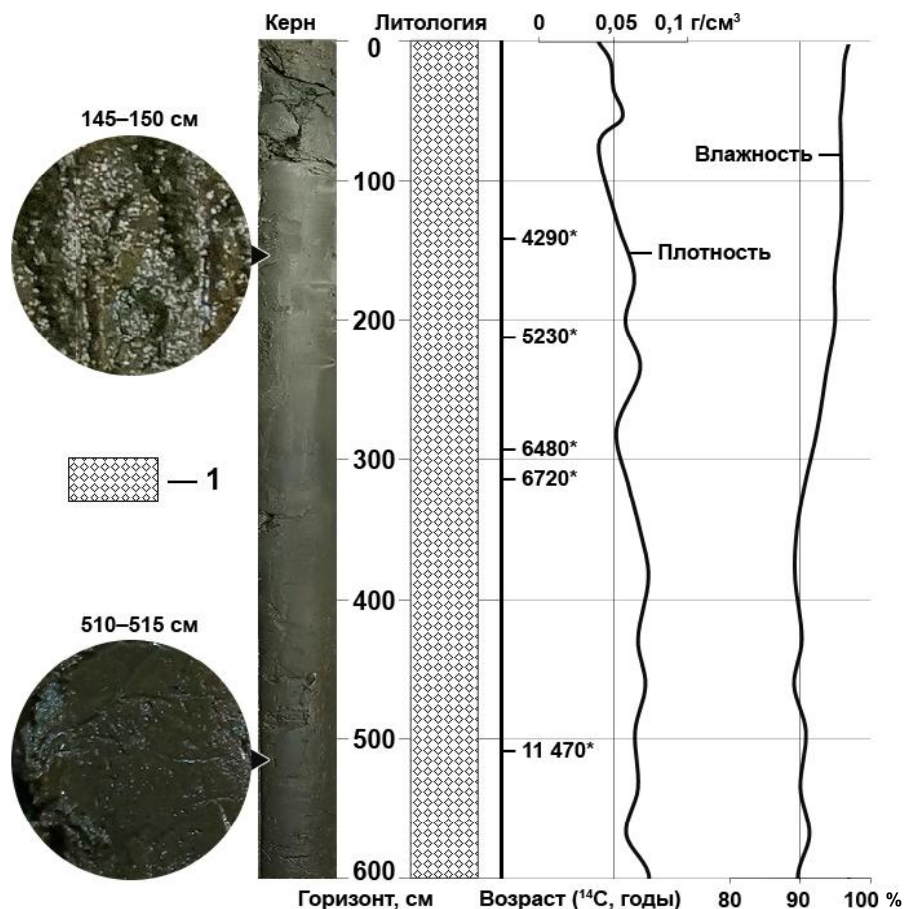


Рис. 2. Литостратиграфия ядра, распределение плотности и влажности по разрезу отложений оз. Котокель (1 – планктоногенный сапропель оливкового цвета, темнеющего к нижним горизонтам. Датировки возраста взяты из [1]) / Fig. 2. Core lithostratigraphy, distribution of density and humidity along the section of the lake. Kotokel deposits (1 – planktonogenic sapropel of olive color, darkening to the lower horizons. Dating ages are taken from [1])

Таблица 1 / Table 1

Химический состав донных отложений оз. Котокель* / Chemical composition of bottom sediments of the lake Kotokel

Слой, см / Layer, cm	ППП, %	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MgO, %	CaO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	P ₂ O ₅ , %	SO ₃ , %
0–4	64,9	20,3	4,3	6,5	0,69	0,86	0,55	0,59	0,27	0,17
44–55	57,8	26,4	5,5	6,0	0,77	0,91	0,72	0,70	0,19	0,19
88–99	60,6	23,9	5,3	5,8	0,78	1,1	0,70	0,70	0,19	0,22
143–154	61,0	26,7	3,9	4,3	0,64	1,1	0,46	0,53	0,23	0,39
200–210	59,9	27,0	4,2	4,5	0,62	1,1	0,55	0,56	0,22	0,38
230–240	58,1	29,3	4,2	3,6	0,70	1,5	0,59	0,57	0,27	0,64
270–280	68,5	21,0	3,6	3,1	0,56	1,2	0,49	0,49	0,20	0,42
300–310	65,0	24,5	3,4	3,5	0,51	0,9	0,43	0,43	0,17	0,40
340–350	65,1	24,0	3,6	3,2	0,60	1,3	0,50	0,47	0,20	0,60
380–390	65,3	24,1	3,9	3,0	0,61	1,2	0,53	0,49	0,19	0,54
Среднее содержание / Average content										
	62,7±3,6	24,7±3	4,2±0,7	4,4±1,3	0,7±0,6	1±0,2	0,6±0,1	0,5±0	0,2±0	0,4±0,1

