

Микроэлементный состав донных осадков озера Байкал (район Академического хребта)

Т.Г.РЯЩЕНКО, С.И.ШТЕЛЬМАХ, Е.Г.ВОЛОГИНА (Институт земной коры СО РАН; 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128).

Рассматриваются результаты исследования содержания и распределения микроэлементов в поверхностных донных осадках (интервал 0–100 см) озера Байкал. Концентрации 25 микроэлементов определялись с помощью спектрометра S8 TIGER. Изучены группы токсичных (с расчетами специального показателя загрязнения Zc), преобладающих и второстепенных компонентов, рассчитаны различные индикаторные коэффициенты, проведена статистическая обработка данных. На основании полученных материалов установлены признаки для выделенных в разрезах-колонках голоценовых иллов и позднеплейстоценовых глин. Сходство осадков с континентальными лессовыми отложениями установлено по ванадию, барии, стронцию и рубидию.

Ключевые слова: микроэлементы, содержание, донные осадки, ил, глина, загрязнение, индикаторные коэффициенты.

Рященко Тамара Гурьевна
Штельмах Светлана Ивановна
Вологина Елена Геннадьевна



ryashenk@crust.irk.ru
fotina78@gmail.com
vologina@crust.irk.ru

Microelemental composition of bottom sediments of the Baikal lake (the Academic ridge area)

T.G.RYASHCHENKO, S.I.SHTEL'MAKH, E.G.VOLOGINA

The article considers the research results of the microelement contents and distribution in the superficial bottom sediments of the Baikal lake (0–100 cm range). The concentrations of 25 microelements were determined using the S8 TIGER spectrometer. The groups of toxic, dominant and secondary components were studied (with the calculations of the special pollution index Zc), various indicative coefficients were calculated, and the statistical data was processed. Based on the obtained materials, the features of the identified Holocene muds and the Late Pleistocene clays were revealed in the lithological sections. The similarity of the sediments with the continental loessial deposits was established with respect to the vanadium, barium, strontium, and rubidium concentrations.

Key words: microelements, content, bottom sediments, mud, clay, pollution, indicative coefficients.

Изучение донных осадков озера Байкал проводилось в 1993–1999 гг. в рамках Международного проекта «Байкалбурение» [4]. Т.Г.Рященко с коллегами занималась анализом материалов по скв. BDP-1-93 глубиной 100 м для выявления присутствия элементарных золотых слоев в донных осадках в результате сопоставления последних с континентальными лессовыми отложениями Иркутско-Черемховской равнины [11]. В 2003 г. появилась возможность изучить микроструктуру, химический состав и некоторые физико-химические свойства самой верхней (0–100 см) части разреза в районе Академического хребта по кернам 17, 18, 19, 22 (21 образец), полученным в рамках работ по интеграционному проекту GEOPASS (Геохимический круговорот, источники и формирование осадков в

оз. Байкал); отбор проводился с помощью грунтовой трубки EAWAG-63/S, интервал опробования составил 10 см (0–10, 10–20, 20–30 см и др.) [7].

Отложения представлены следующими геолого-генетическими комплексами (ГГК): биогенно-терригенными илами и подстилающими их глинами. Илы являются осадками, накопленными в спокойной обстановке седиментации, образованы преимущественно терригенным материалом. Оценка скоростей современного осадконакопления, литологические данные и результаты диатомового анализа указывают на голоценовый возраст (Q₄) поверхностных илов [1, 10]. Горизонт глин имеет позднеплейстоценовый возраст (Q₃), поскольку в его верхней части обнаружен *Stephanodiscus flabellatus*. Календарный возраст отложений, в которых

отмечается пик этого вида, оценивается в 14 000 календарных лет [10, 18, 21].

Результаты изучения микроструктуры, химического состава и свойств образцов осадков по указанным выше кернам (колонкам) были представлены в специальном разделе монографии [12].

Значительно позже те же самые образцы явились объектами изучения их микроэлементного состава с целью сопоставлений с континентальными лёссовыми толщами Прибайкалья и глинистыми отложениями разнообразных геолого-генетических комплексов. Кроме того, проводились расчеты специального показателя Zc для оценки степени загрязнения осадков и индикаторных отношений (коэффициентов) различных микроэлементов, отражающих общие геохимические особенности толщи. На основе полученных данных установлены признаки для выделенных в разрезах-колонках голоценовых илов и позднплейстоценовых глин.

В статье показаны результаты исследования содержания микроэлементов в поверхностных донных осадках (интервал 0–100 см) озера Байкал.

