

УДК 556.3.027, 550.46:551.49

## НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ – $^{234}\text{U}$ – $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

*Токарев И. В.*

*РЦ РДМИ, Научный парк СПбГУ  
E-mail: tokarevigor@gmail.com*

В природных водах, как правило, наблюдается нарушение радиоактивного равновесия в цепочке  $^{238}\text{U} \dots \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$ . В подземных водах в подавляющем числе случаев  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,8\text{--}3$  (по активностям). Однако в ряде регионов измерены отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 10$ , вплоть до 50. Ураганные избытки  $^{234}\text{U}$  могут быть объяснены климатическими вариациями, когда в периоды похолоданий мерзлые породы накапливают  $^{234}\text{U}$ , а при таянии теряют его быстрее, чем  $^{238}\text{U}$ . Проверка этой гипотезы выполнена по данным об изотопном составе урана в хемо- и биогенных образованиях Мирового океана и Байкала, являющихся резервуарами, аккумулирующими континентальный сток. Для Мирового океана наиболее значительные обогащения  $^{234}\text{U}$  отмечены в северных и внутренних морях в периоды климатических потеплений. В донных отложениях оз. Байкал (плейстоцен—голоцен) избытки  $^{234}\text{U}$  увеличиваются в периоды потеплений и существенно превышают таковые в Мировом океане. В притоках Байкала и озерных водах избытки  $^{234}\text{U}$  увеличиваются с севера на юга вслед за уменьшением доли площади, занятой мерзлотой, и возрастая в теплый период года. Поведение  $^{234}\text{U}$  в рассмотренных резервуарах согласуется с гипотезой о решающем влиянии мерзлоты на аномальное повышение отношений  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах.

**Ключевые слова:** неравновесный уран,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , климатические вариации, мерзлота, Мировой океан, Байкал.

### ВВЕДЕНИЕ

Нарушение изотопного равновесия для растворенного в природных водах урана ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) открыто П.И. Чаловым [1, 2, 3] и В.В. Чердынцевым [4, 5] и объяснено радиокинетическим разделением — повышением миграционной подвижности дочерних продуктов по сравнению с родительскими изотопами (эффект Сцилларда-Хаббарда). Для подавляющего большинства водных объектов отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  лежит в интервале 0,8–3 (здесь и далее по активностям). В средних и высоких широтах Земного шара в подземных водах наблюдается устойчивое смещение этого отношения в область 10–20, а в отдельных случаях фиксируются величины  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 50$  [6, 7].

Общепринято объяснять сверхвысокие обогащения ураном-234 выбросом атомов отдачи ( $^{234}\text{Th}$ ) из минеральной матрицы в водную среду [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Ограничением данной гипотезы является то обстоятельство, что значительное обогащение ураном-234 возникает только при высокой дисперсности зерен минерала-хозяина  $r < 10^{-5}$  м и относительно длительном времени  $t > 10^4$  лет контакта воды с породой.

Поляковым В.А. [6] выдвинута идея о том, что ураганные избытки урана-234 следует связать с климатическими вариациями. В периоды похолоданий, из-за отсутствия жидкой воды,  $^{234}\text{U}$  накапливается во вмещающих породах, а затем экстрагируется из них талой водой, образующейся при деградации мерзлоты, более высокими темпами, чем  $^{238}\text{U}$ . Указанная гипотеза подтверждена автором данной

## НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

статьи при изучении подземных вод, включавшем определение  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и гелиевое датирование [17, 18, 19, 20]. Однако, более фундаментальная проверка гипотезы возможна на базе данных об изотопном составе урана в хемо- и биогенных образованиях в Мировом океане и крупных континентальных водоемах.

### 1. ОКЕАНИЧЕСКИЙ РЕЗЕРВУАР

Океан, включая донные отложения, органогенные образования и водную массу, — резервуар, наиболее значимо осредняющий изотопные сигналы, возникающие за счет поступления урана с континентов. Генерализованное среднее для современного океана  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1,144$ — $1,145^5$  [21, 22] при среднем составе речного стока  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 1,25$  [23]. Если бы реки были единственным источником избытка  $^{234}\text{U}$  то, учитывая среднее время пребывания U в океанах ~400 тыс. лет [14, 24], в океанической воде отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  было бы ~1,08 [21, 25, 26].

Указанное различие в расчетных и наблюдаемых отношениях  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в океанической воде не может быть объяснено увеличением речного стока и/или уменьшением времени пребывания урана в океане [22]. Следовательно, должен быть источник избыточного урана-234. В соответствии с гипотезой о вылете ядер отдачи  $^{234}\text{Th}$ , как основной причине нарушения равновесия  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , рост потока  $^{234}\text{U}$  с континентов объясняют увеличением степени физической дезинтеграции пород в периоды оледенений [27, 28, 29]. Предполагают также существование источника урана-234, обусловленного увеличением площади осушенного шельфа при падении уровня океана в периоды похолоданий [30].

Из гипотез, связывающих рост избытков  $^{234}\text{U}$  с увеличением потока ядер отдачи  $^{234}\text{Th}$ , следует, что наибольшие нарушения равновесия  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в океанической воде должны наблюдаться в ледниковые эпохи. Указанные гипотезы не отвечают на следующие вопросы, возникающие из наблюдений.

1. Почему малы потери ядер отдачи  $^{234}\text{Th}$  мелкообломочными частицами на континентальном этапе переноса? В зоне развития мелкодисперсных пород на континентах — едомы, лессов и черноземов, происхождение которых связывают с ветровым разносом пылевого материала в ледниковые эпохи, значительного нарушения равновесия  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в грунтовых водах, как правило, не наблюдается.

2. Допустим, что увеличение потока ядер отдачи  $^{234}\text{Th}$ , действительно, обусловлено ростом поступления пыли в океан в эпохи похолоданий, который, действительно, имел место [31, 32]. И пыль и торий в составе химических соединений имеют весьма малое среднее время пребывания в океанической воде [33, 34, 35] и быстро депонируются в составе донных осадков. Какой механизм, обеспечивает достаточный поток  $^{234}\text{U}$  (и не затрагивает  $^{238}\text{U}$ ) из поровой воды осадков в океаническую воду? Во-первых, подвижность урана в поровых водах понижена, так как окислительные условия отмечаются только в тонком придонном слое осадков или при отсутствии органического материала, который сразу переводит

<sup>5</sup> В океанографических исследованиях, ввиду малых вариаций, отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  принято выражать в промилле  $\delta^{234}\text{U} = (^{234}\text{U}/^{238}\text{U}_{\text{АКТ}} - 1) \times 1000$ , ‰. Далее в данной статье эта нотация также будет использована.

обстановку в восстановительную. Во-вторых, диффузионный вынос урана из поровых растворов в свободную воду затрудняется накоплением новых порций осадков, за исключением океанической абиссали, где процесс аккумуляции сильно замедлен. При этом изредка наблюдаемые избытки урана  $^{234}\text{U}$  в поровых водах океанических осадков с отношениями  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} > 1,14$  именно в абиссали и не отмечены [9, 11, 16].

Обобщение данных по кораллам, створкам моллюсков и карбонатным морским отложениям демонстрирует заметное изменение отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  во времени с максимумами в периоды потеплений (рис. 1). Минимум избытков урана-234 в океане отмечается в период последнего оледенения, что противоречит гипотезе, связывающей рост избытков  $^{234}\text{U}$  с увеличением потока ядер отдачи  $^{234}\text{Th}$ .

Распределение отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  во времени для океанических хемо- и органогенных образований значительно лучше объясняется гипотезой, связывающей рост потока урана-234 с таянием мерзлоты. В микулинское межледниковье, которое было несколько теплее нынешнего, избытки урана-234 оказывались несколько выше современных, по-видимому, в связи с большей степенью таяния мерзлоты. Для кривой распределения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  во времени обнаруживается тонкая структура, когда небольшие возрастания отношения соответствуют периодам временного потепления внутри эпохи последнего похолодания.

Отметим, что значительных избытков урана-234 в кораллах, створках моллюсков и карбонатным отложениях экваториальной зоны океана не обнаруживается [22]. Напротив, Северный Ледовитый океан, как относительно изолированный и испытывающий наибольшее удельное влияние континентального стока из зоны распространения мерзлоты, демонстрирует максимальные избытки  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . Например, в Баренцевом море концентрация урана составляет  $(0,49-35,6) \times 10^{-7}$  г/л, а изотопный состав варьирует от 1,11 до 1,91 [74]. Судя по схеме течений, наиболее обогащены ураном-234 участки Баренцева моря, в которых вклад атлантической воды минимален.

Вслед за  $^{234}\text{U}$ , соответствующие аномалии должны обнаруживаться и в изотопном составе тория. Учитывая время, необходимое для достижения радиоактивного равновесия в цепочке «... $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$ ...», аномалии в отношении  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , возникающие под влиянием климатических вариаций, должны прослеживаться значительно дальше в прошлое, чем только по отношению  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ .

Например, в Норвежском море по росту избытка тория-230 и облегчению изотопного состава кислорода карбонатов однозначно выделяется голоценовое, микулинское и предыдущие потепления (МИС-1, МИС-5 и МИС-7, соответственно, Рис. 2).