Примечание. * данные приведены на сухое вещество, ППП – потери при прокаливании на воздухе при 900 °С

Главными породообразующими минералами зольной части сапропеля являются слюда, кварц, плагиоклаз, хлорит, второстепенными – пирит, амфибол, гипс, полевые шпаты и иллит (рис. 3). Большое количество слюды в материале сапропеля, в целом, характерно и для осадков других изученных озер прибайкальского региона – Духовое и Очки [12; 23]. Пирит встречается по всему разрезу, в интервале 40...160 см его содержание падает до следовых уровней, а с горизонта 440 см пирит исчезает и вновь появляется только в интервале 590...600 см. В слое 40 см обнаружены скопления родохрозита, который характерен для восстановленных слоев дон-

ных отложений большинства озер. Хорошо выражена рентгеноаморфная фаза, основную долю которой составляет органическое вещество и аморфный (диатомовый) кремнезем. В интервале 230 см обнаружены оксиды марганца (рамселит, $\gamma\text{-MnO}_2$) – возможные реликты прошлых окислительных обстановок осадка. Повсеместное обнаружение пирита (уже в верхних интервалах осадка) и местами родохрозита свидетельствует о восстановительной обстановке и активных процессах сульфатредукции.

В образцах сапропеля оз. Котокель по глубине разреза (слои 0–2, 2–4, 88–98, 380–390, 485–492, 589–592 см) определено 14 лантаноидов (табл. 2).

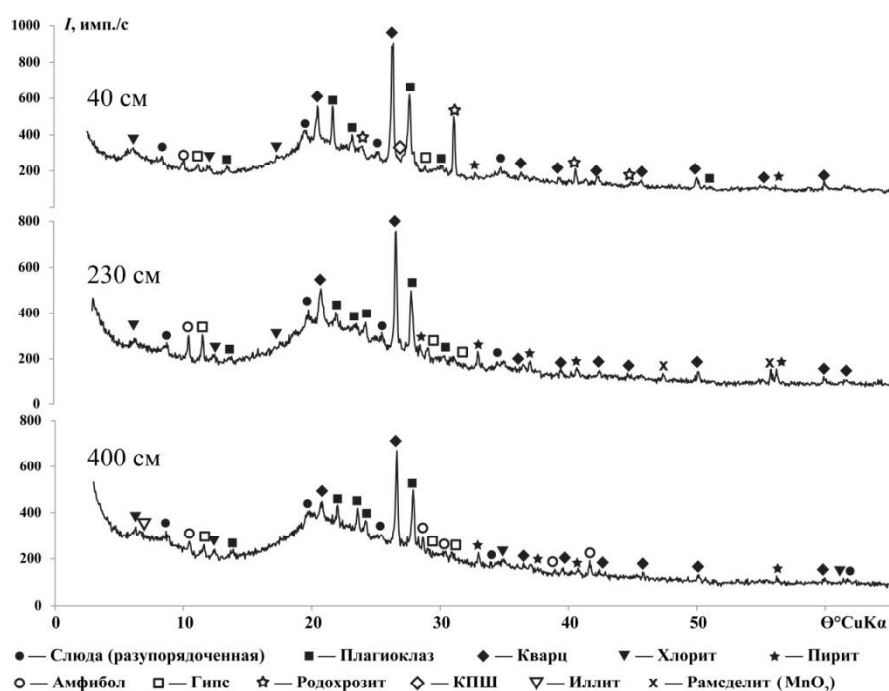


Рис. 3. Дифрактограммы разных слоев планктоногенного сапропеля оз. Котокель /
 Fig. 3. Diffractograms of different layers of planktonogenic sapropel of the lake Kotokel

