

## ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОХИМИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ АРКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА КЕНТЭТУРКУ (ПОЛУОСТРОВ ТАЙМЫР)

© 2013 г. В. Н. Удачин\*, Д. Ю. Большианов\*\*, С. Л. Вотяков,  
Д. В. Киселева, П. В. Хворов\*, П. Г. Аминов\*, Ю. К. Иванов

Интерес к исследованию геохимии донных отложений арктических озер обусловлен тем, что стратифицированные колонки со скоростями седиментации от 0.2 до 0.8 мм/год содержат важную информацию о поступлении микроэлементов с региональным атмосферным переносом [1, 8, 10–12] и являются своеобразным архивом при характеристике процессов воздействия на окружающую среду. Хорошо изучены донные отложения озер архипелага Шпицберген [3, 6, 9, 13], арктических территорий Канады [10, 15], Гренландии [4, 5]. Применительно к полуострову Таймыр исследования донных отложений озер сосредоточены в районе воздействия Норильского промышленного узла [2, 6, 13]. Характеристика химического состава донных отложений озера на большом удалении от основного источника атмосферных эмиссий в российской Арктике приводится впервые.

**Цель работы** – исследование микрогеохимии донных отложений арктического озера Кентэтурку (полуостров Таймыр).

**Объект исследования.** Озеро Кентэтурку расположено в центре полуострова Таймыр, в бассейне р. Верхней Таймыры, в 550 км к северо-востоку от г. Норильск в подзоне северной тундры. Средняя температура воздуха в январе составляет минус 31°C, средняя температура июля 7–8°C. Продолжительность ледостава в среднем 290 дней, толщина ледового покрова 170–180 см. Толщина снежного покрова на конец периода его накопления (май-июнь) до 50 см. Среднегодовое количество осадков 300–400 мм. Преобладающее направление движения воздушных масс – зимой с юго-запада на северо-восток, летом – в обратном направлении. Урез воды озера находится на отметке 58 м над современным уровнем моря. Озеро лежит в чаше бассейна среди гряд высотой до 157–191 м. Гряды и их склоны сложены четвертичными морскими песчано-алевритовыми отложениями с небольшим количеством крупнообломочного материала (галька, валуны). Озеро, судя по линеаментам (восток-северо-восток и север-северо-запад) имеет тектоническое заложение, как и гряды, в которых оно расположено, но так же, как и близлежа-

щие озера, связано с вытаяванием подземного льда. Площадь озера 2.5 км<sup>2</sup>, максимальная длина 2 км, максимальная ширина 1.2 км. Озеро имеет несколько мелких притоков по ограниченной площади водосбора (12.1 км<sup>2</sup>) и один водоток, вытекающий из озера в период снеготаяния. В межень сток из озера может прекращаться в результате перегораживания истока вытекающей реки галечным береговым валом. Измеренные глубины в озере достигают 20 м, средняя глубина озера менее 10 м. Донные отложения, представленные глинистыми алевритами, взяты из наиболее глубоководной котловины с глубины 15 м, из точки с координатами 73°27'52.0" с.ш. 96°26'21.3" в.д. Отбор проб выполнен пробоотборником гравитационного типа с отсекающей диафрагмой. Внутренний диаметр пробоотборника 42 мм, отбор проб выполнен с дискретностью 1 см для длины колонки 30 см.

**Методики исследования.** Пробы, доведенные до воздушно-сухого состояния, измельчали и анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Кислотное вскрытие проб донных отложений навеской 50 мг выполнялось в автоклавах с однокамерной реакционной емкостью из фторопласта при температуре 150°C в течение 6 часов смесью 2 мл HF, 3 мл HCl и 1 мл HNO<sub>3</sub>. Деструкцию фторидных комплексов проводили двукратным выпариванием сухого остатка пробы в 4 мл концентрированной HNO<sub>3</sub> при температуре 110°C. После добавления раствора In (внутренний стандарт) и 2 мл 5 н HNO<sub>3</sub> раствор еще раз упаривали и сводили деионизированной водой (установка MilliQ, Millipore) к аликвоте 100 мл при конечной концентрации азотнокислой матрицы 0.5 н. Все кислоты исходной квалификации “о.с.ч.” были дополнительно очищены на установке дистилляции BSB-939-IR (Berghof). Анализ подготовленных растворов выполнен на ИСП-масс-спектрометре ELAN 9000. Калибровку прибора выполняли с использованием стандартных мультиэлементных растворов фирмы Perkin Elmer для всей шкалы масс анализируемых элементов. Схема анализа включала анализ “холостой” пробы (включенная в партию из 30–35 проб одна проба со всеми

\* Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс

\*\* Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

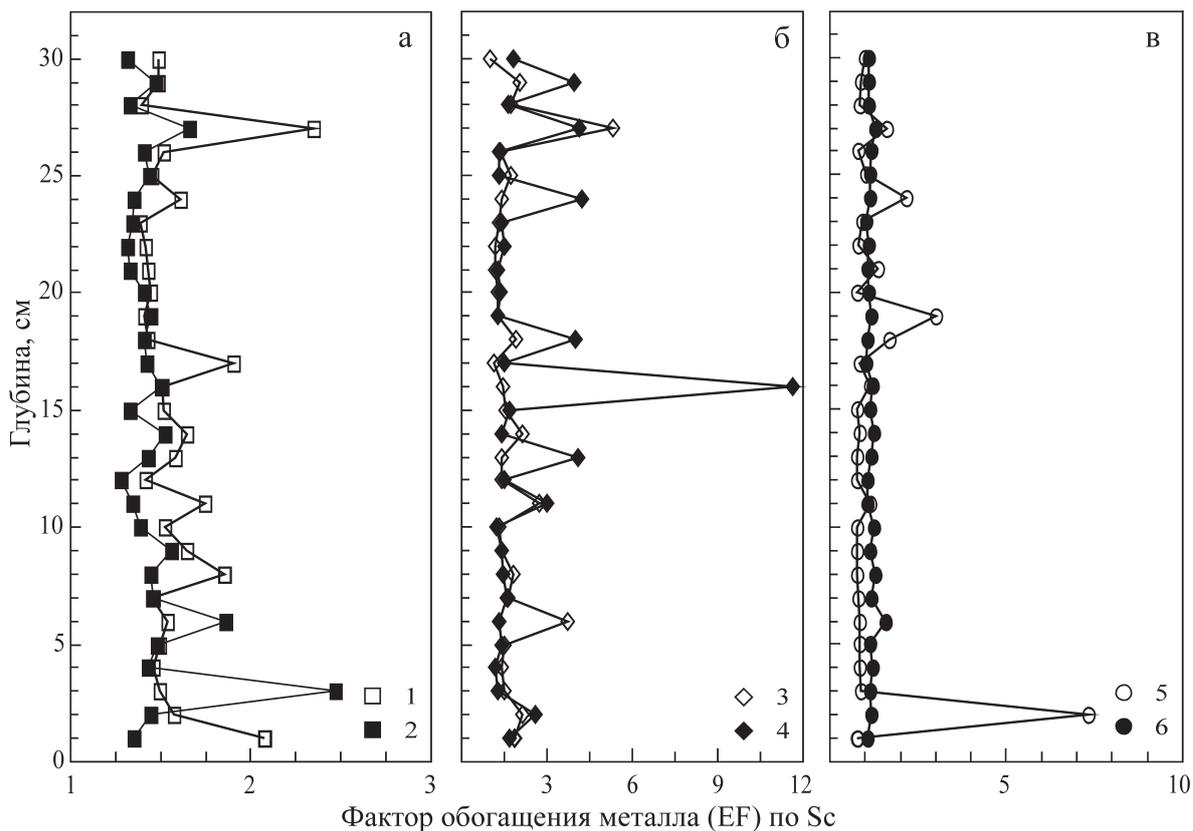


Рис. 1. Значения фактора обогащения (EF) для микроэлементов колонки донных отложений оз. Кентэтурку.

1 – Cu, 2 – Zn, 3 – Cd, 4 – Sb, 5 – Pb, 6 – Ni.