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

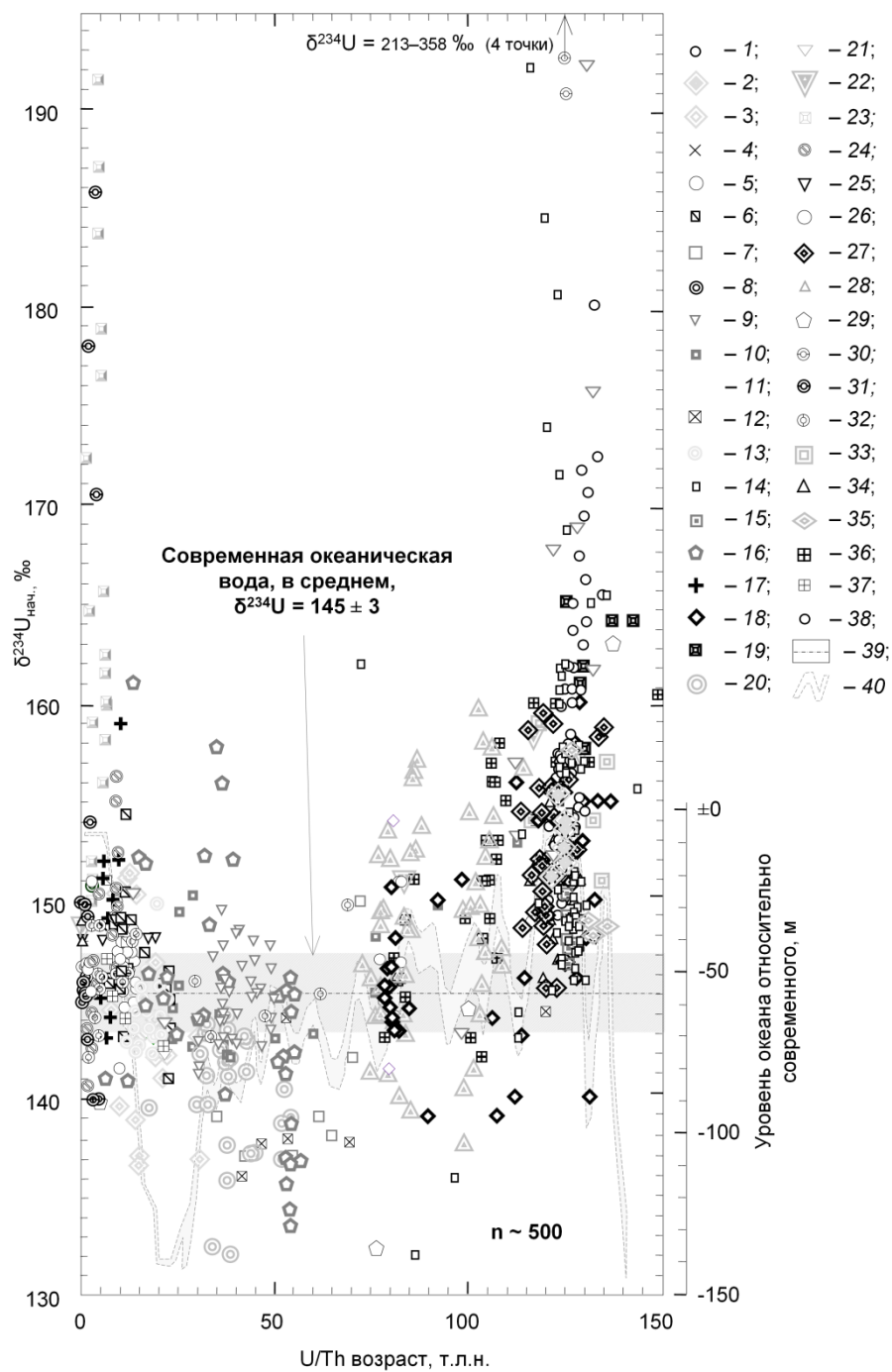


Рис. 1. Изотопный состав урана ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) в кораллах и карбонатах приполярных и арктических областей Мирового океана: 1 — [35], 2 — [37], 3 — [38],

4 — [39], 5 — [40], 6 — [41], 7 — [42], 8 — [43], 9 — [44], 10 — [45], 11 — [46], 12 — [47], 13 — [48], 14 — [49], 15 — [50], 16 — [51], 17 — [52], 18 — [53], 19 — [30], 20 — [54], 21 — [55], 22 — [56], 23 — [57], 24 — [58], 25 — [59], 26 — [60], 27 — [61], 28 — [62], 29 — [63], 30 — [64], 31 — [65], 32 — [66], 33 — [67], 34 — [68], 35 — [69], 36 — [70], 37 — [71], 38 — [72], 39 — изотопный состав урана в современном океане  $\delta^{234}\text{U} = 145 \pm 3 \text{ ‰}$  [21, 22], 40 — флуктуации уровня океана [73].

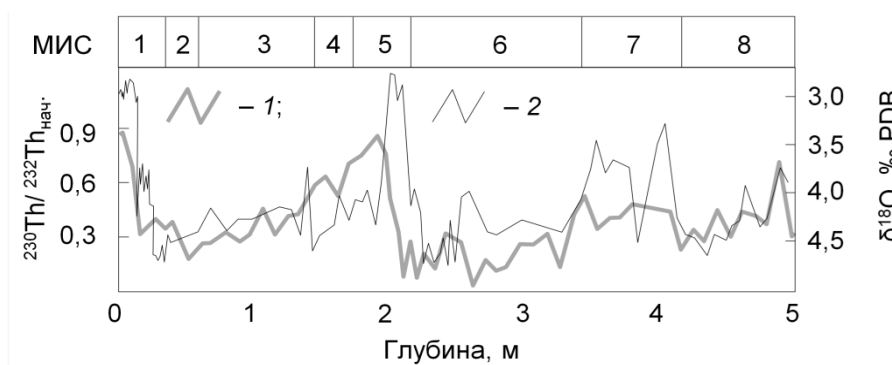


Рис. 2. Начальное отношение  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  и изотопный состав кислорода карбонатов для керна 23059 из Норвежского моря для периода 1–8 МИС (адаптировано из [75] с изменениями): 1 — изотопный состав тория; 2 — изотопный состав кислорода.

## 2. КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕСНОВОДНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

Озеро Байкал является крупнейшим резервуаром пресной воды и расположено в географической зоне, где температурное состояние горных пород в позднем плейстоцене и голоцене существенно менялось [76]. На водосборе озера присутствует как прерывистая, так и сплошная мерзлота. Характерное для региона современное степливание и таяние мерзлоты [77] оказывает влияние на объем и химический состав речного стока [78].

В донных отложениях Байкала на климатические вариации реагирует ряд геохимических, минеральных и биологических систем [79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106]. В периоды потеплений резко возрастает концентрация створок диатомей, в холодные — поток глинистого материала и доля терригенного урана (рис. 3а).

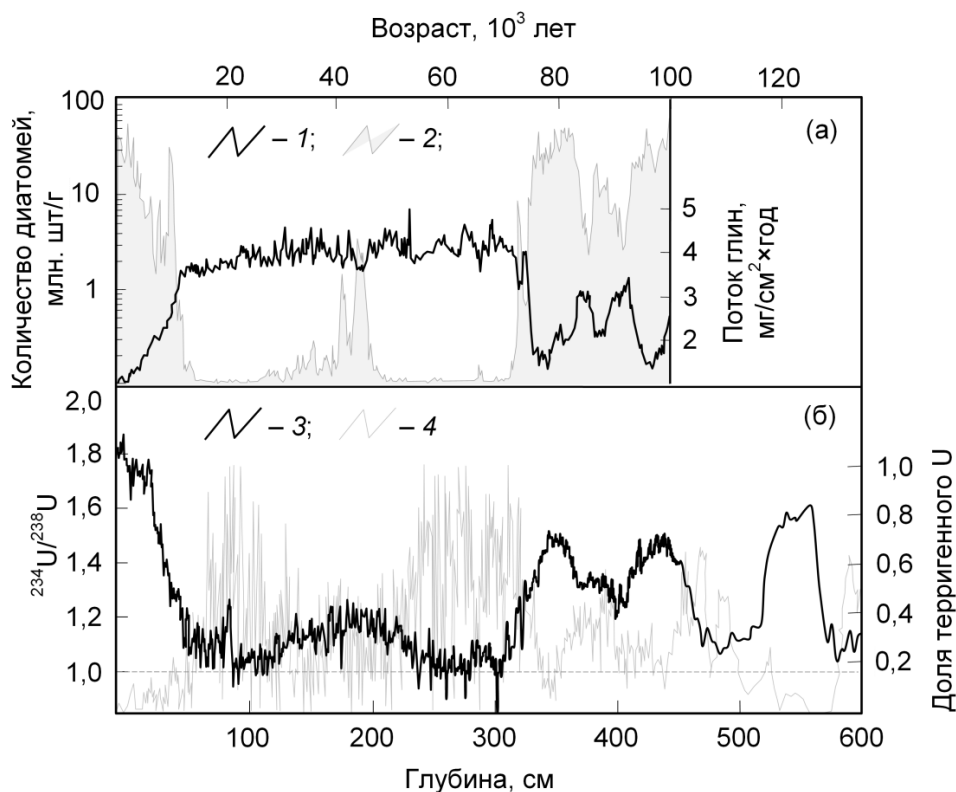


Рис. 3. Распределение по глубине донных осадков оз. Байкал различных биологических, кластических и изотопно-геохимических индикаторов (адаптировано с изменениями из [82] — рис. 13, 17, 19, станция st-2 VER-99-1; [92] — рис. 7, станция st-7): 1 — поток глин; 2 — количество диатомей; 3 — отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ; 4 — концентрация терригенного урана.

Обогащение ураном-234 существенно уменьшается в холодные периоды и возрастает в теплые (рис. 3 б). Отметим, что уменьшение избытка урана-234 в холодные периоды при одновременном росте потока глин в озеро противоречит гипотезе прямого поступления  $^{234}\text{Th}$  в воду, как основном источнике нарушения равновесия в системе  $^{238}\text{U}$  [8, 9, 107, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Аналогичные вариации изотопно-геохимических и биогенных параметров обнаружены в донных отложениях ряда водоемов северной и северо-западной Монголии, например, оз. Хубсугул [108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117].

В [118] исследованы донные отложения озер Прибайкалья. Наибольшее обогащение ураном-234 обнаружено в озерах Цаган-Тырм (наиболее соленое  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.7$  — здесь и далее, в среднем), Мелкое ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.6$ ) и Ордынское ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.3$ ); а меньшее — в озерах Холбо-Нур ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.9$ ), Намши-Нур (наименее минерализованное  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.8$ ), Аляты ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.7$ ). Имеется корреляция между ростом отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и минерализацией воды в озере,

которая может быть объяснена ускоренной деградацией мерзлоты при контакте с соленой водой.

Источником урана в донных отложениях оз. Байкал является сеть притоков. В настоящее время в низовьях р. Селенги  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.08\text{—}2.13$  (среднее 2.11), в р. Верхняя Ангара  $1.34 \pm 0.02$  [82] и  $1.40 \pm 0.15$  [88]; в р. Баргузин —  $1.53 \pm 0.03$  [82] и  $1.56 \pm 0.14$  [88]. Для р. Селенги найдены сезонные вариации  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  [82, 119], а также уменьшение этого отношения от истоков к устью (Рис. 4). Отмечается устойчивая разница между южным и северным сектором водосбора Байкала с увеличением избытков урана-234 на юге — в зоне наиболее интенсивной современной деградации мерзлоты.