Таблица 2 / Table 2

Содержание лантаноидов в разных слоях керна сапропеля оз. Котокель, мг/кг на сухое вещество / Content of lanthanides in different layers of sapropel core of the lake Kotokel, mg / kg for dry substance

Слой, см / Layer, cm	0–2 см	2–4 см	88–98 см	380–390 см	485–492 см	589–592 см
La	8,25	7,26	8,76	2,98	14,5	12,5
Ce	15,16	13,88	16,65	5,9	29,0	23,5
Pr	1,85	1,70	2,07	0,70	3,10	2,70
Nd	6,41	6,03	7,14	2,48	11,5	9,7

Слой, см / Layer, cm	0–2 см	2–4 см	88–98 см	380–390 см	485–492 см	589–592 см
Sm	1,15	1,04	1,26	0,48	2,15	1,80
Eu	0,25	0,23	0,29	0,11	0,41	0,36
Gd	1,04	0,94	1,20	0,44	1,85	1,60
Tb	0,16	0,15	0,19	0,07	0,29	0,24
Dy	0,87	0,84	1,01	0,39	1,70	1,35
Ho	0,18	0,17	0,20	0,08	0,33	0,26
Er	0,25	0,23	0,29	0,11	0,96	0,75
Tm	0,075	0,075	0,088	0,032	0,15	0,12
Yb	0,50	0,47	0,56	0,21	0,97	0,74
Lu	0,075	0,075	0,083	0,033	0,14	0,11

Нормированные по хондриту значения, сопоставленные с хондритовым содержанием иттербия в каждом образце, позволяют устанавливать тип нормированного спектра лантаноидов для различных образцов независимо от абсолютных значений в них лантаноидов. Тип нормированного по хондриту спектра лантаноидов принято оценивать отношением La_h/Yb_h и значением европиевого минимума Eu/Eu^* [24]. По этим параметрам представлены на рис. 4 спектры лантаноидов в образцах сапропеля

оз. Котокель имеют хорошее совпадение между собой (с вариабельностью < 10 %) и со стандартным образцом ила центральной котловины оз. Байкал (БИЛ-1) [25]. Отмечается существенное отличие от спектра лантаноидов глинистых сланцев [26], который, в свою очередь, совпадает со спектром лантаноидов в палеозойских глинистых сланцах Европы (ES) и Северной Америки (NASC), а также постархейских глинистых сланцах Австралии (PAAS) [21].

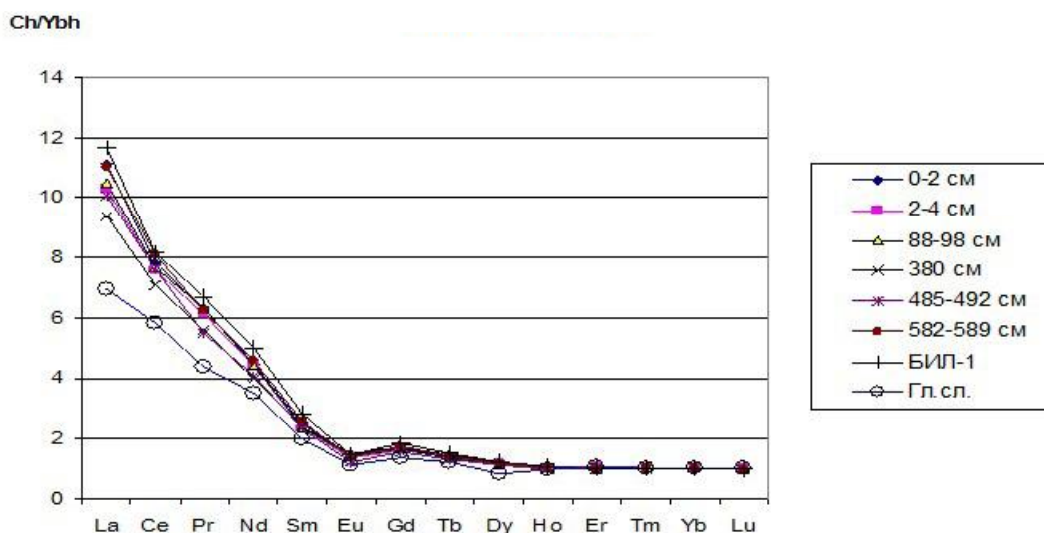


Рис. 4. Относительное распределение нормированных по хондриту [24] и иттербию средних содержаний лантаноидов в образцах сапропеля шестиметрового ядра оз. Котокель, в байкальском иле (БИЛ-1) [25] и глинистых сланцах [26] / Fig. 4. Relative distribution of the average content of lanthanides normalized by chondrites [24] and ytterbium in samples of sapropel of the six-meter core of the lake Kotokel, in Baikal silts (BIL-1) [25] and shales [26]

