

УДК 550.424+550.423+551.89

ОБСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ УРАНА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ГОЛОЦЕНА ОЗЕРА СЫРЫТКУЛЬ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2020 г. А. В. Масленникова^{1,2,*}, В. Н. Удачин^{1,2}, член-корреспондент РАН В. Н. Анфилов¹

Поступило 02.10.2019 г.
После доработки 20.02.2020 г.
Принято к публикации 20.02.2020 г.

Приведены результаты изучения влияния обстановок осадконакопления голоцена на аккумуляцию урана в донных отложениях оз. Сырыткуль. На основе сравнения данных геохимии, палинологии и диатомового анализа установлена взаимосвязь вариаций содержания урана (5–89 г/т) в донных отложениях с изменениями ландшафтно-климатических условий в течение более чем 12 тыс. к.л.н. Максимальное содержание урана отмечено для донных отложений, накопленных 11.6–10.3 тыс. к.л.н. в условиях увлажнения и потепления климата. Установлено не прямое влияние климата через формирование растительного покрова на аккумуляцию урана в оз. Сырыткуль. В условиях похолодания и увлажнения климата около 4.2 тыс. к.л.н., приведших к распространению темнохвойных лесов на водосборе озера, выявлено значительное снижение концентрации урана в донных отложениях.

Ключевые слова: уран, донные отложения, озеро, Южный Урал, голоцен

DOI: 10.31857/S2686739720050138

Уран является не только радиоактивным, но и токсичным элементом. Повышенные концентрации U в озерах связаны как с техногенными, так и с природными процессами [1–5]. Классические представления указывают на важную роль ландшафтного фактора в геохимии U в зоне гипергенеза [6], однако, из-за нивелирующего влияния других факторов ее не всегда удается оценить. Эта проблема решается изучением аккумуляции U в одном озере в течение длительного времени путем реконструкции условий обстановок осадконакопления палеолимнологическими методами. На основе изучения колонки донных отложений оз. Байкал, накопленных за 140 тыс. лет, установлена связь колебаний содержаний аутигенного урана с циклами аридизации–гумидизации климата [7]. Возраст озер Южного Урала, как правило, не превышает 12–13 тыс. к.л.н. (календарных

лет назад) [8]. Тем не менее для некоторых озер отмечаются не меньшие вариации в вертикальном распределении урана. Целью нашей работы является определение влияния различных обстановок осадконакопления голоцена на особенности миграции и аккумуляции U в донных отложениях на примере оз. Сырыткуль. Изменения растительности и палеоклимата в течение 12 тыс. к.л.н. оценены с помощью спорово-пыльцевого анализа [8]. Трансферная функция, полученная на основе анализа диатомовых комплексов 71 озера Урала, использована для количественных реконструкций электропроводности (ЕС) как показателя солёности вод озера [9]. Определение содержания U и других микроэлементов в донных отложениях и воде выполнено с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7700x [8].

Оз. Сырыткуль расположено на восточных предгорьях Южного Урала в окружении березово-соснового леса. Вода озера ультрапресная с минерализацией 0.16 г/л и содержанием U 0.21 мкг/л. Площадь зеркала озера составляет 0.6 км² при максимальной глубине в 6.5 м. Водосбор озера сложен щелочными сиенитами, миаскитами, мигматитами и карбонатитами, плагиогнейсами и амфиболитами Вишневогорско-Ильменогор-

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского Отделения Российской академии наук, Миасс, Россия

² Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

*E-mail: adenophora@inbox.ru

Таблица 1. Содержание урана в донных отложениях оз. Сырыткуль. SD – стандартное отклонение, рассчитанное на основе трех измерений

Глубина колонки	Среднее содержание, г/т	SD	Глубина колонки	Среднее сод. г/т	SD
1	5.39	0.09	231	13.61	0.12
3	5.76	0.08	251	11.09	0.13
5	5.78	0.08	263	18.32	0.22
7	5.77	0.10	282	28.67	0.20
9	5.93	0.08	284	23.67	0.17
13	4.96	0.06	294	21.94	0.16
17	5.28	0.06	312	18.52	0.11
21	5.36	0.09	319	9.78	0.09
23	6.27	0.09	367	25.68	0.18
27	6.17	0.08	388	24.42	0.18
31	7.55	0.13	396	38.06	0.04
47	6.71	0.09	420	88.16	0.10
97	9.05	0.12	423	65.55	0.08
149	17.53	0.16	430	25.75	0.03
156	7.53	0.08	453	46.19	0.23
169	12.90	0.12	456	58.38	0.26
172	12.83	0.10	465	61.69	0.28
207	8.01	0.10	485	48.01	0.20

ского комплекса. С породами комплекса связано ураново-редкометальное и молибденовое оруденение [10].