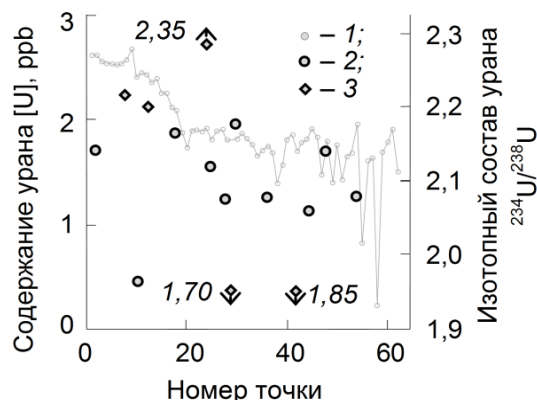


Рис. 4. Содержания и изотопный состав урана в р. Селенге (длина профиля около 400 км, точка 1 находится на границе с Монголией, а пикет 60 — в устье) и притоках (адаптировано из [82]): 1 — концентрации урана в воде р. Селенги; 2, 3 — изотопный состав урана в воде р. Селенги и притоков, соответственно.

На изотопный состав урана в поверхностных и подземных водах оказывает, по-видимому, влияние сезонное таяние мерзлоты (рис. 5), приводя к росту обогащения ураном-234 в конце теплого сезона [120]. Глубина сезонного протаивания зависит от погодных факторов, а на Култукском полигоне фиксируется также реакция четных изотопов урана на сейсмические события [120]. Поэтому обогащение ураном-234 оказывается существенно варьирующим от года к году.

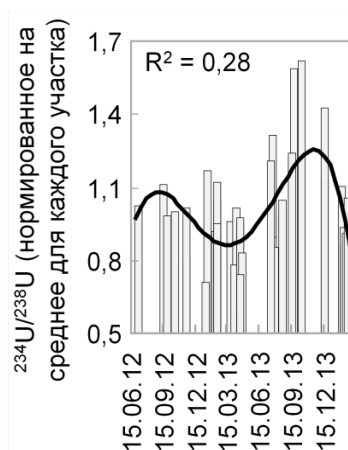


Рис. 5. Изменение изотопного состава урана ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) поверхностных и подземных вод Култукского полигона, южное Прибайкалье, (данные из таблицы 1 в [120]): отношение  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  нормировано на среднее для каждого пункта опробования, кривая — аппроксимация полиномом 4-й степени, дающим первое наилучшее приближение по  $R^2$  (надежному выявлению сезонных вариаций мешает неравномерное по времени опробование точек наблюдения).

## ВЫВОДЫ

В Мировом океане наиболее значительные обогащения ураном-234 и торием-230 фиксируются для северных и внутренних морей в периоды потеплений. Обогащение проявляется тем сильнее, чем более изолировано море от общей океанической циркуляции, чем больше относительная длина береговой линии и вклад континентальных вод в химический баланс водоема. В донных отложениях оз. Байкал в периоды похолоданий изотопный состав урана приближается к равновесным значениям  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ , а в периоды потеплений избыток урана-234 возрастает, даже более значительно, чем в океаническом резервуаре. В притоках оз. Байкал и мелких озерах отмечается рост избытков урана-234 с севера на юг, в соответствии с уменьшением доли площади, занятой мерзлотой.

Поскольку источником избыточного урана-234 в океане и крупных озерах является сток с континентов, то появление аномально повышенных отношений  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  указывает на таяние мерзлоты. Выявленный эффект согласуется с гипотезой, согласно которой накопление  $^{234}\text{U}$  в минеральной матрице происходит в периоды похолоданий мерзлых в породах. В ходе деградации мерзлоты и таяния льда поток урана-234 из вмещающих пород в талую воду существенно возрастает за счет существенно большей его мобильности, по сравнению с ураном-238.

## Список литературы

1. Чалов П. И. Исследование отношений  $\text{U(II)}/\text{U(I)}$  в некоторых природных объектах. Дисс. ... канд. техн. наук. Алма-Ата, 1954. 155 с.



2. Чалов П. И. Изотопное отношение  $U^{234}/U^{238}$  в некоторых вторичных минералах // Геохимия. 1959. № 2. С. 165–170.
3. Чалов П. И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 204 с.
4. Чердынцев В. В. Изотопный состав радиоэлементов в природных объектах и их значение в геохронологии. Труды III сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций. М.: АН СССР, 1955. С. 175–233.
5. Чердынцев В. В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1967. 238 с.
6. Поляков В. А. Изучение изменений гидрохимии и ресурсов подземных вод прибрежных водозаборов в Эстонии по изотопным данным. Тезисы всесоюзной конференции по гидрогеологии. Звенигород. 1991. С. 60–62.
7. Arndt, M. F., and West, L. A Study of the factors affecting the gross alpha measurement, and a radiochemical analysis of some groundwater samples from the state of Wisconsin exhibiting an elevated gross alpha activity. Wisconsin groundwater management practice monitoring project, DNR-176. 2004. 57 p.
8. Calsteren van, Thomas L. Uranium-series dating applications in natural environmental science. *Earth-Sci. Rev.*, 2006, v. 75, p. 155–175.
9. Cochran J. K. and Krishnaswami S. Radium, thorium, uranium and  $^{210}Pb$  in deep-sea sediments and sediment pore waters from the north equatorial Pacific. *Am. J. Sci.*, 1980, v. 280, p. 849–889.
10. Henderson G. M., Burton K. W. Using ( $^{234}U/^{238}U$ ) to assess diffusion rates of isotope tracers in ferromanganese crusts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 170, p. 169–179.
11. Henderson G. M., Slowey N. C., Haddad G. A. Fluid flow through carbonate platforms: constraints from  $^{234}U/^{238}U$  and Cl- in Bahamas pore-waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 169 (1–2), p. 99–111.
12. Ivanovich M., Harmon R. S. eds. Uranium-series Disequilibrium. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford. 1992. xxxiv + 910 p.
13. Ku T. L. An evaluation of the  $^{234}U/^{238}U$  method as a tool for dating pelagic sediments. *J. Geophys. Res.*, 1965, v. 70 (14), p. 3457–3474.
14. Ku T. L., Knauss K.G., Mathieu G.G. Uranium in open ocean: Concentration and isotopic composition. *Deep Sea Res. Part II Topical Stud. in Oceanogr.*, 1977, v. 24 (11), 1005–1017.
15. Russell A. D., Emerson S. R., Nelson B. K., Erez J., and Lea D. Uranium in foraminiferal calcite as a recorder of seawater uranium concentrations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994a, v. 58 (2), p. 671–681.
16. Russell A. D., Edwards R. L., Hoff J. A., McCorkle D., and Sayles Sediment source of  $^{234}U$  suggested by  $d^{234}U$  in North Pacific pore waters. *Fall Meeting Supplement. EOS*, 1994b, v. 75 (44), p. 332.
17. Токарев И. В. Использование изотопных данных ( $\delta^2H$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $^{234}U/^{238}U$ ) при изучении процессов деградации мерзлоты в результате долговременных вариаций климата // Записки Горного института. 2008. Т. 176. С. 191–195.
18. Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г., Поздняков С. П., Поляков В. А., Кузнецов В. Ю. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 1) Палеорекострукция условий формирования подземных вод // Водные ресурсы. 2009а. Т. 36 (2). С. 219–227.
19. Токарев И. В., Зубков А. А., Румынин В. Г., Поздняков С. П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 2) Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами // Водные ресурсы. 2009б. Т. 36 (3). С. 363–374.
20. Tokarev I. V., Zubkov A. A., Rumynin V. G., Polyakov V. A., Kuznetsov V. Yu., Maksimov F. E. Origin of high  $^{234}U/^{238}U$  ratio in post-permafrost aquifers. In “Uranium in the Environment (Mining Impact and Consequences)”. B. J. Merkel and A. Hasche-Berger eds. Taylor & Francis. 2006, p. 847–856.
21. Chen J.H., Edwards R.L., and Wasserburg G.J.  $^{238}U$ ,  $^{234}U$  and  $^{232}Th$  in seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, v. 80, p. 241–251.
22. Henderson G. M., Anderson R. F. The U-series toolbox for paleoceanography. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, v. 52 (1), p. 493–531.
23. Chabaux F., Riotte J., and Dequincey O. U-Th-Ra fractionations during weathering and river transport. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, v. 52 (1), p. 533–576.
24. Dunk R. M., Mills R. A., and Jenkins W. J. A reevaluation of the oceanic uranium budget for the Holocene. *Chem. Geol.*, 2002, v. 190, p. 45–67.
25. Cheng H., Adkins J.F., Edwards R.L., and Boyle E.A.  $^{230}Th$  dating of deep-sea corals. *Geochem.*