Методика. Концентрации микроэлементов определялись с помощью спектрометра S8 TIGER (Германия, фирма Брукер) [9]. Использовалась рентгеновская трубка с анодом из родия. Высокое напряжение составляло 40–50 кВ, сила тока – 40–50 мА, в случае определения фтора – 70 мА. Время регистрации аналитического сигнала изменялось от 60 до 100 с, время измерения фона – 30–60 с.

Установлено содержание (ppm) следующих микроэлементов: V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Sn, Ba, Sr, Zr, Ce, Rb, S, F, La, Nd, Y, Nb, Ga, W, Mo, U, Th (всего 25). Кроме того, определялась концентрация (в %) некоторых породообразующих оксидов (TiO₂, CaO, Fe₂O₃, MnO) для расчета ряда индикаторных отношений (Ti/Zr, Ca/Sr, Mn/Fe). При обработке полученных данных применялась программа «Стандартная статистика» (EXSEL).

Выделена группа токсичных элементов – V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Sn, F. Кроме того, по содержанию установлены преобладающие (Ba, Sr, Ce, S, Zr, Rb) и второстепенные (La, Nd, Y, Ga, Th, Mo, U, Nb, W) компоненты. В первом случае концентрация преимущественно >100 ppm, во втором <50 ppm, но может возрастать до 160 или составлять <5 ppm.

Оценка уровня химического загрязнения проводилась по суммарному показателю (Zc), отражающему эффект воздействия Co, Ni, Cu, Zn, As. Расчет выполняется следующим образом: $Zc = \sum [Kd - (n-1)]$, где Kd – коэффициент концентрации i-элемента в образце, равный для Co, Ni, Cu, Zn отношению концентрации токсичного элемента к фоновому содержанию, для Pb, As – отношению их содержаний к предельно допустимым концентрациям (ПДК); n – число учитываемых элементов (n=6) [8].

При изучении континентальных глинистых и лёссовых отложений геолого-литологических разрезов в

районе Братского водохранилища, техногенных глинистых образований на территории Иркутска и глинистого аллювия в районе г. Шелехов, глин из пещеры Горомэ (Окинское плато в Восточном Саяне) [13–15] и данных других публикаций [6] по значениям Zc выделены три уровня степени загрязнения: слабая (7–18), средняя (19–40) и сильная (>40). Согласно нормативным уровням загрязнения [16], удовлетворительная ситуация может быть при Zc <16, критическая – 16–32, чрезвычайная – 32–128, катастрофическая (экологическое бедствие) – >128.

Для характеристики общих геохимических особенностей осадков и определения признаков их стратиграфо-литологической принадлежности произведен расчет следующих индикаторных отношений (коэффициентов): Ti/Zr (K1), La/V (K2), V/Zn (K3), Ca/Sr (K4), Mn/Fe (K5), Sr/Ba (K6), Rb/Sr (K7).

При получении коэффициентов Ti/Zr, Ca/Sr, Mn/Fe предварительно проводился расчет концентраций титана, кальция, марганца и железа из содержаний оксидов этих элементов по химическим уравнениям путем составления пропорций.

Например, из уравнения $2Ca + O_2 = 2CaO$ концентрация кальция определяется следующим образом: $m(Ca) = m(CaO) \times M(Ca) / M(CaO)$, где m(CaO) – масса оксида кальция (%); M(Ca) и M(CaO) – произведения молярных масс на количество моль по уравнению (в граммах). Полученная масса кальция m(Ca) (%) умножалась на 10⁴ (ppm).

Несколько слов о роли этих коэффициентов.

Пониженные значения K1 (Ti/Zr), связанные с относительно повышенной концентрацией циркония (циркон относится к группе очень устойчивых к выветриванию минералов), свойственны для более древних, химически зрелых отложений, при этом определенную роль в этом случае играет повышенное содержание глинистой фракции [17].

Коэффициент K4 (Ca/Sr) можно рассматривать в качестве климатического критерия: повышенные значения отражают холодные аридные условия и, следовательно, незначительную степень химической зрелости отложений. Например, для эолово-делювиальных лёссовых покровов (их формирование происходит в условиях холодного семиаридного климата перигляциальной зоны) K4 определен в диапазоне 105–129; для выделенных в разрезе погребенных почв, образование которых связано с потеплением и увлажнением климата и, соответственно, существенными химическими преобразованиями, этот диапазон составляет 65–94 [15]. Следовательно, более химически зрелые (и более древние по стратиграфической принадлежности) отложения характеризуются пониженными значениями K1 (Ti/Zr) и K4 (Ca/Sr).