Минимальные концентрации U (3.7 г/т) характерны для озерной глины, накопленной более 11.6 тыс. к.л.н. (рис. 1, табл. 1). Минеральный состав донных отложений представлен в основном аллотигенными минералами. Содержание органического вещества, оцененное на основе прокалывания при 550°C (LOI_{550°C}), минимальное. Доминирование пылицы трав в донных отложениях предполагает господство открытых ландшафтов.

Относительно низкие концентрации U, часто мигрирующего в водных растворах, и высокое содержание Th, преимущественно мигрирующего в терригенных взвесах [2], связаны с преобладанием физического выветривания и со слабой интенсивностью водной миграции в холодных и континентальных условиях позднеледниковья. Максимальные концентрации U (88 г/т) накапливаются в карбонатном сапропеле с торфянистыми про-

слоями (11.6–10.3 к.л.н.). Распространение березовых лесов указывает на потепление и увлажнение климата. Содержание органического вещества и кальцита в донных отложениях резко повышается, снижается роль аллотигенных минералов. Наряду с аномальными концентрациями U в донных отложениях отмечено высокое содержание Mo, Se и W, для которых также, как и для U(VI), характерно образование крупных комплексных анионов в окислительной обстановке миграции [6].

Изменения климата способствовали активной водной миграции U, предположительно в виде уранил-карбонатных комплексов. Возросла интенсивность выщелачивания горных пород из-за усиления физико-химических и биологических процессов на водосборе. ЕС вод озера понизилась с 1100 мкСм/см до 560 мкСм/см. Фиксация углекислоты водными растениями способствовала смещению карбонатного равновесия с последующим осаждением кальцита. Уран мог осаждаться с кальцитом, в составе терригенных взвесей, а также на различных сорбентах, таких как органические частицы и оксиды-гидроксиды Fe и Mn с последующим образованием собственных минеральных фаз в процессе диагенеза [11, 12].

Изменения растительности, времени накопления слоистого карбонатного сапропеля и серого сапропеля с раковинами (10.3–4.2 тыс. к.л.н.) связаны с возрастанием роли сосны и темнохвойных пород и указывают на дальнейшее увлажнение климата. В гумидных условиях обычно повышается интенсивность миграции U с гуминовыми кислотами, однако его сорбция из растворов увеличивается при значениях рН ниже нейтральных. Улучшению сорбции урана в почвах способствуют также высокое содержание органического вещества, низкая концентрация карбоната кальция и пониженное содержание кислорода [13, 14]. Все эти условия характерны для таежных ландшафтов с большой долей участия хвойных пород, которые характеризуются малой зольностью и низкой скоростью разложения опада. Из-за ограничения миграции в данном типе ландшафта содержания U в донных отложениях уменьшаются более чем в два раза. Небольшие вариации содержания U в этот период также отражают ландшафтно-климатические изменения в течение голоцена. Так, в результате снижения роли хвойных лесов территории в периоды 8.5–8.0 и 6.5–4.2 тыс. к.л.н. (рис. 1) произошло возрастание ЕС вод озера и содержания в нем U. Кроме испарительной концентрации, вероятным механизмом этих изменений могло быть повышение доли участия лиственных пород в составе лесов. Опад березы, распространившейся в оба периода, и широколиственных пород, максимальное участие которых отмечено 6.5–4.2 тыс. к.л.н., характеризу-