упоминавшимися реактивами, прошедшая все последовательно указанные процедуры); анализ градуировочных растворов и построение градуировочных прямых с тремя точками для концентраций 10, 100 и 1000 мкг/л; анализ 30–35 проб с повторной градуировкой в середине измеряемой партии проб. Пределы обнаружения составляли, в пересчете на первичную навеску, от 2–7 мкг/кг для элементов с высокими и средними массами (U, Th, Pb, Bi, Tl, Mo, группа РЗЭ) до 30–50 мкг/кг для элементов с малыми массами (Sc, Li). Расчет фактора обогащения (EF) по результатам элементного анализа выполнен нормированием на Sc по формуле:  $EF = ([C_i]/[Sc]_{\text{проба}})/([C_i]/[Sc])_{\text{кларк}}$ .

Рентгеноструктурный анализ выполнен на дифрактометре XRD-6000 (Cu-анод, графитовый монохроматор, съемка в интервале углов  $2\theta = 3-80^\circ$ ). Для диагностики глинистых минералов исследованы воздушно-сухие, насыщенные глицерином и прокаленные при  $550^\circ\text{C}$  препараты в интервале углов  $2\theta = 3-16^\circ$ . Анализ проводился на дифрактометре ДРОН-2.0 (Cu-анод, графитовый монохроматор). Расчет содержаний минералов проведен методом Ритвельда с использованием программы SIROQUANT.

**Результаты.** В донных отложениях озера Кентэтурку в количественном отношении преобладают

две минеральные фазы – кварц и плагиоклаз (около 42 и 28%, соответственно); в подчиненных количествах отмечены гидратированный хлорит, иллит и калиевый полевой шпат. Степень варибельности содержаний пяти основных минеральных фаз по разрезу 30-см колонки не превышает  $\pm 4\%$ .

Элементный состав донных отложений отражен в табл. 1. Рассчитанные факторы обогащения для шести потенциально приоритетных аномальных элементов этого географического района [2, 6] представлены на рис. 1. Для пары Cu-Zn значения фактора обогащения не превышают 2.5 в двух пробах, что, в соответствии с практикой количественных оценок геохимии объектов окружающей среды, позволяет отнести концентрации этих элементов в донных отложениях озера к фоновым. Для пары Cd-Sb аномальными представляются концентрации Sb в интервале 15–16 см с фактором обогащения 12 (см. рис. 1) и Cd в интервале 26–27 см с фактором обогащения 5.5. Для Pb явно аномальной концентрацией в 96 мкг/кг является проба интервала 1–2 см с фактором обогащения 7.5.

Для выполнения количественных расчетов временного поступления микроэлементов в расчете на единицу площади акватории озера необходимо выполнить датировку скоростей осадконакопления с использованием изотопа  $^{210}\text{Pb}$ . Это позволит оце-