Mn/Fe (K5) обычно мало отклоняется от среднего значения 0,019, которое, согласно классификации Я.И.Юдовича [20], соответствует континентальным

четвертичным отложениям и считается унаследованным от магматических пород. Коэффициент $K7$ (Rb/Sr) отражает отношение двух преобладающих микроэлементов: при $K7 > 1$ рубидия больше, чем стронция, и наоборот; аналогичная ситуация наблюдается для $K3$ (V/Zn). Остается $K2$ (La/V), но поскольку лантан является второстепенным по концентрации микроэлементом, а ванадий входит в группу преобладающих, то коэффициент всегда будет < 1 .

Обсуждение результатов. *Группа токсичных микроэлементов.* Концентрации токсичных микроэлементов и их распределение в голоценовых илах и верхнеплейстоценовых глинах (табл. 1) показали следующее. Во-первых, во всех колонках преобладает фтор и ванадий, в ничтожном количестве (< 4 ppm) присутствует олово; во-вторых, в глинах по сравнению с илами отмечается увеличение фтора, ванадия, цинка, меди и хрома; в-третьих, закономерно возрастает показатель загрязнения (Zc) от слабого-удовлетворительного (7–19 в илах) до среднего-критического (27–36 в глинах) (см. табл. 1). Мышьяк сосредоточен в нижней части разрезов – верхнеплейстоценовых глинах (13–19 ppm), в илах его содержание преимущественно < 5 ppm (редко

7–15). Фтор, как известно, является токсичным микроэлементом первого класса, его содержание связано с гранулометрическим составом отложений: в песках фтора содержится 20–150 ppm, в глинах – 450–1200 ppm [18].

Полученные результаты по содержанию токсичных компонентов в донных осадках четырех колонок-разрезов ($n=21$) позволили произвести их статистическую обработку (табл. 2). По средним значениям концентраций господствует фтор (687 ppm), далее следуют ванадий, цинк, медь и хром, на последнем месте (не считая олова и мышьяка) находится кобальт (22 ppm) (рис. 1). Минимальная степень изменчивости, характеризующаяся коэффициентом вариации (V, %), отмечается для ванадия и свинца (V15–19), в остальных случаях разнородность концентраций возрастает (V25–39). Показатель загрязнения (среднее значение 25) также характеризуется повышенной изменчивостью (V34), что доказывает существующие различия между выделенными геолого-генетическими комплексами исследованных донных осадков.

При изучении микроэлементного состава глинистых отложений пещеры Горомэ выполнялся сравнительный анализ по величине «коэффициента токсичности» (Kt),

1. Токсичные микроэлементы в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет)

Глубина интервала, см	ГГК	Микроэлементы										Zc	
		V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	F	Pb	As	Sn		
Колонка 17													
0–10	Q ₄	98	27	9	16	25	32	<200	24	<5	<4	7	
10–20		92	46	37	39	61	62	<200	19	7	<4	19	
20–31		174	72	24	59	106	117	104	28	15	<4	31	
31–44	Q ₃	166	81	27	63	92	124	604	30	14	<4	32	
Колонка 18													
0–10	Q ₄	103	20	15	20	37	38	<200	23	<5	Не опр.	9	
10–20		97	43	27	36	58	58	<200	20	<5	<4	15	
20–40		160	54	20	40	70	73	<200	23	<5	<4	16	
40–55		174	77	24	66	117	127	280	26	19	<4	36	
55–69	Q ₃	164	79	27	62	99	122	486	29	15	<4	32	
69–87		166	86	22	61	97	132	829	30	13	<4	31	
Колонка 19													
0–10	Q ₄	141	68	19	44	55	81	383	19	10	<4	22	
10–20		158	80	22	50	75	94	190	24	15	<4	27	
20–30		Q ₃	183	87	23	57	89	119	216	28	16	<4	31
30–40			173	86	23	62	91	123	234	28	18	<4	34
40–52			152	85	20	51	58	100	205	24	16	<4	29
Колонка 22													
0–10	Q ₄	144	54	15	34	56	74	<200	26	<5	<4	14	
10–21		154	83	20	50	67	100	754	22	15	<4	27	
21–31		168	78	21	51	83	113	585	25	14	<4	28	
31–38		Q ₃	161	83	20	46	64	108	908	25	13	<4	26
38–52	152		77	25	57	68	151	1087	32	15	<4	32	
52–67	149		70	25	55	66	140	716	30	14	<4	30	

Примечание. ГГК – геолого-генетический комплекс осадков; Zc – показатель загрязнения.