РЗЭ (лантаноиды) могут дать достаточно надежную информацию об источнике минерального (терригенного) вещества, поступающего в озерные отложения. Минеральная компонента озерных илов характеризуется значительной долей мелкодисперсного обломочного материала, что находит выражение в однородности спектра РЗЭ. Устойчивый характер спектра объясняется С. Р. Тейлором и С. М. Мак-Леннаном [21] тем, что РЗЭ, а также Ti, Zr, Hf, Th, Nb являются относительно неподвижными в процессе химического и физического выветривания коренных пород, перемешивания и глобального воздушного переноса обломочного материала в осадочные бассейны. Выдержанность спектра лантаноидов в верхнем интервале разреза (0...600 см) сапропеля оз. Котокель можно предположительно объяснить поступлением на водное зеркало озера эолового материала с атмосфер-

ными выпадениями (вымывание дождем и снегом). Для объяснения этого предположения заново обработаны результаты инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) снеговых проб Южной котловины оз. Байкал (съёмка 1997 г.) и образцов воздушных (аэрозольных) фильтров, отобранных летом на носу исследовательского судна «Гидромет» в 1980–1983 гг. [2]. Несмотря на то, что ИНАА не дает полного спектра редкоземельных лантаноидов, достаточно надежно определяются La, Sm, Eu, Tb, Yb и Eu/Eu*.

Эоловая взвесь в снеговых пробах (С-1, С-2, С-3, С-5, С-7) Южной, Центральной и Северной котловин Байкала (ЮК, ЦК, СК) (рис. 5) по значениям La_n/Yb_n близка к глинистому сланцу из сводки [26] (табл. 3). В северной котловине вблизи хребта Баргузин (СКБ) отношение La_n/Yb_n в снеговых пробах достигает максимального значения – 31,7.

Таблица 3 / Table 3

Нормированные по хондриту и иттербию содержания лантаноидов в эоловой взвеси снеговых проб оз. Байкала* / Content of lanthanides, normalized by chondrites and ytterbium, in the eolian suspension of snow samples from the lake Байкал*

Элемент / Element	С-1	С-2	С-3	С-4	С-5	С-6	С-7	ЮК	ЦК	СКБ	СК
La	6,3	7,0	6,0	5,5	7,6	3,8	7,4	7,3	6,9	31,7	8,4
Ce	4,9	6,5	4,7	4,7	5,8	3,6	6,3	5,5	4,5	12,2	5,9
Nd	3,5	3,0	3,5	3,3	3,3	3,0	4,6	5,0	3,8	5,3	4,9
Sm	1,8	2,2	1,9	3,6	2,4	1,6	2,3	2,5	2,1	4,1	2,5
Eu	1,2	1,2	1,0	1,2	1,5	0,6	1,4	1,0	0,9	1,8	0,7
Gd	1,5	1,5	1,2	1,6	1,7	1,1	1,6	–	–	–	–
Tb	1,4	1,3	1,2	1,4	1,4	0,9	1,3	1,1	1,0	2,6	1,3
Tm	1,0	0,7	0,4	0,8	–	–	0,8	–	–	–	–
Yb	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Lu	0,8	0,8	0,8	0,8	1,3	0,8	0,8	0,7	1,1	1,1	0,6
Eu/Eu*	0,73	0,65	0,64	0,46	0,73	0,44	0,72	0,5	0,4	0,5	0,33

Примечание. * С – точки отбора проб снега в 1997 г.; точки отбора аэрозоля на воздушные фильтры летом 1981 г.: ЮК – Южная котловина, хребет Хамар-Дабан; ЦК – Центральная котловина, долина р. Голоустная; СК – северная котловина; СКБ – Северная котловина вблизи хребта Баргузин; прочерк – отсутствие данных