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

- Cosmochim. Acta, 2000, v. 64 (14), p. 2401–2416.
26. Robinson L. F., Belshaw N. S., and Henderson G. M. U and Th isotopes in seawater and modern carbonates from the Bahamas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68 (8), p. 1777–1789.
  27. Kronfeld J. Uranium deposition and Th-234 alpha-recoil: an explanation for extreme U-234/U-238 fractionation within the Trinity aquifer. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, v. 21, p. 327–330
  28. Kronfeld J., Gradsztajn E., Müller H.W., Radin J., Yaniv A. and Zach R. Excess  $^{234}\text{U}$ : an aging effect in confined waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, v. 27, p. 342–345.
  29. Kronfeld J., Vogel J.C. Uranium isotopes in surface waters from southern Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 105, p. 191–195.
  30. Esat T. M., Yokoyama Y. Correlated Uranium and Sea-Level Fluctuations in Late Quaternary Oceans. *Goldschmidt-2000*, September 3<sup>rd</sup>–8<sup>th</sup>, 2000. Oxford, UK. *J. Conf. Abstr.*, 2000, v. 5 (2), p. 387–388.
  31. Muhs D. R. The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Res.*, 2013, v. 9, p. 3–48.
  32. Rea D. K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind. *Rev. Geoph.*, 1994, v. 32 (2), p. 159–195.
  33. Anderson R. F., Cheng H., Edwards R.L., Fleisher M.Q., Hayes C.T., Huang K.-F., Kadko D., Lam P.J., Landing W. M., Lao Y., Lu Y., Measures C.I., Moran S.B., Morton P.L., Ohnemus D.C., Robinson L.F. and Shelley R.U. How well can we quantify dust deposition to the ocean? *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2016, v. 374, 20150285.
  34. Broecker W. S., Kaufman A., Trier R. M. The residence time of thorium in surface sea water and its implications regarding the rate of reactive pollutants. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, v. 20 (1), p. 35–44.
  35. Moore W. S. The thorium isotope content of ocean water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1981, v. 53 (3), p. 419–426.
  36. Bar-Matthews M., Wasserburg G. J., and Chen J. H. Diagenesis of fossil coral skeletons: Correlation between trace elements, textures, and  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, 257–276.
  37. Thompson W. G., Curran H. A., Wilson M. A. and White B. Sea-level oscillations during the last interglacial highstand recorded by Bahamas corals. *Nature Geosci. Lett.* Published online: 11 September 2011. DOI: 10.1038/ngeo1253.
  38. Bard E., Fairbanks R. G., Hamelin B., Zindler A. and Hoang C. T. Uranium-234 anomalies in corals older than 150,000 years. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 2385–2390.
  39. Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 1990, v. 346, p. 456–458.
  40. Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. and Rougerie F. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 1996, v. 382, p. 241–244.
  41. Cabioch G. and Ayliffe L. K. Raised coral terraces at Malakula, Vanuatu, Southwest Pacific, indicate high sea level during Marine Isotope Stage 3. *Quat. Res.*, 2001, v. 56, p. 357–365.
  42. Chappell J., Omura A., Esat T., McCulloch M., Pandolfi J., Ota Y. and Pillans B. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 141, p. 227–236.
  43. Copard K., Colin C., Henderson G.M., Scholten J., Douville E., Sicre M.-A., Frank N. Late Holocene intermediate water variability in the northeastern Atlantic as recorded by deep-sea corals. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2012, v. 313–314, p. 34–44.
  44. Chutcharavan P. M., Dutton A., Ellwood M.J. Seawater  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  recorded by modern and fossil corals *Geoch. Cosmoch. Acta*, 2018, v. 224 (1), p. 1–17.
  45. Cutler K. B., Edwards L. R., Taylor F. W., Cheng H., Adkins J., Gallup C.D., Cutler P.M., Burr G.S. and Bloom A.L. Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 206, p. 253–271.
  46. Cutler K. B., Gray S. C., Burr G. S., Edwards R. L., Taylor F. W., Cabioch G., Beck J. W, Cheng H. and Moore J. Radiocarbon calibration and comparison to 50 Kyr BP with paired  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}$  dating of corals from Vanuatu and Papua New Guinea. *Radiocarbon*, 2004, v. 46, p. 1127–1160.
  47. Dia A. N., Cohen A. S., O’Nions R. K. and Shackleton N.J. Seawater Sr isotope variation over the past 300 kyr and influence of global climate cycles. *Nature*, 1992, v. 356, p. 786–788.
  48. Douarin M., Elliot M., Noble S. R., Sinclair D., Henry L.-A., Long D., Moreton S. G., Roberts J. M. Growth of north-east Atlantic cold-water coral reefs and mounds during the Holocene: A high resolution

- U-series and  $^{14}\text{C}$  chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, v. 375, p. 176–187.
49. Dutton A., Webster J. M., Zwartz D., Lambeck K., Wohlfarth B. Tropical tales of polar ice: evidence of Last Interglacial polar ice sheet retreat recorded by fossil reefs of the granitic Seychelles islands. *Quat. Sci. Rev.* 2015, v. 107 (1), p. 182–196.
  50. Dutton A., Rubin K., McLean N., Bowring J., Bard E., Edwards R. L., Henderson G. M., Reid M. R., Richards D. A., Sims K. W. W., Walker J. D., Yokoyama Y. Data reporting standards for publication of U-series data for geochronology and timescale assessment in the earth sciences. *Quat. Geochr.*, 2017, v. 39, p. 142–149.
  51. Eisele M. H. The long-term development of cold-water coral mounds in the NE-Atlantic. Diss. zur Erlangung des akadem. Grades eines Doktors der Naturwiss. Bremen. 2010, 115 p.
  52. Eisenhauer A., Wasserburg G.J., Chen J.H., Bonani G., Collins L.B., Zhu Z.R. and Wyrwoll K.H. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th(TIMS) and  $^{14}\text{C}$ (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 114, p. 529–547.
  53. Esat T. M., McCulloch M. T., Chappell J., Pillans B. and Omura A. Rapid fluctuations in sea level recorded at Huon Peninsula during the Penultimate Deglaciation. *Science*, 1999, v. 283, p. 197–201.
  54. Esat T.M., Yokoyama Y. Variability in the uranium isotopic composition of the oceans over glacial-interglacial timescales. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, v. 70, p. 4140–4150.
  55. Hamelin B., Bard E., Zindler A. and Fairbanks R.G.  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  mass spectrometry of corals: How accurate is the U-Th age of the last interglacial period? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 106, p. 169–180.
  56. Gallup C. D., Edwards R.L. and Johnson R.G. The timing of high sea levels over the past 200,000 years. *Science*, 1994, v. 263, p. 796–800.
  57. Gutjahr M., Vance D., Hoffmann D.L., Hillenbrand C.-D., Foster G.L., Rae J.W.B., Kuhn G. Structural limitations in deriving accurate U-series ages from calcitic cold-water corals contrasts with robust coral radiocarbon and Mg/Ca systematics. *Chem. Geol.*, 2013, v. 355, p. 69–87.
  58. López Correa M., Montagna P., Joseph N., Rüggeberg A., Fietzke J., Flögel S., Dorschel B., Goldstein S. L., Wheeler A., Freiwald A. Preboreal onset of cold-water coral growth beyond the Arctic Circle revealed by coupled radiocarbon and U-series dating and neodymium isotopes. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, v. 34, p. 24–43.
  59. Ludwig K. R., Szabo B. J., Moore J. G. and Simmons K. R. Crustal subsidence rate off Hawaii determined from  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ages of drowned coral reefs. *Geology*, 1991, v. 19, p. 171–174.
  60. Ludwig K. R., Muhs D. R., Simmons K. R., Halley R. B. and Shinn E. A. Sea-level records at ~80 ka from tectonically stable platforms: Florida and Bermuda. *Geology*, 1996, v. 24 (3), p. 211–214.
  61. Muhs D. R., Szabo B. J. New uranium-series ages of the Waimanalo Limestone, Oahu, Hawaii: Implications for sea level during the last interglacial period. *Marine Geol.* 1994, v. 118 (3–4), p. 315–326.
  62. Potter E.-K., Esat T.M., Schellmann G., Radtke U., Lambeck K., McCulloch M.T. Suborbital-period sea-level oscillations during marine isotope substages 5a and 5c. *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2004, v. 225 (1–2), p. 191–204.
  63. Potter E.-K., Stirling C. H., Wiechert U. H., Halliday A. N., Spötl C. Uranium-series dating of corals in situ using laser-ablation MC-ICP MS. *Int. J. Mass Spectrometry*, 2005, v. 240, p. 27–35.
  64. Roberts G. P., Houghton S.L., Underwood C., Papanikolaou I., van Calsteren P., Wigley T., Cooper F.J. & McArthur J. M. Localization of Quaternary slip rates in an active rift in 105 years: An example from central Greece constrained by U-234–Th-230 coral dates from uplifted paleoshorelines. *J. Geoph. Res.*, 2009, v. 114, B1046.
  65. Shaked Y., Agnon A., Lazar B., Marco S., Avner U. and Stein M. Large earthquakes kill coral reefs at the north-west Gulf of Aqaba. *Terra Nova*, 2004, v. 16, p. 133–138.
  66. Shen C.-C., Li K.-S., Sieh K., Natawidjaja D., Cheng H., Wang X., Edwards R.L., Lam D.D., Hsieh Y.-T., Fan T.-Y., Meltzner A.J., Taylor F.W., Quinn T.M., Chiang H.-W., Kilbourne K.H. Variation of initial  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  and limits of high precision U-Th dating of shallow-water corals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, v. 72, p. 4201–4223.
  67. Stein M., Wasserburg G.J., Aharon P., Chen J.H., Zhu Z.R., Bloom A. and Chappell J. TIMS U-series dating and stable isotopes of the last interglacial event in Papua New Guinea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 2541–2554.
  68. Stirling C. H., Esat T. M., Lambeck K. and McCulloch M.T. Timing and duration of the Last

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

- Interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral growth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 160, p. 745–762.
69. Thomas A. L., Fujita K., Iryu Y., Bard E., Cabioch G., Camoin G., Cole J. E., Deschamps P., Durand N., Hamelin B., Heindel K., Henderson G.M., Mason A.J., Matsuda H., Ménabréaz L., Omori A., Quinn T., Sakai S., Sato T., Sugihara K., Takahashi Y., Thouveny N., Tudhope A.W., Webster J., Westphal H., Yokoyama Y. Assessing subsidence rates and paleo water-depths for Tahiti reefs using U-Th chronology of altered corals. *Marine Geol.*, 2012, v. 295–298, p. 86–94.
  70. Thompson W. G., Spiegelman M. W., Goldstein S.L. and Speed R.C. An open-system model for U-series age determinations of fossil corals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 210 (1–2), p. 365–381.
  71. Yokoyama Y., Esat T.M. Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in the surface seawater recorded in corals. In *Global Environmental Change in the Ocean and on Land* Eds. M. Shiyomi H. Kawahata, H. Koizumi, A. Tsuda and Y. Awaya. TERRAPUB, Tokyo. 2004, p. 279–309.
  72. Yokoyama Y., Esat T. M. and Lambeck K. Coupled climate and sea-level changes deduced from Huon Peninsula coral terraces of the Last Ice Age. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 193, p. 579–587.
  73. Spratt R. M. and Lisiecki L. E. A Late Pleistocene sea level stack. *Clim. Past.*, 2016, v. 12, p. 1079–1092.
  74. Зыков С. Б., Киселев Г. П., Зыкова Е. Н. Новые данные об уран-изотопном составе вод Баренцева моря. Тезисы. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск, 2013. С. 214–217.
  75. Scholten J. C., Botz R., Paetsch H., Stoffers P. and Weinelt M. High-resolution uranium-series dating of Norwegian-Greenland Sea sediments:  $^{230}\text{Th}$  vs.  $\delta^{18}\text{O}$  stratigraphy. *Marine Geol.*, 1994, v. 121 (1–2), p. 77–85.
  76. Безрукова Е. В. Палеогеография Прибайкалья в позднеледниковье и голоцене. Новосибирск: Наука, 1999. 129 с.
  77. Biskaborn B. K. and 48 authors. Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Communications*, 2019, v. 264 (10). 12 p.
  78. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1976. 238 с.
  79. Карабанов Е. Б., Прокопенко А. А., Кузьмин М. И., Вильяме Д. Ф., Гвоздков А.Н., Кербер Е.В. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес) // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42 (12). С. 48–63.
  80. Кузьмин М. И., Бычинский В. А., Кербер Е. В., Ощепкова А. В., Горегляд А. В., Иванов Е. В. Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений климата и окружающей среды // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55 (1). С. 3–22.
  81. Столповская В. Н., Солотчина Э. П., Жданова А. Н. Количественный анализ неглинистых минералов донных осадков озер Байкал и Хубсугул методом ИК-спектроскопии (в связи с палеоклиматическими реконструкциями) // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47 (6). С. 778–788.
  82. Чебыкин Е. П. Масс-спектрометрическое экспресс-определение элементов и природных изотопов урана и тория в осадках оз. Байкал для их датирования и расшифровки параметров палеоклиматов. Дисс. ... канд. хим. наук. Лимнологический ин-т СО РАН. Иркутск. 2006, 133 с.
  83. Чебыкин Е. П., Гольдберг Е. Л., Куликова Н. С. Элементный состав взвешенного вещества поверхностных вод озера Байкал в зоне влияния реки Селенга // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51 (10). С. 1443–1451.
  84. Carter S. J. and Colman S. M. Biogenic silica in Lake Baikal sediments: Results from 1990–1992 american cores. *J. Great Lakes Res.*, 1994, v. 20 (4), p. 751–760.
  85. Chebykin E. P., Edgington D. N., Grachev M. A. Zheleznyakova T. O., Vorobyova S.S., Kulikova N.S., Azarova I. N., Khlystov O. M., Goldberg E. L. Abrupt increase in precipitation and weathering of soils in East Siberia coincident with the end of the last glaciation (15 cal kyr BP). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 200 (2), p. 167–175.
  86. Colman S. M., Jones G. A., Rubin M., King J. W., Peck J. A. and Orem W.H. AMS radiocarbon analyses from Lake Baikal, Siberia: challenges of dating sediments from a large, oligotrophic lake. *Quat. Sci. Rev.*, 1996, v. 15, p. 669–684.