2. Результаты статистической обработки данных о содержании токсичных микроэлементов в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет) (n=21)

П	Микроэлементы								Zc
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	F*	Pb	
X _{cp}	149	68	22	46	73	99	561	26	25
X _{min}	2	20	9	16	25	32	205	19	7
X _{max}	183	87	37	66	117	151	1087	32	36
σ	27,65	19,93	5,57	13,74	22,73	33,07	288,90	3,75	8,49
V, %	19	29	25	30	31	33	51	15	34
θ	20,86	15,87	3,86	10,78	18,25	29,92	239,88	3,07	7,05
M _d	158	77	22	51	68	106	585	25	28

Примечание. Здесь и в таблицах 5, 9: П – статистические показатели: X_{cp}, X_{min}, X_{max} – среднее, минимальное и максимальное значения параметра микроструктуры; σ – стандартное отклонение; V – коэффициент вариации; θ – среднее отклонение; M_d – медиана; n – число образцов; Zc – показатель загрязнения (в долях единицы); F* (n=13).

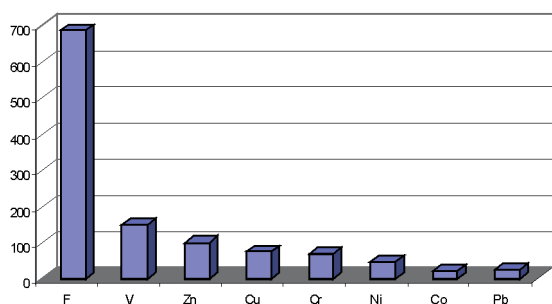


Рис. 1. Содержание (ppm) токсичных микроэлементов в донных осадках оз. Байкал в районе Академического хребта (средние значения, n=21, для фтора n=15)

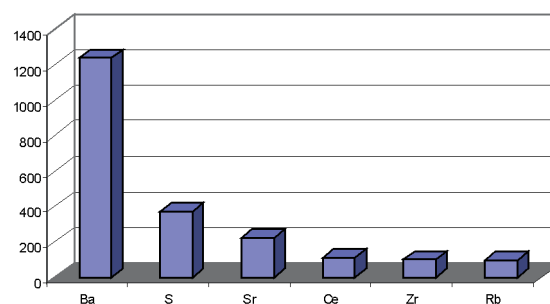


Рис. 2. Содержание (ppm) преобладающих микроэлементов в донных осадках оз. Байкал в районе Академического хребта (средние значения, n=20–21)

который рассчитывался как отношение максимального значения концентрации токсичного компонента (C_{max}) из исследуемой выборки данных к величине его кларка (C_{кл}) по А.П.Виноградову: Kt=C_{max}/C_{кл} [14]. Донные осадки явились объектом аналогичного сопоставления (табл. 3).

Осадки соответствуют пещерным отложениям по коэффициенту токсичности, рассчитанному для меди (2,5–2,6), цинка (1,8–2,0) и фтора (1,7), старичной фации глинистого аллювия (I) – только по никелю (1,0–1,0), лёссовому делювию и аллювию (III, IV) – по ванадию (2,0–1,9). Палеоген-неогеновые озерные глины (V) занимают самостоятельное положение: они менее токсичны в сравнении с осадками Байкала по ванадию (1,6), кобальту (1,3), меди (1,0), цинку (0,7), но в них больше свинца (4,8) и никеля (2,1). Можно сделать следующие выводы:

концентрации хрома и никеля в осадках близки к величине кларка, но все остальные токсичные компоненты его превышают;

на общем сравнительном фоне наибольшая близость

между донными осадками и лёссовыми делювиальными толщами наблюдается по ванадию;

глинистые осадки Байкала, старичная фация аллювия и глинистые пещерные отложения обогащены фтором;

свинца в осадках значительно меньше (Kt=2,0), чем в лёссовом делювии (Kt=6,3).

По коэффициенту токсичности (концентрации) отмечается повышенное (по сравнению с фоновым) содержание Cu (2,5), Co, V, Zn, Pb, F (1,7–2,1), соответствуют фону Cr, Ni (1,1) (см. табл. 3).

Преобладающие микроэлементы. Результаты обсуждаются в том же порядке, как для токсичных компонентов: данные по концентрациям в каждом образце колонок (табл. 4); основные параметры статистической обработки (табл. 5); график-сопоставление по средним значениям содержания всех компонентов (рис. 2).