Таблица 1. Содержание микроэлементов (мг/кг) в донных отложениях оз. Кентэтурку

R(SD)	607/1	607/2	607/3	607/4	607/5	607/6	607/7	607/8	607/9	607/10	607/11	607/12	607/13	607/14	607/15
Инт., см	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
Li	41	34	34	38	36	34	52	33	32	37	55	57	42	36	58
Sc	13.0	10.5	10.2	10.7	10.8	9.6	15.9	9.4	8.6	10.1	16.0	16.6	11.1	9.0	16.3
V	150	121	124	126	129	117	181	111	107	119	187	192	131	113	191
Cr	85	69	67	74	74	69	105	62	62	70	113	110	78	83	109
Co	19	18	17	19	17	15	28	17	12	16	21	24	16	14	25
Ni	45	39	38	42	40	49	59	38	31	41	54	58	43	36	59
Cu	49	30	28	29	30	27	42	32	26	28	51	43	32	27	45
Zn	92	79	131	80	83	94	121	71	70	73	112	111	83	71	113
Mo	1.04	0.57	0.53	0.45	0.46	0.43	0.80	0.55	0.37	0.39	0.60	0.69	0.51	0.42	0.82
Cd	0.17	0.16	0.11	0.11	0.12	0.26	0.19	0.12	0.09	0.10	0.32	0.17	0.11	0.14	0.18
Sn	1.8	1.3	1.4	1.2	1.4	1.4	2.2	1.2	2.1	1.4	2.1	2.3	1.8	1.3	1.9
Sb	0.32	0.40	0.19	0.18	0.22	0.19	0.37	0.20	0.18	0.18	0.71	0.37	0.67	0.19	0.41
Ba	358	307	488	333	336	309	457	290	269	307	649	467	332	283	471
La	18.5	15.7	15.4	16.2	16.5	14.9	22.4	13.8	13.6	15.2	22.4	23.1	19.2	13.9	24.1
Ce	40.7	34.6	33.4	35.2	35.2	31.7	49.0	30.5	28.8	32.6	47.3	49.6	34.7	29.6	51.0
Pr	4.74	4.00	3.98	4.21	4.23	3.84	5.84	3.61	3.39	3.85	5.75	5.92	4.15	3.55	6.14
Nd	17.56	14.86	14.37	15.45	15.38	13.74	21.21	13.00	13.02	14.33	21.19	22.00	14.88	12.94	22.06
Sm	3.65	3.10	3.03	3.07	3.06	2.80	4.53	2.72	2.58	2.89	4.28	4.56	3.25	2.62	4.53
Eu	0.88	0.74	0.78	0.79	0.77	0.68	1.05	0.64	0.62	0.74	1.04	1.08	0.75	0.60	1.08
Gd	3.25	2.73	2.77	2.79	2.87	2.57	4.12	2.55	2.49	2.66	4.00	4.22	2.83	2.43	4.22
Tb	0.48	0.39	0.41	0.42	0.42	0.36	0.58	0.36	0.35	0.40	0.57	0.59	0.40	0.34	0.60
Dy	2.89	2.44	2.45	2.57	2.62	2.23	3.55	2.29	2.15	2.37	3.42	3.62	2.53	2.09	3.64
Ho	0.57	0.49	0.49	0.52	0.51	0.45	0.72	0.42	0.41	0.45	0.68	0.71	0.51	0.43	0.72
Er	1.65	1.34	1.34	1.43	1.49	1.33	2.03	1.26	1.15	1.35	1.91	2.04	1.40	1.20	2.17
Tm	0.23	0.20	0.19	0.20	0.21	0.18	0.29	0.16	0.17	0.20	0.29	0.29	0.19	0.17	0.29
Yb	1.45	1.23	1.22	1.30	1.37	1.25	1.88	1.16	1.13	1.25	1.79	1.75	1.30	0.99	1.91
Lu	0.22	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.27	0.16	0.17	0.18	0.27	0.28	0.19	0.16	0.28
W	1.01	0.48	0.56	0.55	0.58	0.56	0.81	0.55	0.53	1.76	0.85	0.89	0.63	0.46	0.74
Tl	0.34	0.29	0.27	0.27	0.26	0.26	0.42	0.26	0.25	0.29	0.45	0.42	0.30	0.24	0.42
Pb	12.6	96.1	11.2	11.3	11.2	10.3	15.9	9.1	8.4	10.0	22.5	15.8	10.6	9.6	15.5
Bi	0.14	0.18	0.09	0.11	0.10	0.13	3.20	0.07	1.86	0.12	0.50	0.15	0.14	0.09	0.17
Th	5.69	4.98	4.70	4.78	4.84	4.42	6.82	4.17	4.11	4.51	6.88	7.05	4.99	4.17	7.29
U	1.50	1.22	1.28	1.27	1.25	1.21	1.82	1.12	1.09	1.22	1.80	1.91	1.23	1.01	1.86