87. Demory F., Oberhänsli H., Nowaczyk N. R., Gottschalk M., Wirth R., Naumann R. Detrital input and early diagenesis in sediments from Lake Baikal revealed by rock magnetism. *Glob. Planet. Change*, 2005, v. 46 (1–4), p. 145–166.
88. Edgington D. N., Robbins J. A., Colman S. M., Orlandini K. A., Gustin M. P. Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 142, p. 29–42.
89. Fagel N., Thamó-Bózsó E., Heim B. Mineralogical signatures of Lake Baikal sediments: Sources of sediment supplies through Late Quaternary. *Sedimentary Geol.*, 2007, v. 194, p. 37–59.
90. Goldberg E. L., Phedorin M. A., Grachev M. A., Bobrov V. A., Dolbnya I. P., Khlystov O. M., Levina O. V., Ziborova G. A. Geochemical signals of orbital forcing in the records of paleoclimates found in the sediments of Lake Baikal. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.*, 2000, v. 448 (12), p. 384–393.
91. Goldberg E. L., Grachev M. A., Chebykin E. P., Phedorin M. A., Kalugin I. A., Khlystov O. M., Zolotarev K. V. Scanning SRXF analysis and isotopes of uranium series from bottom sediments of Siberian lakes for high-resolution climate reconstructions. *Nuc. Instr. Meth. Phys. Res. A.*, 2005, v. 543 (1), p. 250–254.
92. Goldberg E. L., Chebykin E. P., Zhuchenko N. A., Vorobyeva S.S., Stepanova O.G., Khlystov O. M., Ivanov E. V., Weinberg E., Gvozdkov A. N. Uranium isotopes as proxies of the environmental history of the Lake Baikal watershed (East Siberia) during the past 150 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, v. 294, p. 16–29.
93. Grachev M. A., Vorobyova S. S., Likhoshway E. V., Goldberg E. L., Ziborova G. A., Levina O. V., Khlystov O. M. A high resolution diatom record of the palaeoclimates of East Siberia for the last 2.5 my from Lake Baikal. *Quat. Sci. Rev.*, 1998, v. 17, p. 1101–1106.
94. Horiuchi K., Minoura K., Hoshino K., Oda B., Nakamura T., Kawai T. Palaeoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, v. 157, p. 95–108.
95. Kashiwaya K. ed. Long continental records from Lake Baikal. Springer-Verlag. Tokyo. Japan. 2003. 364 p.
96. Khursevich G. K., Karabanov E. B., Prokopenko A. A., Williams D. F., Kuzmin M. I., Fedenya S. A., Gvozdkov A. A. Insolation regime in Siberia as a major factor controlling diatom production in Lake Baikal during the past 800,000 years. *Quat. Int.*, 2001, v. 80–81, p. 47–58.
97. Kuzmin M. I., Karabanov E. B., Kawai T., Williams D., Bychinsky V. A., Kerber E. V., Kravchinsky V. A., Bezrukova E. V., Prokopenko A. A., Geletti V. F., Kalmychikov G. V., Goreglyad A. V., Antipin V. S., Khomutova M. Yu., Soshina N. M., Ivanov E. V., Khursevich G. K., Tkachenko L.L., Solotchina E.P., Ioshida N., Gvozdkov A.N. Deep drilling on Lake Baikal: main results. *Russ. Geol. and Geoph.*, 2001, v. 42 (1), p. 3–28.
98. Morgenstern U., Ditchburn R.G., Vologina E.G., Sturm M. <sup>32</sup>Si dating of sediments from Lake Baikal. *J. Paleolimn.*, 2013, v. 50, p. 345–352.
99. Och L. M., Müller B., Wichser A., Ulrich A., Vologina E. G., Sturm M. Rare earth elements in the sediments of Lake Baikal. *Chem. Geol.*, 2014, v. 376, p. 61–75.
100. Prokopenko A. A., Karabanov E. B., Williams D. F., Kuzmin M. I., Shackleton N. J., Crowhurst S. J., Peck J. A., Gvozdkov A. N., King J. W. Biogenic Silica Record of the Lake Baikal Response to Climatic Forcing during the Brunhes. *Quat. Res.*, 2001, v. 55, p. 123–132.
101. Shchetnikov A. A., Bezrukova E. V., Maksimov F. E., Kuznetsov V. Yu., Filinov I. A. Environmental and climate reconstructions of the Fore-Baikal area during MIS 5-1: Multiproxy record from terrestrial sediments of the Ust-Oda section (Siberia, Russia). *J. Asian Earth Sci.*, 2016, v. 129, p. 220–230.
102. Sklyarova O. A., Sklyarov E. V., Och L., Pastukhov M. V., Zagorulko N. S. Rare Earth Elements in Tributaries of Lake Baikal. *App. Geochemistry*, 2017, v. 82, p. 164–176.
103. Sturm M., Vologina E. G., Vorob'eva S.S. Holocene and Late Glacial sedimentation near steep slopes in southern Lake Baikal. *J. Limn.*, 2016, v. 75 (1) p. 24–35.
104. Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records. *Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, v. 252, p. 440–457.

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

105. Tyszkowski S., Kaczmarek H., Słowiński M., Kozyreva E., Brykała D., Rybchenko A., Babicheva V.A. Geology, permafrost, and lake level changes as factors initiating landslides on Olkhon Island (Lake Baikal, Siberia). *Landslides*, 2015, v. 12 (3), p. 573–583.
106. Watanabe T., Nakamura T., Nara F.W., Kakegawa T., Horiuchi K., Senda R., Oda T., Nishimura M., Matsumoto G.I. High-time resolution AMS  $^{14}\text{C}$  data sets for Lake Baikal and Lake Hovsgol sediment cores: changes in radiocarbon age and sedimentation rates during the transition from the last glacial to the Holocene. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 12–20.
107. Fleisher R.L., Raabe O.G. Recoiling alpha-emitting nuclei. Mechanisms for uranium-series disequilibrium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1978, v. 42 (7), p. 973–978.
108. Hovsgol Drilling Project (HDP) Members Sedimentary record from Lake Hovsgol, NW Mongolia: results from the HDP-04 and HDP-06 drill cores. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 21–37.
109. Katsuta N., Matsumoto G.I., Tani Y., Tani E., Murakami T., Kawakami S., Nakamura T., Takano M., Matsumoto E., Abe O., Morimoto M., Okuda T., Krivonogov S.K., Kawai T. A higher moisture level in the early Holocene in northern Mongolia as evidenced from sediment records of Lake Hovsgol and Lake Erhel. *Quat. Int.*, 2017, v. 455, p. 70–81.
110. Kim B., Cheong D., Lee E. Paleoenvironmental changes in northern Mongolia during the last deglaciation revealed by trace element records in ostracods from Lake Hovsgol. *Quat. Int.*, 2015, v. 384, p. 169–179.
111. Mochizukia A., Murata T., Hosoda K., Katano T., Tanaka Y., Mimura T., Mitamura O., Nakano S., Okazaki Y., Sugiyama Y., Satoh Y., Watanabe Y., Dulmaa A., Ayushsuren C., Ganchimeg D., Drucker V.V., Fialkov V.A., Sugiyama M. Distributions and geochemical behaviors of oxyanion-forming trace elements and uranium in the Hövsgöl–Baikal–Yenisei water system of Mongolia and Russia. *J. Geochem. Exploration*, 2018, v. 188, p. 123–136.
112. Orkhonselenge A., Krivonogov S.K., Mino K., Kashiwaya K., Safonova I.Y., Yamamoto M., Kashima K., Nakamura T., Kim J.Y. Holocene sedimentary records from Lake Borsog at the eastern shore of Lake Hovsgol, Mongolia, and their paleoenvironmental implications. *Quat. Int.*, 2013, v. 290–291, p. 95–109.
113. Oyunchimeg T., Chebykin E.P. High-Performance Technique on the Base of ICP-MS for Obtaining High-Resolution Records of Climate-Sensitive Elements in Bottom Sediments of Lake Hovsgol (Mongolia) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2009. Т. 17. С 97–110.
114. Prokopenko A.A., Khursevich G.K., Bezrukova E.V., Kuzmin M.I., Boes X., Williams D.F., Fedenya S.A., Kulagina N.V., Letunova P.P., Abzaeva A.A. Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed. *Quat. Res.*, 2007, v. 68, p. 2–17.
115. Solotchina E. P., Prokopenko A. A., Kuzmin M. I., Solotchin P. A., Zhdanova A. N. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 38–52.
116. Watanabe T., Minoura K., Nara F.W., Shichi K., Horiuchi K., Kakegawa T., Kawai T. Last glacial to post glacial climate changes in continental Asia inferred from multi-proxy records (geochemistry, clay mineralogy, and paleontology) from Lake Hovsgol, northwest Mongolia. *Glob. Planet. Change*, 2012, v. 88–89, p. 53–63.
117. Zhang C., Zhang W., Feng Z., Mischke S., Gao X., Gao D., Sun F. Holocene hydrological and climatic change on the northern Mongolian Plateau based on multi-proxy records from Lake Gun Nuur. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, v. 323–325, p. 75–86.
118. Восель Ю. С. Геохимия урана в современных карбонатных отложениях малых озер (формы нахождения и изотопные отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ). Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск: Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. 2015. 128 с.
119. Чебыкин Е. П., Сороковикова Л. М., Томберг И. В., Воднева Е. Н., Рассказов С. В., Ходжер Т. В., Грачев М. А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2012. Т. 20. С. 613–631.
120. Рассказов С. В., Чебыкин Е. П., Ильясова А. М., Воднева Е. Н., Чувашова И. С., Борняков С. А., Семинский А. К., Снопков С. В., Чечельницкий В. В., Гилева Н. А. Разработка Кулгукского сейсмо-прогностического полигона: вариации ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в подземных водах из