Высокие значения отношения La_n/Yb_n (9–15) отмечены и в образцах аэрозоля воздушных фильтров, отобранных в летний период 1980–1983 гг. (табл. 4). Отношение европиевого минимума (Eu/Eu*) варьирует в снеговых пробах от 0,33 до 0,73, а в аэрозоле летнего периода от 0,42

до 0,57. Спектр распределения лантаноидов можно считать постоянным для минеральной компоненты голоценового разреза оз. Котокель, характерного также и для эолового материала современного аэрозоля Прибайкальского региона.



Рис. 5. Схема расположения точек отбора снеговых проб (С-1, С-2, С-3, С-4, С-5, С-6, С-7) и образцов атмосферного аэрозоля (О113, П-52, П-53, 117, П-20, П-21) [2] / Fig. 5. The location of the sampling points of snow samples (С-1, С-2, С-3, С-4, С-5, С-6, С-7) and samples of atmospheric aerosol (О113, P-52, P-53, 117, P-20, P-21) [2]

Таблица 4 / Table 4

Нормированные по хондриту и иттербию содержания лантаноидов в атмосферном (летнем) аэрозоле Северной Котловины оз. Байкал, 1980–1983 гг. / Content of lanthanides normalized by chondrite and ytterbium in the atmospheric (summer) aerosol of the Northern basin of the lake Baikal, 1980–1983

Элемент / Element	О113	П-52	П-53	317	П-20	П-21
La	9,07	13,88	12,84	13,33	12,23	15,59
Ce	7,49	9,89	9,90	10,70	10,04	12,77
Nd	4,86	5,53	5,36	6,33	6,27	7,95
Sm	2,96	3,47	3,50	3,90	4,14	4,86
Eu	1,11	1,65	1,78	1,47	1,65	1,97
Gd	1,95	2,14	2,33	2,57	2,47	2,90
Tb	1,67	1,69	1,70	1,80	1,70	1,93
Yb	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lu	0,90	0,76	0,87	0,89	0,87	0,81
Eu/Eu*	0,42	0,55	0,57	0,42	0,46	0,47

Спектр лантаноидов ранее изученного разреза оз. Очки [11] совпадает со спектром лантаноидов в торфяном разрезе Выдринского верхового болота, минеральное вещество которого имеет атмосферный генезис. Это совпадение типов распределения лантаноидов выдерживается в течение всего голоценового периода в трехметровой толще планктоногенного сапропеля оз. Очки и четырехметровом торфянике

Выдринского болота [12]. La_h/Yb_h отношение (10,5) в сапропеле оз. Очки близко к таковому в байкальском иле (БИЛ-1) и сапропеле оз. Котокель, что дает основание говорить о «байкальском типе» распределения лантаноидов, отличного от стандартов ES, NASC, PAAS.

Выводы. 1. Установлена близость спектров лантаноидов между собой в исследованных слоях сапропеля оз. Котокель

по глубине шестиметрового разреза и стандартном образце байкальского ила из центральной котловины оз. Байкал (БИЛ-1) и существенное отличие от спектра лантаноидов в глинистых сланцах из сводки [26], который близок к спектрам лантаноидов в палеозойских глинистых сланцах Европы (ES) и Северной Америки (NASC), постаршеих глинистых сланцах Австралии (PAAS) [21].

2. Спектр лантаноидов и отношение La_n/Yb_n в сапропеле оз. Котокель сходны со спектрами лантаноидов и отношением La_n/Yb_n в сапропеле оз. Очки, стандартном образце байкальского ила (БИЛ-1), что дает основание сделать предположение о «байкальском типе» распределения лантаноидов, отличного от стандартов ES, NASC, PAAS.