R(SD)	607/16	607/17	607/18	607/19	607/20	607/21	607/22	607/23	607/24	607/25	607/26	607/27	607/28	607/29	607/30
Инт., см	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	26-27	27-28	28-29	29-30
Li	37	38	51	55	44	50	50	55	44	47	41	36	53	50	53
Sc	9.7	10.0	14.0	16.0	12.4	14.2	13.7	15.9	11.7	13.3	11.0	9.3	15.2	13.4	13.7
V	114	121	165	186	146	165	162	181	140	154	130	117	174	160	161
Cr	68	71	93	107	86	94	92	106	82	92	75	70	101	92	94
Co	17	13	20	26	18	19	21	22	17	20	19	18	25	20	21
Ni	38	33	48	60	44	48	48	53	44	48	42	39	54	48	49
Cu	27	35	37	41	33	37	36	40	35	35	31	40	39	37	37
Zn	76	75	103	121	91	99	94	111	83	100	81	81	106	103	94
Mo	0.43	0.28	0.49	0.72	0.45	0.54	0.59	0.68	0.46	0.68	0.84	0.96	1.01	0.62	0.66
Cd	0.10	0.08	0.19	0.15	0.11	0.12	0.11	0.15	0.12	0.17	0.11	0.36	0.19	0.20	0.10
Sn	1.2	1.2	1.6	2.0	3.6	1.6	1.5	1.8	1.4	1.5	1.3	1.4	1.7	1.6	1.6
Sb	1.66	0.22	0.83	0.30	0.25	0.26	0.30	0.33	0.73	0.26	0.21	0.57	0.36	0.78	0.36
Ba	317	304	405	465	377	424	412	453	350	413	335	326	551	472	391
La	15.4	15.5	21.2	23.3	19.3	21.2	21.0	22.7	18.2	21.0	17.5	15.7	23.3	21.1	21.1
Ce	32.9	32.9	45.0	51.0	42.1	46.6	45.1	48.2	38.9	47.1	37.5	34.9	51.5	45.6	44.7
Pr	3.92	3.91	5.35	5.86	4.95	5.40	5.27	5.77	4.68	5.38	4.38	4.11	6.07	5.25	5.20
Nd	14.42	14.62	19.77	22.14	18.50	19.85	19.52	21.28	16.69	19.91	16.26	15.07	21.76	19.60	19.71
Sm	2.91	2.93	4.13	4.56	3.81	4.18	4.15	4.38	3.49	4.19	3.34	3.20	4.55	4.23	3.96
Eu	0.73	0.73	0.97	1.05	0.90	1.03	0.98	1.05	0.82	1.00	0.77	0.73	1.09	0.92	0.94
Gd	2.65	2.71	3.59	4.14	3.31	3.73	3.54	3.86	2.90	3.84	2.92	2.78	4.08	3.46	3.51
Tb	0.37	0.39	0.52	0.59	0.48	0.52	0.52	0.57	0.45	0.53	0.43	0.40	0.59	0.51	0.50
Dy	2.40	2.42	3.26	3.67	2.97	3.39	3.30	3.58	2.85	3.29	2.65	2.53	3.65	3.21	3.20
Ho	0.46	0.48	0.63	0.73	0.59	0.65	0.66	0.73	0.56	0.66	0.54	0.50	0.73	0.64	0.62
Er	1.38	1.32	1.77	2.13	1.66	1.92	1.89	2.00	1.54	1.84	1.50	1.33	2.04	1.85	1.77
Tm	0.18	0.19	0.25	0.30	0.22	0.26	0.24	0.27	0.22	0.26	0.23	0.19	0.29	0.26	0.25
Yb	1.20	1.22	1.72	1.94	1.50	1.75	1.74	1.84	1.43	1.71	1.35	1.33	1.82	1.72	1.67
Lu	0.17	0.18	0.24	0.27	0.23	0.25	0.25	0.28	0.20	0.26	0.21	0.18	0.27	0.23	0.24
W	0.51	0.51	0.79	0.86	0.66	0.75	0.66	0.76	0.85	0.67	0.69	0.51	0.75	0.72	0.78
Tl	0.28	0.29	0.37	0.44	0.32	0.38	0.36	0.42	0.32	0.34	0.31	0.30	0.41	0.35	0.37
Pb	13.7	10.7	29.8	60.3	12.1	23.8	13.6	18.4	31.6	17.2	11.3	18.7	15.8	14.6	17.1
Bi	0.09	0.11	3.77	0.16	2.61	0.15	0.12	0.19	0.18	0.13	0.11	0.47	0.14	0.22	0.14
Th	4.68	4.80	6.49	7.21	6.29	6.40	6.26	6.92	5.44	6.11	5.25	4.55	7.03	6.33	6.43
U	1.18	1.20	1.62	1.85	1.46	1.70	1.67	1.81	1.39	1.73	1.35	1.28	2.01	1.81	1.65