**DISEQUILIBRIUM URANIUM ( $^{238}\text{U}$  –  $^{234}\text{U}$  –  $^{230}\text{Th}$ ) AS AN INDICATOR OF GLOBAL CLIMATIC VARIATIONS. WORLD OCEAN AND GREAT LAKES**

*Tokarev I. V.*

*Center of X-ray diffraction studies at the Research park of St.Petersburg State University;  
Saint-Petersburg, Russian Federation  
E-mail: tokarevigor@gmail.com*

Violation of isotopic equilibrium in uranium-series ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) dissolved in natural waters was discovered by P.I. Chalov [1, 2, 3] and V.V. Cherdyntsev [4, 5] and explained by radiokinetic separation — an increase in the mobility of daughter products in comparison with parent isotopes (the Szilard-Hubbard effect). Generally in groundwater  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio lies in the range 0.8–3 (hereinafter, in activities). In the middle and high latitudes of the Earth in groundwater, there is a stable shift of this ratio to the region of 10–20, and in some cases the values of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \sim 50$  are recorded [6, 7]. It is generally accepted to explain the ultra-high enrichment in uranium-234 by the release of recoil atoms ( $^{234}\text{Th}$ ) from the mineral lattice into the aqueous medium [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. A limitation of this hypothesis is the fact that significant enrichment in uranium-234 occurs only when the grain size of the host mineral is very small ( $r < 10^{-5}$  m) and in a relatively long time-scale ( $t > 10^4$  years) of water-rock interaction.

Polyakov V.A. [6] put forward an idea that the hurricane excess of uranium-234 should be associated with climatic variations. During the cold period, due to the absence of liquid water,  $^{234}\text{U}$  accumulates in the host rocks, and then is extracted from them by meltwater, which formed during the degradation of permafrost, at a higher rate than  $^{238}\text{U}$ . This hypothesis was confirmed by the author of this article in the study of groundwater, including the determination of  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and (uranium+thorium)/helium-4 groundwater dating [17, 18, 19, 20]. However, a more fundamental test of the hypothesis is possible on the basis of data on the isotopic composition of uranium in chemo- and biogenic formations in the World Ocean and large continental water bodies.

World Ocean is the reservoir that most significantly averages the isotope signals occurring due to uranium flux from the continents. The generalized average for the modern ocean is  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.145 \pm 0.003$  [21, 22] and an average composition of river runoff  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \approx 1.25$  [23]. If rivers were the only source of excess  $^{234}\text{U}$ , then, taking into account the average residence time of U in the oceans  $\sim 400$  thousand years [14, 24], the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio in ocean water would be  $\sim 1.08$  [21, 25, 26]. The indicated difference in the calculated and observed  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratios in ocean water cannot be explained by an increase in river runoff and/or a decrease in the residence time of uranium in the ocean [22]. Hence, there must be a source of excess uranium-234. In accordance with the hypothesis about the emission of  $^{234}\text{Th}$  recoil nuclei (as the main reason for  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  disequilibrium), the increase in the  $^{234}\text{U}$  flux from the continents is explained by the physical shredding of rocks during periods of glaciation [27, 28, 29]. It is also assumed that an additional source

of uranium-234 is appeared due to an increase in the area of the drained shelf with a drop in the ocean level during the cold period [30].

From the hypotheses linking the growth of  $^{234}\text{U}$  excess with an increase in the flux of  $^{234}\text{Th}$  recoil nuclei, it follows that the greatest disturbances in the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  equilibrium in ocean water should be observed during glacial epochs. A generalization of data on corals, mollusk shells, and carbonate marine sediments demonstrates a noticeable change in the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio over time, with maximums during warming periods. The minimum of the uranium-234 excess in the ocean was observed during the last glaciation, which contradicts the hypothesis that the increase in the  $^{234}\text{U}$  excess with an increase in the flux of  $^{234}\text{Th}$  recoil nuclei. The distribution of the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio in time for oceanic chemo- and organogenic formations is much better explained by the hypothesis linking the increase in the uranium-234 flux with the permafrost melting. In the Eemian interglacial, which was somewhat warmer than the present, the excess of uranium-234 was slightly higher than the present, apparently due to the greater degree of permafrost thawing. For the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  distribution curve in time, a fine structure is revealed, when small increases in the ratio correspond to periods of temporary warming within the epoch of the last ice age.

Following  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  disequilibrium, the corresponding anomalies should also should be found in the isotopic composition of thorium ( $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ). Considering the time required to achieve radioactive equilibrium in the chain "...  $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \dots$ ", the anomalies in the  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ratio arising under the influence of climatic variations could be traced much farther into the past than only in the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio. For example, in the Norwegian Sea, the Holocene, Eemian and previous warming (MIS-1, MIS-5 and MIS-7, respectively) stand out unambiguously due to the increase in the excess of thorium-230 and depletion of the oxygen isotopic composition of carbonates.

Lake Baikal is the largest reservoir of fresh water and is located in a geographic zone where the temperature state of rocks in the Late Pleistocene and Holocene was changed significantly [76]. Both insular and continuous permafrost are present in the lake's catchment area. The modern warming and thawing of permafrost characteristic of the region [77] affects the volume and chemical composition of river runoff [78]. In the bottom sediments of Lake Baikal, a number of geochemical, mineral and biological systems react to climatic variations [79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106]. During periods of warming, the concentration of diatom shells sharply increases, in cold periods, as also the flow of clay material and the terrigenous uranium flux. The enrichment in uranium-234 significantly decreases in cold periods and increases in warm ones. Note that a decrease in the excess of uranium-234 during cold periods with a simultaneous increase in the flow of clays into the lake contradicts the hypothesis of direct input of  $^{234}\text{Th}$  into water, as the main source of imbalance in the  $^{238}\text{U}$  system [8, 9, 107, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Similar variations in isotope-geochemical and biogenic parameters were found in bottom sediments of a number of small lakes in northern and northwestern Mongolia, for example, Lake Hovsgol Nuur [108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117]. In [118], the bottom sediments of the lakes of the Baikal region were studied. The highest enrichment in uranium-234 was found in lakes Tsagan-Tyrm (the saltiest



$^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.7$  — hereinafter, on average), Melkoye ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.6$ ) and Ordynskoye ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.3$ ); and the smaller one is in lakes Holbo-Nur ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.9$ ), Namshi-Nur (the least mineralized  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.8$ ), Alaty ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.7$ ) There is a correlation between an increase in the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio and water salinity in the lake, which can be explained by the accelerated degradation of permafrost upon contact with salt water.

Network of tributaries is the source of uranium in the bottom sediments of Lake Baikal. Currently, in the lower reaches of the river. Selenga river has  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 2.08\text{--}2.13$  (average 2.11), in the river Upper Angara  $1.34 \pm 0.02$  [82] and  $1.40 \pm 0.15$  [88]; in the river Barguzin -  $1.53 \pm 0.03$  [82] and  $1.56 \pm 0.14$  [88]. For Selenga river were found seasonal variations of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  [82; 119], as well as a decrease in this ratio from the river head to mouth (Fig. 4). There is a stable difference between the southern and northern sectors of the Baikal catchment area with an increase in the excess of uranium-234 in the south — in the zone of the most intense modern permafrost degradation.

In the World Ocean, the most significant enrichments in uranium-234 and thorium-230 are recorded for the northern and inland seas during warming climate periods. The  $^{234}\text{U}$  enrichment is increase, when the sea is more isolated from the general oceanic circulation, when the greater the relative length of the coastline and the contribution of continental waters to the chemical balance of the water budget. In the bottom sediments of the Baikal Lake during periods of cooling, the isotopic composition of uranium approaches the equilibrium values of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ , and during periods of warming, the excess of uranium-234 increases, even more significantly than in the oceanic reservoir. In the tributaries of the Lake Baikal and small lakes, an increase in excess of uranium-234 is noted from north to south, in accordance with a decrease in the proportion of the area occupied by permafrost.

Since the source of excess uranium-234 in the ocean and large lakes is runoff from the continents, the appearance of anomalously increased  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratios indicates permafrost melting. The revealed effect is consistent with the hypothesis, according to which the accumulation of  $^{234}\text{U}$  in the minerals occurs during periods of cooling of frozen rocks. In the course of permafrost degradation and ice melting, the flow of uranium-234 from the host rocks and sediments into the melt water increases significantly due to its significantly greater mobility as compared to uranium-238.