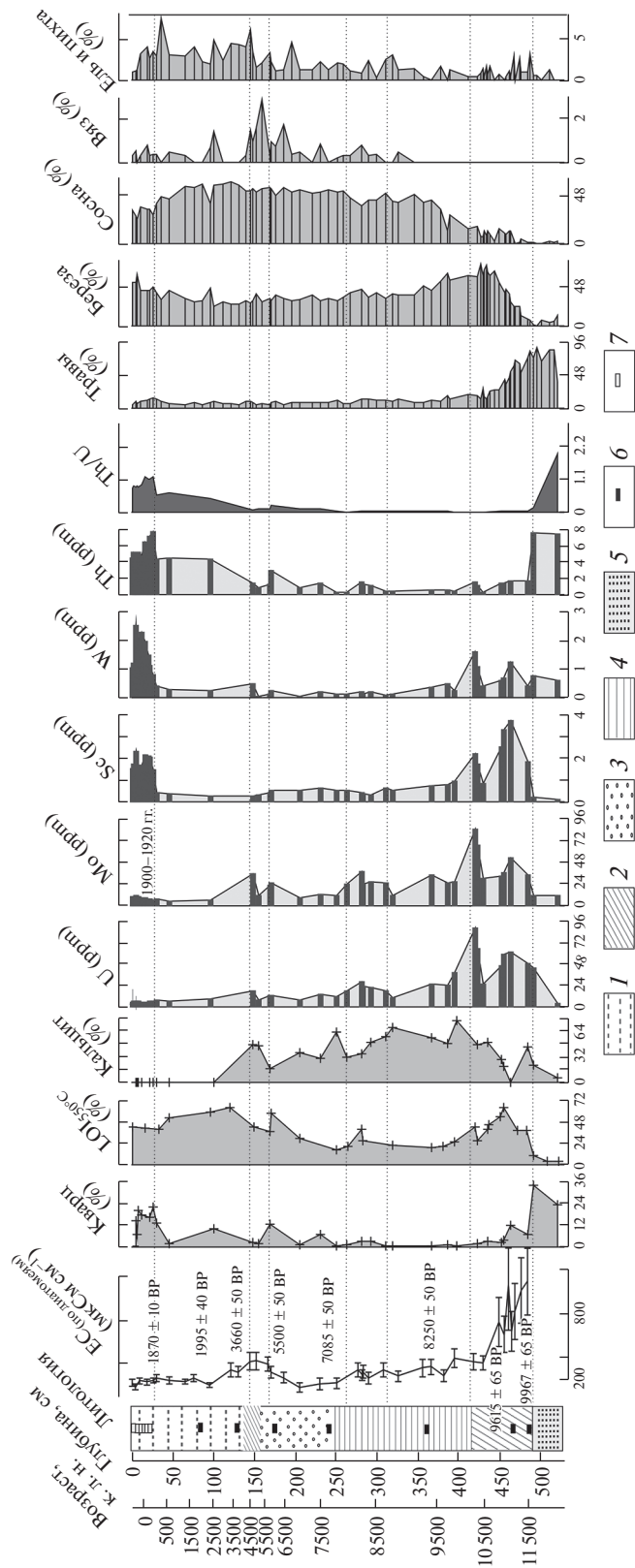


Рис. 1. Диаграмма сопоставления вертикального распределения U с данными комплексного анализа колонки донных отложений оз. Сырыткуль. В диаграмму включены данные спорово-пыльцевого и геохимического анализа донных отложений [8], а также количественная реконструкция электропроводности (ЕС) по данным диатомового анализа [9]: 1 – темно-бурый сапропель; 2 – карбонатный сапропель с торфянистыми прослоями; 3 – темно-серый сапропель с раковинами; 4 – слоистый карбонатный сапропель; 5 – сырая глина; 6 – места отбора проб на радиоуглеродное датирование (табл. 2 в приложении); 7 – места отбора проб на датирование по ²¹⁰Pb [8].

ется большей зольностью и повышенным содержанием кальция, в сравнении с опадом ели и сосны [15]. Небольшое возрастание рН способствует увеличению интенсивности миграции U с гуминовыми кислотами. Повышение содержания Са и растворенной углекислоты в условиях уменьшения кислотности почв, улучшения аэрации и степени разложения опада способствует снижению адсорбции U и формированию подвижных U(VI)-карбонатных комплексов [13]. Корреляция ЕС и концентрации U связана с одинаковым прямым и косвенным (через водосбор) воздействием климата на эти параметры.