Главный микроэлемент в осадках – барий. Следует отметить, что в континентальных покровных лёссовых толщах третьей террасы Ангары (микрорайон Солнечный, г. Иркутск) барий также является ведущим компонентом (среднее значение по концентрации 680 ppm),

3. Коэффициенты токсичности донных осадков оз. Байкал (Академический хребет), глинистых и лёссовых отложений различных участков (сравнительный анализ)

М	Скл	Донные осадки		Глинистый аллювий – I		Пещерные отложения – II		III	IV	V
		Сmax	Kt	Сmax	Kt	Сmax	Kt	Коэффициент токсичности – Kt		
V	90	183	2,0	105	1,2	367	4,1	1,9	1,9	1,6
Cr	83	87	1,1	121	1,5	214	2,6	1,9	2,1	1,5
Co	18	37	2,1	21	1,2	64	3,6	1,8	0,9	1,3
Ni	58	66	1,1	60	1,0	144	2,5	1,5	1,3	2,1
Cu	47	117	2,5	34	0,7	212	2,6	0,7	0,9	1,0
Zn	83	151	1,8	82	1,0	94	2,0	1,9	1,0	0,7
Pb	16	32	2,0	23	1,4	20	1,3	6,3	2,3	4,8
F	660	1087	1,7	957	1,5	1097	1,7	Не определялся		

Примечание. М – микроэлементы; Скл – кларк по А.П.Виноградову (ppm); Сmax – максимальное содержание микроэлемента (ppm); Kt=Сmax/Скл; участки: I – глинистый аллювий (г. Шелехов, скв. 1ШС); II – песчано-глинистые отложения пещеры Горомэ (Восточный Саян); III – лёссовый делювий (г. Иркутск, скв. 1416а, 250а), IV – лёссовый аллювий (г. Саянск, скв. 579); V – озерные глины (район г. Биробиджан, скважины 998, 1000).

4. Преобладающие микроэлементы в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет)

Глубина интервала, см	ГГК	Микроэлементы					
		Ba	Sr	Zr	Ce	Rb	S
Колонка 17							
0–10	Q ₄	644	56	14	61	21	657
10–20		4772	117	23	73	36	301
20–31		857	250	81	133	88	917
31–44	Q ₃	983	291	100	121	121	339
Колонка 18							
0–10	Q ₄	874	172	Не опр.	70	Не опр.	487
10–20		3424	34	7	69	11	369
20–40		82	202	83	94	70	659
40–55	Q ₃	991	274	92	138	97	856
55–69		957	309	123	124	120	524
69–87		1110	331	138	113	134	358
Колонка 19							
0–10	Q ₄	891	306	158	83	91	383
10–20	Q ₃	853	239	181	117	117	190
20–30		979	202	84	126	107	216
30–40		991	254	122	121	129	234
40–52		878	236	144	106	117	205
Колонка 22							
0–10	Q ₄	818	47	14	87	19	415
10–21		926	262	168	109	122	189
21–31		854	275	158	125	118	124
31–38	Q ₃	894	212	116	116	107	140
38–52		1438	342	71	157	157	123
52–67		1760	244	62	159	118	160

Примечание. Не опр. – содержание микроэлемента не определялось.

поэтому можно считать его некоторым коррелятором, подтверждающим участие лёссовой пыли при формировании донных отложений [19, 22]. Известно также, что барий занимает господствующее положение в покровных лёссовидных суглинках Европейской части России

(Подмосковье, Заволжье, Закамье), что определяется их гранулометрическим и минеральным составами [3]. Однако в осадках этого элемента значительно больше, при этом наблюдаются пики в интервале 10–20 см (илы) или в нижней части разреза (глины) (см. табл. 4).

5. Результаты статистической обработки данных о содержании преобладающих микроэлементов в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет)

П	Микроэлементы					
	Ba	Sr	Ce	S	Zr	Rb
X _{cp}	1237	222	110	374	97	95
X _{min}	82	34	61	123	7	11
X _{max}	4772	342	159	917	181	157
σ	1020,64	90,42	27,85	234,48	53,80	41,89
V, %	83	41	25	63	56	44
θ	613,92	69,65	22,34	181,81	43,85	32,90
M _d	926	244	116	339	96	112

Примечание. П – статистические показатели; Ba, Sr, Ce, S (n=21); Zr, Rb (n=20).

Близость микроэлементного состава покровных лёссовых толщ (г. Иркутск) отмечается по содержанию стронция (среднее значение 270 ppm) и рубидия (80 ppm). Особым признаком донных отложений является их обогащение серой и фтором (о последнем компоненте речь шла выше), значительно меньше в осадках циркония (97 ppm) по сравнению с лессовидными суглинками (260 ppm).