## References

1. Chalov P.I. Issledovanie otnoshenij U(II)/U(I) v nekotoryh prirodnyh ob#ektah. Diss. ... kand. tehn. nauk. Alma-Ata, 1954. 155 p. (in Russian)
2. Chalov P.I. Izotopnoe otnoshenie U234/U238 v nekotoryh vtorichnyh mineralah // Geohimija. 1959. № 2. hh. 165–170. (in Russian)
3. Chalov P.I. Izotopnoe frakcionirovanie prirodnogo urana. Frunze: Ilim, 1975. 204 p. (in Russian)
4. Cherdynceev V.V. Izotopnyj sostav radiojelementov v prirodnyh ob#ektah i ih znachenie v geohronologii. Trudy III sessii Komissii po opredeleniju absoljutnogo vozrasta geologicheskikh formacij. M.: AN SSSR, 1955. hh. 175–233. (in Russian)
5. Cherdynceev V.V. Uran-234. M.: Atomizdat, 1967. 238 p. (in Russian)
6. Poljakov V.A. Izuchenie izmenenij gidrohimii i resursov podzemnyh vod pribrezhnyh vodozaborov v Jestonii po izotopnym dannym. Tezisy vsesojuznoj konferencii po gidrogeologii. Zvenigorod. 1991. pp. 60–62. (in Russian)
7. Arndt, M.F., and West, L. A Study of the factors affecting the gross alpha measurement, and a

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

- radiochemical analysis of some groundwater samples from the state of Wisconsin exhibiting an elevated gross alpha activity. Wisconsin groundwater management practice monitoring project, DNR-176. 2004. 57 p.
8. Calsteren van, Thomas L. Uranium-series dating applications in natural environmental science. *Earth-Sci. Rev.*, 2006, v. 75, p. 155–175.
  9. Cochran J.K. and Krishnaswami S. Radium, thorium, uranium and  $^{210}\text{Pb}$  in deep-sea sediments and sediment pore waters from the north equatorial Pacific. *Am. J. Sci.*, 1980, v. 280, p. 849–889.
  10. Henderson G.M., Burton K.W. Using ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) to assess diffusion rates of isotope tracers in ferromanganese crusts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 170, p. 169–179.
  11. Henderson G.M., Slowey N.C., Haddad G.A. Fluid flow through carbonate platforms: constraints from  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and Cl- in Bahamas pore-waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, v. 169 (1–2), p. 99–111.
  12. Ivanovich M., Harmon R.S. eds. Uranium-series Disequilibrium. 2nd ed. Clarendon Press, Oxford. 1992. xxxiv + 910 p.
  13. Ku T.L. An evaluation of the  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  method as a tool for dating pelagic sediments. *J. Geophys. Res.*, 1965, v. 70 (14), p. 3457–3474.
  14. Ku T.L., Knauss K.G., Mathieu G.G. Uranium in open ocean: Concentration and isotopic composition. *Deep Sea Res. Part II Topical Stud. in Oceanogr.*, 1977, v. 24 (11), 1005–1017.
  15. Russell A.D., Emerson S.R., Nelson B.K., Erez J., and Lea D. Uranium in foraminiferal calcite as a recorder of seawater uranium concentrations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994a, v. 58 (2), p. 671–681.
  16. Russell A.D., Edwards R.L., Hoff J.A., McCorkle D., and Sayles Sediment source of  $^{234}\text{U}$  suggested by  $d^{234}\text{U}$  in North Pacific pore waters. Fall Meeting Supplement. EOS, 1994b, v. 75 (44), p. 332.
  17. Tokarev I.V. Ispol'zovanie izotopnyh dannyh ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) pri izuchenii processov degradacii merzloty v rezul'tate dolgovremennyh variacij klimata // *Zapiski Gornogo instituta*. 2008. T. 176. pp. 191–195. (in Russian)
  18. Tokarev I.V., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Pozdnjakov S.P., Poljakov V.A., Kuznecov V.Ju. Ocenka dolgosrochnoj bezopasnosti zahoronenija radioaktivnyh othodov. 1) Paleorekonstrukcija uslovij formirovanija podzemnyh vod // *Vodnye resursy*. 2009a. T. 36 (2). pp. 219–227. (in Russian)
  19. Tokarev I.V., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Pozdnjakov S.P. Ocenka dolgosrochnoj bezopasnosti zahoronenija radioaktivnyh othodov. 2) Issledovanie vodoobmena v mnogoslojnoj sisteme izotopnymi metodami // *Vodnye resursy*. 2009b. T. 36 (3). S. 363–374.
  20. Tokarev I.V., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ratio in post-permafrost aquifers. In “Uranium in the Environment (Mining Impact and Consequences)”. B.J. Merkel and A. Hasche-Berger eds. Taylor & Francis. 2006, p. 847–856.
  21. Chen J.H., Edwards R.L., and Wasserburg G.J.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  in seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1986, v. 80, p. 241–251.
  22. Henderson G.M., Anderson R.F. The U-series toolbox for paleoceanography. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, v. 52 (1), p. 493–531.
  23. Chabaux F., Riotte J., and Dequincey O. U-Th-Ra fractionations during weathering and river transport. *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, v. 52 (1), p. 533–576.
  24. Dunk R.M., Mills R.A., and Jenkins W.J. A reevaluation of the oceanic uranium budget for the Holocene. *Chem. Geol.*, 2002, v. 190, p. 45–67.
  25. Cheng H., Adkins J.F., Edwards R.L., and Boyle E.A.  $^{230}\text{Th}$  dating of deep-sea corals. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 2000, v. 64 (14), p. 2401–2416.
  26. Robinson L.F., Belshaw N.S., and Henderson G.M. U and Th isotopes in seawater and modern carbonates from the Bahamas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68 (8), p. 1777–1789.
  27. Kronfeld J. Uranium deposition and Th-234 alpha-recoil: an explanation for extreme U-234/U-238 fractionation within the Trinity aquifer. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, v. 21, p. 327–330
  28. Kronfeld J., Gradsztajn E., Müller H.W., Radin J., Yaniv A. and Zach R. Excess  $^{234}\text{U}$ : an aging effect in confined waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, v. 27, p. 342–345.
  29. Kronfeld J., Vogel J.C. Uranium isotopes in surface waters from southern Africa. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 105, p. 191–195.
  30. Esat T.M., Yokoyama Y. Correlated Uranium and Sea-Level Fluctuations in Late Quaternary Oceans. *Goldschmidt-2000*, September 3<sup>rd</sup>–8<sup>th</sup>, 2000. Oxford, UK. *J. Conf. Abstr.*, 2000, v. 5 (2), p. 387–388.
  31. Muhs D.R. The geologic records of dust in the Quaternary. *Aeolian Res.*, 2013, v. 9, p. 3–48.

32. Rea D.K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind. *Rev. Geoph.*, 1994, v. 32 (2), p. 159–195.
33. Anderson R.F., Cheng H., Edwards R.L., Fleisher M.Q., Hayes C.T., Huang K.-F., Kadko D., Lam P.J., Landing W.M., Lao Y., Lu Y., Measures C.I., Moran S.B., Morton P.L., Ohnemus D.C., Robinson L.F. and Shelley R.U. How well can we quantify dust deposition to the ocean? *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2016, v. 374, 20150285.
34. Broecker W.S., Kaufman A., Trier R.M. The residence time of thorium in surface sea water and its implications regarding the rate of reactive pollutants. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, v. 20 (1), p. 35–44.
35. Moore W.S. The thorium isotope content of ocean water. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1981, v. 53 (3), p. 419–426.
36. Bar-Matthews M., Wasserburg G.J., and Chen J.H. Diagenesis of fossil coral skeletons: Correlation between trace elements, textures, and  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, 257–276.
37. Thompson W.G., Curran H.A., Wilson M.A. and White B. Sea-level oscillations during the last interglacial highstand recorded by Bahamas corals. *Nature Geosci. Lett.* Published online: 11 September 2011. DOI: 10.1038/ngeo1253.
38. Bard E., Fairbanks R.G., Hamelin B., Zindler A. and Hoang C.T. Uranium-234 anomalies in corals older than 150,000 years. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 2385–2390.
39. Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 1990, v. 346, p. 456–458.
40. Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G. and Rougerie F. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 1996, v. 382, p. 241–244.
41. Cabioch G. and Ayliffe L.K. Raised coral terraces at Malakula, Vanuatu, Southwest Pacific, indicate high sea level during Marine Isotope Stage 3. *Quat. Res.*, 2001, v. 56, p. 357–365.
42. Chappell J., Omura A., Esat T., McCulloch M., Pandolfi J., Ota Y. and Pillans B. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 141, p. 227–236.
43. Copard K., Colin C., Henderson G.M., Scholten J., Douville E., Sicre M.-A., Frank N. Late Holocene intermediate water variability in the northeastern Atlantic as recorded by deep-sea corals. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2012, v. 313–314, p. 34–44.
44. Chutcharavan P.M., Dutton A., Ellwood M.J. Seawater  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  recorded by modern and fossil corals. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 2018, v. 224 (1), p. 1–17.
45. Cutler K.B., Edwards L.R., Taylor F.W., Cheng H., Adkins J., Gallup C.D., Cutler P.M., Burr G.S. and Bloom A.L. Rapid sea-level fall and deep-ocean temperature change since the last interglacial period. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 206, p. 253–271.
46. Cutler K.B., Gray S.C., Burr G.S., Edwards R.L., Taylor F.W., Cabioch G., Beck J.W., Cheng H. and Moore J. Radiocarbon calibration and comparison to 50 Kyr BP with paired  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}$  dating of corals from Vanuatu and Papua New Guinea. *Radiocarbon*, 2004, v. 46, p. 1127–1160.
47. Dia A.N., Cohen A.S., O’Nions R.K. and Shackleton N.J. Seawater Sr isotope variation over the past 300 kyr and influence of global climate cycles. *Nature*, 1992, v. 356, p. 786–788.
48. Douarin M., Elliot M., Noble S.R., Sinclair D., Henry L.-A., Long D., Moreton S.G., Roberts J.M. Growth of north-east Atlantic cold-water coral reefs and mounds during the Holocene: A high resolution U-series and  $^{14}\text{C}$  chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, v. 375, p. 176–187.
49. Dutton A., Webster J.M., Zwart D., Lambeck K., Wohlfarth B. Tropical tales of polar ice: evidence of Last Interglacial polar ice sheet retreat recorded by fossil reefs of the granitic Seychelles islands. *Quat. Sci. Rev.* 2015, v. 107 (1), p. 182–196.
50. Dutton A., Rubin K., McLean N., Bowring J., Bard E., Edwards R.L., Henderson G.M., Reid M.R., Richards D.A., Sims K.W.W., Walker J.D., Yokoyama Y. Data reporting standards for publication of U-series data for geochronology and timescale assessment in the earth sciences. *Quat. Geochr.*, 2017, v. 39, p. 142–149.
51. Eisele M.H. The long-term development of cold-water coral mounds in the NE-Atlantic. *Diss. zur Erlangung des akadem. Grades eines Doktors der Naturwiss.* Bremen. 2010, 115 p.
52. Eisenhauer A., Wasserburg G.J., Chen J.H., Bonani G., Collins L.B., Zhu Z.R. and Wyrwoll K.H. Holocene sea-level determination relative to the Australian continent: U/Th(TIMS) and  $^{14}\text{C}$ (AMS) dating of coral cores from the Abrolhos Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, v. 114, p. 529–547.