Снижение содержания U (5–8 г/т) отмечено для темно-бурого сапропеля, который начал накапливаться около 4.2 тыс. к.л.н. (рис. 1). Возрастание роли темнохвойных лесов и резкое уменьшение участия широколиственных пород указывают на похолодание и увлажнение климата. В этих условиях интенсивность миграции U уменьшается, а ЕС вод снижается. Понижение концентраций U в донных отложениях может быть связано и со снижением его первичного содержания в почвах и коре выветривания из-за активной миграции с карбонатными комплексами и гуминовыми кислотами с последующей аккумуляцией в донных отложениях в течение голоцена. Концентрация элементов-примесей в верхней части колонки, накопленной за последние 100–120 лет, контролируется антропогенным фактором. Резкое повышение содержания Se и W в противовес снижению концентрации U в это время объясняется воздействием аэротехногенных выбросов Карабашского медеплавильного комбината. Возрастание содержания аллотигенных минералов и Th связано со строительством в начале XX века гидротехнического сооружения, ограничившего сток озера, что привело к возрастанию уровня озера на 3 м и существенному изменению его водного режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено 17-кратное изменение содержания U в донных отложениях оз. Сырыткуль в зависимости от ландшафтно-климатической обстановки осадконакопления в голоцене. Минимальные концентрации U определены для позднеледниковых отложений. Максимальные содержания U отмечены для карбонатных отложений с торфянистыми прослоями, накопленных в раннем голоцене в условиях увлажнения и потепления климата, способствующих возрастанию интенсивности физико-химического выветривания и водной миграции при доминировании листовенных пород в составе лесных формаций. Отмечено снижение концентраций U для отложений, накопленных с начала похолодания и увлажнения климата около 4.2 тыс. к.л.н., приведших к возрастанию роли

темнохвойных лесов, формирующих условия, препятствующие активной миграции U.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 18–77–00040. Хронологические построения выполнены по государственному заданию и проекту УрО РАН (№ 18–5–5–43).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel Yu.S.* // Russ Geol Geophys+. 2010. V. 51. № 11. P. 1167–1178.
2. *Арбузов С.И., Рихванов Л.П.* // В кн. Геохимия радиоактивных элементов. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. С. 300.
3. *Карнов А.В., Владимиров А.Г., Разворотнева Л.И., Кривоногов С.К., Николаева И.В., Мороз Е.Н.* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 9. С. 6–17.
4. *Иванов А.Ю., Арбузов С.И.* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 136–146.
5. *Жмодик С.М., Кириченко И.С., Белянин Д.К., Хлыстов О.М.* // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № S3–2. С. 103–106.
6. *Перельман А.И.* в кн. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. С. 528.
7. *Chebykin E.P., Edgington D.N., Goldberg E.L., Phedorin M.A., Kulikova N.S., Zheleznyakova T.O., Vorobyova S.S., Khlystov O.M., Levina O.V., Ziborova G.A., Grachev M.A.* // Russ. Geol. and Geophys. 2004. V. 45. P. 539–556.
8. *Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G.* // Quat Int. 2016. V. 420. № 28. P. 65–75.
9. *Maslennikova A.V.* // J. Paleolimnol. 2020. V. 63 (2) P. 129–146.
10. *Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н., Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Никольский В.Ю., Шалагинова В.И., Петрова А.С., Середина В.В.* // В кн.: Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Южно-Уральская. (2015). Лист N-41-VII (объяснительная записка).
11. *Vosel Yu.S., Strakhovenko V.D., Makarova I.V., Vosel S.V.* // Doklady Earth Sci. 2015. V. 462. № 1. P. 522–526.
12. *Och L., Müller B., März C., Wichser A., Vologina E.G., Sturm M.* // Chem Geol. 2016. V. 441. P. 92–105.
13. *Zheng Z.P., Tokunaga T.K., Wan J.M.* // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37. P. 5603–5608.
14. *Rachkova N.G., Shuktomova I.I., Taskaev A.I.* // Eurasian Soil Sc. 2010. V. 43. № 6. P. 651–658.
15. *Винокурова П.И., Лобанова О.В.* // Вестник МАРГТУ. 2011. № 2. С. 76–83.

HOLOCENE ENVIRONMENTS OF ANOMALOUS URANIUM CONCENTRATIONS IN LAKE SYRYTKUL (SOUTHERN URALS) SEDIMENTS

A. V. Maslennikova^{a,b,#}, V. N. Udachin^{a,b}, and Corresponding Member of the RAS V. N. Anfilogov^a

^a *South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, Miass, Russian Federation*

^b *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: adenophora@inbox.ru*

The influence of Holocene sedimentation conditions on the accumulation of uranium (U) in Lake Syrytkul sediments was studied. Comparison between geochemical, palynological and diatom data showed the relation between uranium concentration (5–89 ppm) in lake sediments and environmental changes during more than 12 cal ka. The Late Glacial lake clay was relatively depleted in U. The maximum enrichment of U was determined for lake sediments accumulated about 11.6–10.3 cal ka BP in conditions of climate warming and humidification. It was concluded that climate could affected on U accumulation through the catchment vegetation shifts. Dark coniferous forests that spread out after climate cooling ~4.2 cal ka could contributed to U decrease.

Keywords: uranium, lake sediments, lake, Southern Urals, Holocene