Распределение концентраций микроэлементов характеризуется значительной изменчивостью (V41–83), что связано с выделенными комплексами – голоценовыми илами и позднеплейстоценовыми глинами (см. таблицы 4, 5).

Для преобладающих и второстепенных микроэлементов рассчитаны коэффициенты концентрации, показывающие отношение их содержания к величине кларка (табл. 6). Повышенные концентрации отмечаются только для Ba, Ce (Kc=1,57–1,90).

Второстепенные микроэлементы. Распределение этих микроэлементов в образцах четырех колонок-разрезов показало, что повышенные концентрации (до 59–159 ppm) отмечаются для La, Nd, при этом их возрастание происходит в нижней части разреза – в верхнеплейстоценовых глинах (табл. 7). Аналогичная ситуация наблюдается для Y, Ga, Th, Nb, но Mo, наоборот, меньше в глинах (колонки 17 и 22). Уран распределяется в разрезах относительно стабильно (преимущественно 6–9 ppm, редко 14–20); во всех образцах присутствует вольфрам (<5 ppm). Таким образом, большинство второстепенных компонентов также указывает на различие между выделенными геолого-генетическими комплексами донных отложений.

Коэффициенты концентрации (см. табл. 6) свидетельствуют о повышенном (по сравнению с фоном) содержании La (3,28) и, особенно, U (8,0) и Mo (16,3).

Индикаторные отношения микроэлементов (коэффициенты). На основании расчетов семи коэффициентов для каждого образца разрезов-колонок и статистической обработки этих данных можно заключить следующее.

Статистическая обработка показала, что изменчивость почти всех коэффициентов очень высокая (V79–150), следовательно, они могут быть критериями разделения осадков на илы (Q₄) и глины (Q₃) (табл. 8). Действительно, в верхней зоне отмечается резкое повышение K1 (Ti/Zr), K4 (Ca/Sr), K3 (V/Zn), K5 (Mn/Fe), в нижней – уменьшение (табл. 9). Стабильность (V15–18) фиксируется только для K2 (La/V) и K7 (Ba/Sr), как и предполагалось.

О степени химической зрелости отложений, связанной с их стратиграфической принадлежностью, свидетельствуют значения индикаторных отношений Ti/Zr (K1) и Ca/Sr (K4): в глинах они понижаются, в илах верхней зоны – повышаются (колонки 17, 18, 22).

6. Коэффициенты концентрации микроэлементов

Показатели	Микроэлементы												
	Ba	Sr	Ce	S	Zr	Rb	La	Nd	Y	Ga	Th	Mo	U
C	1237	222	110	374	97	95	95	59	28	19	28	18	20
Ckl	650	340	70	470	170	150	29	37	29	19	14	1,1	2,5
Kc	1,90	0,65	1,57	0,80	0,57	0,63	3,28	1,59	0,97	1,00	2,0	16,3	8,0

Примечание. C – содержание микроэлемента (ppm); Ckl – кларк по А.П.Виноградову (ppm) [6]; Kc – коэффициент концентрации; для преобладающих микроэлементов использованы средние значения содержаний, второстепенных – максимальные.

7. Второстепенные микроэлементы в донных осадках оз. Байкал (район Академического хребта)

Глубина интервала, см	ГТК	Содержание микроэлементов, ppm								
		La	Nd	Y	Ga	Th	Mo	U	Nb	W
Колонка 17										
0–10	Q ₄	38	34	8	5	8	18	4	<3	<5
10–20		42	32	10	8	10	12	6	<3	<5
20–31		77	59	26	14	18	8	14	8	<5
31–44	Q ₃	69	46	23	18	18	7	6	9	<5
Колонка 18										
0–10	Q ₄	40	34	He опр.	6	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	<5
10–20		44	33	6	7	6	11	<3	<3	<5
20–40		69	48	28	10	16	7	20	8	<5
40–55	Q ₃	87	59	28	16	20	9	14	8	<5
55–69		74	50	30	17	19	<5	8	13	<5
69–87		68	42	29	18	19	<5	9	16	<5
Колонка 19										
0–10	Q ₄	52	41	21	14	13	5	7	12	<5
10–20	Q ₃	66	38	26	15	15	<5	5	16	<5
20–30		77	50	18	18	16	9	4	7	<5
30–40		70	45	24	18	18	7	5	10	<5
40–52		54	37	22	16	14	5	4	12	<5
Колонка 22										
0–10	Q ₄	57	38	7	10	6	15	<3	<3	<5
10–21		60	45	25	15	16	6	6	14	<5
21–31		69	48	27	16	18	6	6	13	<5
31–38	Q ₃	70	40	17	15	16	10	4	9	<5
38–52		95	54	20	19	28	10	5	11	<5
52–67		88	53	14	18	21	14	4	6	<5

По материалам статьи можно сделать следующие выводы.