Список литературы

1. Безрукова Е. В., Тарасов П. Е., Кулагина Н. В., Абзаева А. А., Летунова П. П., Кострова С. С. Палинологическое исследование донных отложений озера Котокель (район озера Байкал) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 2. С. 586–595.
2. Бобров В. А., Ходжер Т. В., Гранина Л. З., Мельгунов М. С., Колмогоров Ю. П., Пословин А. Л. Редкоземельные элементы в эоловой и речной взвеси в регионе озера Байкал // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 1–2. С. 267–277.
3. Джабарова Н. К., Немирович-Данченко Л. А. Физико-химическая характеристика сапропелей озера Кирек // Курортные ресурсы и санаторно-курортное лечение в Сибири. Томск, 1982. С. 31–36.
4. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история / В. Д. Мац [и др.]. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.
5. Кожов М. М. Озеро Котокель (гидробиологический очерк) // Известия Биолого-географического научно-исследовательского института при Восточно-Сибирском государственном университете. 1938. Т. 8. Вып. 1–2. С. 1–45.
6. Кордэ Н. В. Биостратиграфия отложений озера Котокель // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. М.: Наука, 1968. С. 150–170.
7. Кривоногов С. К. Осадконакопление во впадинах Байкальской рифтовой зоны в позднем плейстоцене и голоцене: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 25.00.01. Иркутск, 2010. 32 с.
8. Кривоногов С. К., Леонова Г. А., Мальцев А. Е., Бобров В. А. Стратиграфия и возраст сапропелей в озерах юга Западной Сибири // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. Т. 2. С. 102–105.
9. Курзо Б. В., Гайдукевич О. М., Кляуззе И. В., Зданович П. А. Особенности формирования вещественного состава сапропеля органического типа в озерах различных регионов Беларуси // Природопользование. 2012. Вып. 21. С. 183–191.
10. Ламакин В. В. О стратиграфическом расчленении четвертичной системы в береговой полосе Байкала // Труды Института географии АН СССР. 1959. Вып. 32. С. 45–69.
11. Леонова Г. А., Бобров В. А., Климин М. А., Копотева Т. А., Кривоногов С. К. Редкоземельные элементы в голоценовом разрезе сапропеля озера Очки (Южное Прибайкалье) // Геология и минеральные сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с. Ч. 2. С. 113–117.
12. Леонова Г. А., Бобров В. А., Кривоногов С. К., Богущ А. А., Бычинский В. А., Мальцев А. Е., Аношин Г. Н. Биогеохимические особенности формирования сапропеля в бессточных озерах Прибайкалья (на примере озера Очки) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 5. С. 949–970.
13. Меленевский В. Н., Леонова Г. А., Конышев А. С. Результаты исследования органического вещества современных осадков озера Белое (Западная Сибирь) по данным пиролитических методов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 751–762.

14. Меленевский В. Н., Леонова Г. А., Бобров В. А., Каширцев В. А., Кривоногов С. К. Трансформация органического вещества в голоценовых осадках озера Очки (Южное Прибайкалье) по данным пиролиза // *Геохимия*. 2015. № 10. С. 925–944.
15. Николаева И. В., Палесский С. В., Козьменко О. А., Аношин Г. Н. Определение редкоземельных и высокозарядных элементов в стандартных геологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП МС) // *Геохимия*. 2008. № 10. С. 1085–1091.
16. Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология / Л. Л. Убутонов [и др.]; отв. ред. Н. М. Проппин, Л. Л. Убутонов. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2013. 340 с.
17. Покатилов Ю. Г. Биогеохимия гидросферы Восточной Сибири. Новосибирск: СО РАН, 2000. 248 с.
18. Сейсмоструктура и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / под ред. В. П. Солоненко. М.: Наука, 1968. 220 с.
19. 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.
20. Струнина Н. Н., Коваленко Т. А., Байсова Б. Т., Адеева Л. Н. Изучение распределения редкоземельных элементов по фракциям сапропеля атомно-эмиссионным методом // *Вестник Омского университета*. 2008. № 4. С. 57–59.
21. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
22. Топачевский И. В. Сапропели пресноводных водоемов Украины // *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2011. № 1. С. 66–72.
23. Bogush A. A., Leonova G. A., Krivonogov S. K., Bobrov V. A., Tikhova V. D., Kondratyeva L. M., Kuzmina A. E., Maltsev A. E. Diagenetic transformation of sapropel from Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // *Procedia Earth and Planetary Science*. ELSEVIER. 2013. No. 7. P. 81–84.
24. Bounton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
25. Govindaraju K. Compilation of working values and description for 383 geostandards // *Geostandards Newsletter*. 1994. No. 18. P. 1–158.
26. Li Yuan-hui. Distribution patterns of the elements in the ocean: a synthesis // *Geochimistry et Cosmochemistry Acta*. 1991. Vol. 55. P. 3223–3240.
27. Shichi K., Takahara H., Krivonogov S. K., Bezrukova E. V., Kashiwaya K., Takehara A., Nakamura T. Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate records from Lake Kotokel, central Baikal region // *Quaternary International*. 2009. Vol. 205. P. 98–110.