нить вклад антропогенных факторов в процессы седиментации озерных экосистем Арктики.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 10-05-00727а) и проекта № 12-55-4-007 программы УрО РАН “Арктика” в Центре коллективного пользования УрО РАН “Геоаналитик”.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даувальтер В.А., Даувальтер М.В., Кашулин Н.А., Сандимиров С.С. Химический состав донных отложений озер в зоне влияния атмосферных выбросов комбината “Североникель” // Геохимия. 2010. № 11. С. 1224–1229.
2. Старичков Е.М. Геохимия донных осадков бассейна р. Пясины и прибрежных зон Карского моря: полуостров Таймыр. Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. С-Петербург, 2002. 23 с.
3. Appleby P.G. Environmental change and atmospheric contamination on Svalbard: sediment chronology // J. Paleolim. 2004. V. 31. P. 433–443.
4. Bindler R., Anderson N.J., Renberg I., Malmquist C. Paleolimnological investigation of atmospheric pollution in the Søndre Strømfjord region, southern West Greenland: accumulation rates and spatial patterns // Geology of Greenland Survey Bulletin. 2001. V. 189. P. 48–53.
5. Bindler R., Renberg I., Anderson N.J. et al. Pb isotope ratios of lake sediments in West Greenland: inferences on pollution sources // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 4675–4685.
6. Birks H.J., Jones V.J., Rose N.L. Recent environmental change and atmospheric contamination on Svalbard as recorded in lake sediments synthesis and general conclusions // J. Paleolim. 2004. V. 31. P. 531–546.
7. Blais J. M., Duff K. E., Laing T. E., Smol J.P. Regional contamination in lakes from the Noril’sk region in Siberia, Russia // Water, Air, Soil Pollut. 1999. V. 110. P. 389–404.
8. Dauvalter V., Kashulin N., Sandimirov S. et al. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // J. Environ. Sci. Health, Part A. 2011. V. 46, № 9. P. 1020–1033.
9. Drevnick P.E., Yang H., Lamborg C.H., Rose N. L. Net atmospheric mercury deposition to Svalbard: Estimates from lacustrine sediments // Atmos. Environ. 2012. V. 59. P. 509–513.
10. Givélet N., Roos-Barraclough F., Goodsite M.E., Shottuk W. A 6.000-years record of atmospheric mercury accumulation in the high Arctic from peat deposits on Bathurst Island, Nunavut, Canada // J. Physique. 2003. V. 107. P. 545–548.
11. Kikuchi R., Gorbacheva T.T. A field survey—Staroe lake suffering from atmospheric deposition in the region north of the Arctic Circle // Environ. Sci. Pollut. Res. 2009. V. 16. P. 431–438.
12. Liua X., Jianga S., Zhang P., Xu L. Effect of recent climate change on Arctic Pb pollution: A comparative study of historical records in lake and peat sediments // Environ. Pollut. 2012. V. 160. P. 161–168.
13. Lu Z., Cai M., Wang J. et al. Levels and distribution of trace metals in surface sediments from Kongsfjorden, Svalbard, Norwegian Arctic // Environ. Geochem. Health. 2013. V. 35. P. 257–269.
14. Michelutti N., Laing T.E., Smol J.P. Diatom assessment of past environmental changes in lakes located near the Noril’sk (Siberia) smelter // Water, Air, Soil Pollut. 2001. V. 125. P. 231–241.
15. Michelutti N., Simonetti A., Briner J.P. et al. Temporal trends of pollution Pb and other metals in east-central Baffin Island inferred from lake sediment geochemistry // Sci. Total Environ. 2009. V. 407. P. 5653–5662.