1. Среди токсичных компонентов первое место принадлежит фтору и ванадию, далее следуют цинк и медь; по величине показателя Zc установлена более высокая степень загрязнения для позднеплейстоценовых глин; токсичные микроэлементы, кроме ванадия и свинца, а также Zc имеют повышенную степень изменчивости в распределении (V25–39), что подтверждает существующие различия между выделенными в колонках геолого-генетическими комплексами отложений.

2. При сравнительном анализе коэффициента токсичности (Kt) осадков с различными объектами (см. табл. 3) сходство с континентальными лессовыми отложениями установлено по ванадию (это ведущий токсичный компонент); только хром и никель соответствуют величине кларка, но все остальные микроэлементы его превышают.

3. В составе преобладающих микроэлементов господствует барий, который является критерием сходства донных осадков и континентальных лёссовых

толщ, кроме того, некоторая близость отмечается по концентрациям стронция и рубидия; к числу особенностей осадков относится их обогащение серой; имеет место высокая степень изменчивости концентраций преобладающих компонентов (V41–83), что также подтверждает разделение толщи осадка на молодые илы и более древние глины.

4. В группе второстепенных микроэлементов относительно повышенное содержание имеют лантан, неодим, при этом их больше в нижней части разреза – позднеплейстоценовых глинах; стабильно присутствуют уран и вольфрам; по коэффициенту концентрации (см. табл. 6) отмечается резкое повышение содержания молибдена, урана и лантана по сравнению с фоновыми значениями.

5. Рассчитанные индикаторные отношения микроэлементов (Ti/Zr, Ca/Sr) также явились критериями для выделенных стратиграфо-литологических (геолого-генетических) комплексов: установлены их пониженные значения для глин (более древних и химически зрелых) и повышенные для илов (более молодых и менее химически зрелых).

8. Индикаторные отношения микроэлементов (коэффициенты) в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет)

Глубина интервала, см	ГФК	Индикаторные отношения микроэлементов (коэффициенты)						
		Ti/Zr	La/V	V/Zn	Ca/Sr	Mn/Fe	Sr/Ba	Rb/Sr
		K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Колонка 17								
0–10	Q ₄	134	0,39	3,06	148	0,22	0,09	0,38
10–20		86	0,46	1,48	73	0,47	0,02	0,31
20–31		46	0,44	1,49	42	0,03	0,29	0,35
31–44	Q ₃	46	0,42	1,34	43	0,03	0,30	0,42
Колонка 18								
0–10	Q ₄	He опр.	0,39	2,71	46	0,34	He опр.	He опр.
10–20		253	0,45	1,67	223	0,39	0,01	0,32
20–40		33	0,43	2,19	44	0,07	2,46	0,35
40–55	Q ₃	44	0,50	1,37	44	0,04	0,28	0,35
55–69		44	0,45	1,34	44	0,04	0,32	0,39
69–87		35	0,41	1,26	41	0,03	0,30	0,40
Колонка 19								
0–10	Q ₄	27	0,37	1,74	44	0,05	0,34	0,30
10–20	Q ₃	27	0,42	1,68	52	0,02	0,28	0,49
20–30		61	0,42	1,54	62	0,03	0,21	0,53
30–40		42	0,40	1,41	50	0,03	0,26	0,51
40–52		36	0,36	1,52	55	0,02	0,27	0,50
Колонка 22								
0–10	Q ₄	225	0,40	1,95	234	0,07	0,06	0,40
10–21		31	0,39	1,54	51	0,05	0,28	0,47
21–31		31	0,41	1,49	47	0,03	0,32	0,43
31–38	Q ₃	46	0,43	1,52	66	0,03	0,24	0,50
38–52		71	0,63	1,01	46	0,03	0,24	0,46
52–67		80	0,59	1,06	59	0,08	0,14	0,48

9. Результаты статистической обработки данных по индикаторным отношениям элементов (коэффициентам) в донных осадках оз. Байкал (Академический хребет) (n=21)