References

1. Bezrukova E. V., Tarasov P. E., Kulagina N. V., Abzaeva A. A., Letunova P. P., Kostrova S. S. *Geologiya i geofizika* (Geology and geophysics), 2011, vol. 52, no. 2, pp. 586–595.
2. Bobrov V. A., Hodger T. V., Granina L. Z., Melgunov M. S., Kolmogorov Yu. P., Poslovin A. L. *Geologiya i geofizika* (Geology and geophysics), 2001, vol. 42, no. 1–2, pp. 267–277.
3. Dzhabarova N. K., Nemirovich-Danchenko L. A. *Kurortnye resursy i sanatorno-kurortnoe lechenie v Sibiri* (Resort resources and sanatorium-resort treatment in Siberia). Tomsk, 1982, pp. 31–36.
4. *Kaynozoy Baykalskoy riftovoy vpadiny: stroenie i geologicheskaya istoriya* (Cenozoic of the Baikal rift basin: structure and geological history) / V. D. Matz (ets.). Novosibirsk: Geo, 2001. 252 p.
5. Kozhov M. M. *Izvestiya Biologo-geograficheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta pri Vostochno-Sibirskom gosudarstvennom universitete* (News of the Biological and Geographical Research Institute at the East-Siberian State University), 1938, vol. 8, issue. 1–2, pp. 1–45.
6. Corday N. *Mezozoykie i kaynozoykie ozera Sibiri* (Mesozoic and Cenozoic lakes of Siberia). Moscow: Science, 1968, pp. 150–170.
7. Krivonogov S. K. *Osadkonakoplenie vo vpadinah Baykalyskoy riftovoy zony v pozdnem pleystotsene i golotsene: avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk: 25.00.01* (Precipitation in the depressions of the Baikal rift zone in the Late Pleistocene and Holocene: Abstract dis. ... dr. geol.-min. sciences: 25.00.01). Irkutsk, 2010. 32 p.
8. Krivonogov S. K., Leonova G. A., Maltsev A. E., Bobrov V. A. *Osadochnye bassejny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoy istorii: materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* (Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history: proceedings of the 7th All-Russian Lithological Conference). Novosibirsk: INGG SB RAS, 2013, vol. 2, pp. 102–105.