П	Индикаторные отношения элементов (коэффициенты)						
	Ti/Zr	La/V	V/Zn	Ca/Sr	Mn/Fe	Sr/Ba	Rb/Sr
	K1*	K2	K3	K4	K5	K6*	K7*
X _{cp}	78	0,44	1,64	72	0,10	0,34	0,42
X _{min}	27	0,36	1,06	41	0,02	0,02	0,31
X _{max}	253	0,63	3,06	234	0,47	2,46	0,53
σ	63,41	0,066	0,494	56,81	0,134	0,511	0,094
V, %	91	15	30	79	134	150	18
θ	42,96	0,044	0,337	31,11	0,097	0,214	0,060
M _d	46	0,42	1,52	50	0,04	0,28	0,41

Примечание. K1*, K6*, K7* рассчитаны при n=20.

Результаты получены с использованием материально-технической базы ЦКП (Центр коллективного пользования) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, г. Иркутск, в рамках проекта НИР 0346-2014-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вологина Е.Г. Условия голоценового осадкообразования в озере Байкал // Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Иркутск, 2002.
2. Геохимия окружающей среды / Ю.Е.Саг, Б.А.Ревич, Е.П.Янин и др. – М.: Недра, 1990.
3. Добровольский В.В. Гипергенез и коры выветривания. – М.: Научный мир, 2007.
4. Коллектив участников проекта «Байкалбурение». Высокорастворяющая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (ВДР-99) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 2. С. 163–193.
5. Краткий справочник по геохимии / Г.В.Войткевич, А.Е.Мирошников, А.С.Поваренных, В.Г.Прохоров – М.: Недра, 1970.
6. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв. – М.: Академический Проект; Гаудеамус, 2007.
7. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене / Е.Г.Вологина, М.Штурм, С.С.Воробьева и др. // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 407–421.
8. Порядин А.Ф., Хованский А.Д. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. – М.: Издательский дом «Прибой», 1996.
9. Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5 (1). С. 101–114.
10. Регулярные осцилляции климата в масштабе тысячелетий и видообразование в озере Байкал / М.А.Грачев, А.Г.Горшков, И.Н.Азарова и др. // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. – Новосибирск, 2002. С. 107–121.
11. Ряценок Т.Г. Проявление эоловой седиментации в Прибайкалье и возможность ее участия в формировании зонных осадков Байкала // Байкал – природная лаборатория для исследования изменений окружающей среды и климата. Т. 2. Глобальные изменения в прошлом: Тезисы докладов Международного симпозиума. – Иркутск, 1994. С. 42.
12. Ряценок Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (юг Восточной Сибири). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008.
13. Ряценок Т.Г., Штельмах С.И. Микроэлементный состав техногенных отложений прибрежных участков строительства в Иркутске // Труды 3-й Международной конф. «Создание и использование искусственных земельных участков на берегах и акватории водных объектов», 29 июня–3 августа 2013 г. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. С. 259–262.
14. Ряценок Т.Г., Штельмах С.И. Микроэлементный состав отложений пещеры Горомэ // Известия СО Секции наук о Земле РАЕН. 2015. № 2 (51). С. 88–96.
15. Ряценок Т.Г., Штельмах С.И., Худогонова Е.В. Геохимические критерии при изучении геолого-литологических разрезов дисперсных грунтов (микроэлементный состав) // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 7. Труды IX Российско-Монгольской конференции «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона», 10–12 октября 2011 г. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт земной коры СО РАН, 2012. С. 120–126.
16. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
17. Танделов Ю.П. Фтор в системе почва – растение. – Красноярск, 2012.
18. Центрические диатомовые водоросли позднего кайнозоя озера Байкал: морфология, систематика, стратиграфическое распространение, этапность развития (по материалам глубокого бурения) / М.И.Кузьмин, Г.К.Хурсевич, А.А.Прокопенко и др. – Новосибирск: ГЕО, 2009.
19. Штельмах С.И. Распределение микроэлементов в дисперсных грунтах ключевых участков юга Восточной Сибири (инженерно-геологические и геоэкологические аспекты) // Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010.
20. Юдович Я. Э. Индикаторное значение отношения Mn/Fe в осадочных породах // Доклады Академии наук. 2000. Т. 375. № 2. С. 233–234.
21. A synthesis of post-glacial diatom records from Lake Baikal / J.P.Bradbury, Ye.V.Bezrukova, G.P.Chernyaeva et al. // Journal of Paleolimnology. 1994. Vol. 10. Pp. 213–252.
22. Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Rubtsova M.N. Aeolian sedimentation in Pribaikalye (Late Pleistocene – Holocene) // Quaternary International. 355 (2015). Pp. 52–56.