9. Kurzo B. V., Gaidukevich O. M., Klyuzze I. V., Zdanovich P. A. *Prirodopolzovanie* (Nature management), 2012, vol. 21, pp. 183–191.
10. Lamakin V. V. *Trudy Instituta geografii AN SSSR* (Works of the Institute of Geography of the USSR Academy of Sciences), 1959, issue. 32, pp. 45–69.
11. Leonova G. A., Bobrov V. A., Klimin M. A., Kopoteva T. A., Krivonogov S. K. *Geologiya i mineralnye syrievye resursy Sibiri* (Geology and Mineral Resources of Siberia), 2014, no. 3s, part 2, pp. 113–117.
12. Leonova G. A., Bobrov V. A., Krivonogov S. K., Bogush A. A., Bychinsky V. A., Maltsev A. E., Anoshin G. N. *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 2015, vol. 56, no. 5, pp. 949–970.
13. Melenevsky V. N., Leonova G. A., Konyshev A. S. *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 2011, vol. 52, no. 6, pp. 751–762.
14. Melenevsky V. N., Leonova G. A., Bobrov V. A., Kashirtsev V. A., Krivonogov S. K. *Geohimiya* (Geochemistry), 2015, no. 10, pp. 925–944.
15. Nikolaeva I. V., Paleskiy S. V., Kozmenko O. A., Anoshin G. N. *Geohimiya* (Geochemistry), 2008, no. 10, pp. 1085–1091.
16. *Ozero Kotokelskoe: prirodnye usloviya, biota, ekologiya* (Kotokelko Lake: natural conditions, biota, ecology) / L. L. Ubugunov (ets); rep. ed. N. M. Pronin, L. L. Ubugunov. Ulan-Ude: BNTS SB RAS, 2013. 340 p.
17. Pokatilov Yu. G. *Biogeohimiya gidrosfery Vostochnoy Sibiri* (Biogeochemistry of the hydrosphere of Eastern Siberia). Novosibirsk: SB RAS, 2000. 248 p.
18. *Seismotektonika i seismichnost riftovoy sistemy Pribaykaliya* (Seismotectonics and seismicity of the rift system of the Pre-Baikal region) / ed. V. P. Solonenko. Moscow: Science, 1968. 220 p.
19. Strakhovenko V. D., Scherbov B. L., Malikova I. N., Vossel Yu. S. *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 2010, vol. 51, no. 11, pp. 1501–1514.
20. Strunina N. N., Kovalenko T. A., Baisova B. T., Adeeva L. N. *Vestnik Omskogo universiteta* (Bulletin of the Omsk University), 2008, no. 4, pp. 57–59.
21. Taylor S., McLennan S. M. *Kontinentalnaya kora: ee sostav i evolyutsiya* (Continental Crust: Its Composition and Evolution). Moscow: World, 1988. 384 p.
22. Topachevsky I. V. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana* (Geology and minerals of the World Ocean), 2011, no. 1, pp. 66–72.
23. Bogush A. A., Leonova G. A., Krivonogov S. K., Bobrov V. A., Tikhova V. D., Kondratyeva L. M., Kuzmina A. E., Maltsev A. E. *Procedia Earth and Planetary Science* (Procedia Earth and Planetary Science), ELSEVIER, 2013, no. 7, pp. 81–84.
24. Bounton W. V. *Rare earth element geochemistry* (Rare earth element geochemistry). Amsterdam: Elsevier, 1984, pp. 63–114.
25. Govindaraju K. *Geostandards Newsletter* (Geostandards Newsletter), 1994, no. 18, pp. 1–158.
26. Li Yuan-hui *Geochimistry et Cosmochemistry Acta* (Geochimistry et Cosmochemistry Acta), 1991, vol. 55, pp. 3223–3240.
27. Shichi K., Takahara H., Krivonogov S. K., Bezrukova E. V., Kashiwaya K., Takehara A., Nakamura T. *Quaternary International* (Quaternary International), 2009, vol. 205, pp. 98–110.

Коротко об авторах

Бобров Владислав Андреевич, канд. геол.-минер. наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: геохимический фон, потоки минерального вещества
bobr@igm.nsc.ru

Леонова Галина Александровна, д-р геол.-минер. наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: биогеохимия, живое вещество, торфяники, озерные сапрпели
leonova@igm.nsc.ru

Мальцев Антон Евгеньевич, канд. геол.-минер. наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: биогеохимия, диагенез, поровые воды
maltsev@igm.nsc.ru

Briefly about the authors

Vladislav Bobrov, candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher, Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: geochemical background, flows of mineral matter

Galina Leonova, doctor of geological and mineralogical sciences, leading researcher, Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: biogeochemistry, living matter, peatlands, lake sapropel

Anton Maltsev, candidate of geological and mineralogical sciences, researcher, Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: biogeochemistry, diagenesis, pore waters

Работа выполнена в рамках государственного задания – проект № 0330-2016-0011, при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-05-00403_а, 18-35-00072 мол_а, 17-45-540063 р_а, № 17-45-540527 р_а. Аналитические исследования проведены в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН»

Образец цитирования

Бобров В. А., Леонова Г. А., Мальцев А. Е. Редкоземельные элементы (лантаноиды) в голоценовом разрезе сапропеля озера Котокель (Восточное Прибайкалье) // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2019. Т. 25. № 2. С. 4–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-2-4-16.

Bobrov V., Leonova G., Maltsev A. Rare-earth elements (lantanoids) in the holocene section of sapropel lake Kotokel (Eastern Pre-Baikal Region) // Transbaikal State University Journal, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 4–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-2-4-16.

Статья поступила в редакцию: 04.09.2018 г.
Статья принята к публикации: 22.01.2019 г.