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

53. Esat T.M., McCulloch M.T., Chappell J., Pillans B. and Omura A. Rapid fluctuations in sea level recorded at Huon Peninsula during the Penultimate Deglaciation. *Science*, 1999, v. 283, p. 197–201.
54. Esat T.M., Yokoyama Y. Variability in the uranium isotopic composition of the oceans over glacial-interglacial timescales. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, v. 70, p. 4140–4150.
55. Hamelin B., Bard E., Zindler A. and Fairbanks R.G.  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  mass spectrometry of corals: How accurate is the U-Th age of the last interglacial period? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, v. 106, p. 169–180.
56. Gallup C.D., Edwards R.L. and Johnson R.G. The timing of high sea levels over the past 200,000 years. *Science*, 1994, v. 263, p. 796–800.
57. Gutjahr M., Vance D., Hoffmann D.L., Hillenbrand C.-D., Foster G.L., Rae J.W.B., Kuhn G. Structural limitations in deriving accurate U-series ages from calcitic cold-water corals contrasts with robust coral radiocarbon and Mg/Ca systematics. *Chem. Geol.*, 2013, v. 355, p. 69–87.
58. López Correa M., Montagna P., Joseph N., Rüggeberg A., Fietzke J., Flögel S., Dorschel B., Goldstein S.L., Wheeler A., Freiwald A. Preboreal onset of cold-water coral growth beyond the Arctic Circle revealed by coupled radiocarbon and U-series dating and neodymium isotopes. *Quat. Sci. Rev.*, 2012, v. 34, p. 24–43.
59. Ludwig K.R., Szabo B.J., Moore J.G. and Simmons K.R. Crustal subsidence rate off Hawaii determined from  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  ages of drowned coral reefs. *Geology*, 1991, v. 19, p. 171–174.
60. Ludwig K.R., Muhs D.R., Simmons K.R., Halley R.B. and Shinn E.A. Sea-level records at ~80 ka from tectonically stable platforms: Florida and Bermuda. *Geology*, 1996, v. 24 (3), p. 211–214.
61. Muhs D.R., Szabo B.J. New uranium-series ages of the Waimanalo Limestone, Oahu, Hawaii: Implications for sea level during the last interglacial period. *Marine Geol.* 1994, v. 118 (3–4), p. 315–326.
62. Potter E.-K., Esat T.M., Schellmann G., Radtke U., Lambeck K., McCulloch M.T. Suborbital-period sea-level oscillations during marine isotope substages 5a and 5c. *Earth and Planetary Sci. Lett.* 2004, v. 225 (1–2), p. 191–204.
63. Potter E.-K., Stirling C.H., Wiechert U.H., Halliday A.N., Spötl C. Uranium-series dating of corals in situ using laser-ablation MC-ICP MS. *Int. J. Mass Spectrometry*, 2005, v. 240, p. 27–35.
64. Roberts G.P., Houghton S.L., Underwood C., Papanikolaou I., van Calsteren P., Wigley T., Cooper F.J. & McArthur J.M. Localization of Quaternary slip rates in an active rift in 105 years: An example from central Greece constrained by U-234–Th-230 coral dates from uplifted paleoshorelines. *J. Geoph. Res.*, 2009, v. 114, B1046.
65. Shaked Y., Agnon A., Lazar B., Marco S., Avner U. and Stein M. Large earthquakes kill coral reefs at the north-west Gulf of Aqaba. *Terra Nova*, 2004, v. 16, p. 133–138.
66. Shen C.-C., Li K.-S., Sieh K., Natawidjaja D., Cheng H., Wang X., Edwards R.L., Lam D.D., Hsieh Y.-T., Fan T.-Y., Meltzner A.J., Taylor F.W., Quinn T.M., Chiang H.-W., Kilbourne K.H. Variation of initial  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  and limits of high precision U-Th dating of shallow-water corals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, v. 72, p. 4201–4223.
67. Stein M., Wasserburg G.J., Aharon P., Chen J.H., Zhu Z.R., Bloom A. and Chappell J. TIMS U-series dating and stable isotopes of the last interglacial event in Papua New Guinea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, v. 57, p. 2541–2554.
68. Stirling C.H., Esat T.M., Lambeck K. and McCulloch M.T. Timing and duration of the Last Interglacial: evidence for a restricted interval of widespread coral growth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1998, v. 160, p. 745–762.
69. Thomas A.L., Fujita K., Iryu Y., Bard E., Cabioch G., Camoin G., Cole J.E., Deschamps P., Durand N., Hamelin B., Heindel K., Henderson G.M., Mason A.J., Matsuda H., Ménabréaz L., Omori A., Quinn T., Sakai S., Sato T., Sugihara K., Takahashi Y., Thouveny N., Tudhope A.W., Webster J., Westphal H., Yokoyama Y. Assessing subsidence rates and paleo water-depths for Tahiti reefs using U-Th chronology of altered corals. *Marine Geol.*, 2012, v. 295–298, p. 86–94.
70. Thompson W.G., Spiegelman M.W., Goldstein S.L. and Speed R.C. An open-system model for U-series age determinations of fossil corals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 210 (1–2), p. 365–381.
71. Yokoyama Y., Esat T.M. Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in the surface seawater recorded in corals. In *Global Environmental Change in the Ocean and on Land* Eds. M. Shiyomi H. Kawahata, H. Koizumi, A. Tsuda and Y. Awaya. TERRAPUB, Tokyo. 2004, p. 279–309.
72. Yokoyama Y., Esat T.M. and Lambeck K. Coupled climate and sea-level changes deduced from Huon Peninsula coral terraces of the Last Ice Age. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 193, p. 579–587.

73. Spratt R.M. and Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack. *Clim. Past.*, 2016, v. 12, p. 1079–1092.
74. Zykov S.B., Kiselev G.P., Zyкова E.N. Novye dannye ob uran-izotopnom sostave vod Barenceva morja. Tezisy. Radioaktivnost' i radioaktivnye jelementy v srede obitanija cheloveka. Tomsk, 2013. pp. 214–217. (in Russian)
75. Scholten J.C., Botz R., Paetsch H., Stoffers P. and Weinelt M. High-resolution uranium-series dating of Norwegian-Greenland Sea sediments: 230Th vs.  $\delta^{18}O$  stratigraphy. *Marine Geol.*, 1994, v. 121 (1–2), p. 77–85.
76. Bezrukova E.V. Paleogeografija Pribajkal'ja v pozdnelednikov'e i golocene. Novosibirsk: Nauka, 1999. 129 s.
77. Biskaborn B.K. and 48 authors. Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Communications*, 2019, v. 264 (10). 12 p.
78. Afanas'ev A.H. Vodnye resursy i vodnyj balans oz. Bajkal. Novosibirsk: Nauka, 1976. 238 p. (in Russian)
79. Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Kuz'min M.I., Vil'jame D.F., Gvozdkov A.N., Kerber E.V. Oledeneniya i mezhlednikov'ja Sibiri – paleoklimaticheskaja zapis' iz ozera Bajkal i ee korreljacija s zapadno-sibirskoj stratigrafiej (jepoha prjamoj poljarnosti Brjunes) // *Geologija i geofizika*. 2001. T. 42 (12). pp. 48–63. (in Russian)
80. Kuz'min M.I., Bychinskij V.A., Kerber E.V., Oshhepkova A.V., Goregljad A.V., Ivanov E.V. Himicheskij sostav osadkov glubokovodnyh bajkal'skih skvazhin kak osnova rekonstrukcii izmenenij klimata i okruzhajushhej srede // *Geologija i geofizika*. 2014. T. 55 (1). pp. 3–22. (in Russian)
81. Colpovckaja V.N., Colotchina Je.P., Zhdanova A.N. Kolichestvennyj analiz neglignictyx minepalov donnyx ocadkov ozep Bajkal i Xubcugul metodom IK-cpektropkopii (v cvjazi c paleoklimaticheskimi pekonctpukcijami) // *Geologija i geofizika*. 2006. T. 47 (6). pp. 778–788. (in Russian)
82. Chebykin E.P. Mass-spektrometricheskoe jekspress-opredelenie jelementov i prirodnyh izotopov urana i torija v osadkah oz. Bajkal dlja ih datirovanija i rasshifrovki parametrov paleoklimatov. Diss. ... kand. him. nauk. Limnologicheskij in-t SO RAN. Irkutsk. 2006, 133 p. (in Russian)
83. Chebykin E.P., Gol'dberg E.L., Kulikova N.S. Jelementnyj sostav vzveshennogo veshhestva poverhnostnyh vod ozera Bajkal v zone vlijanija reki Selenga // *Geologija i geofizika*. 2010. T. 51 (10). pp. 1443–1451. (in Russian)
84. Carter S.J. and Colman S.M. Biogenic silica in Lake Baikal sediments: Results from 1990–1992 american cores. *J. Great Lakes Res.*, 1994, v. 20 (4), p. 751–760.
85. Chebykin E.R., Edgington D.N., Grachev M.A., Zheleznyakova T.O., Vorobyova S.S., Kulikova N.S., Azarova I.N., Khlystov O.M., Goldberg E.L. Abrupt increase in precipitation and weathering of soils in East Siberia coincident with the end of the last glaciation (15 cal kyr BP). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 200 (2), p. 167–175.
86. Colman S.M., Jones G.A., Rubin M., King J.W., Peck J.A. and Orem W.H. AMS radiocarbon analyses from Lake Baikal, Siberia: challenges of dating sediments from a large, oligotrophic lake. *Quat. Sci. Rev.*, 1996, v. 15, p. 669–684.
87. Demory F., Oberhänsli H., Nowaczyk N. R., Gottschalk M., Wirth R., Naumann R. Detrital input and early diagenesis in sediments from Lake Baikal revealed by rock magnetism. *Glob. Planet. Change*, 2005, v. 46 (1–4), p. 145–166.
88. Edgington D.N., Robbins J.A., Colman S.M., Orlandini K.A., Gustin M.P. Uranium-series disequilibrium, sedimentation, diatom frustules, and paleoclimate change in Lake Baikal. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 142, p. 29–42.
89. Fagel N., Thamó-Bózsó E., Heim B. Mineralogical signatures of Lake Baikal sediments: Sources of sediment supplies through Late Quaternary. *Sedimentary Geol.*, 2007, v. 194, p. 37–59.
90. Goldberg E.L., Phedorin M.A., Grachev M.A., Bobrov V.A., Dolbnya I.P., Khlystov O.M., Levina O.V., Ziborova G.A. Geochemical signals of orbital forcing in the records of paleoclimates found in the sediments of Lake Baikal. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.*, 2000, v. 448 (12), p. 384–393.
91. Goldberg E.L., Grachev M.A., Chebykin E.P., Phedorin M.A., Kalugin I.A., Khlystov O.M., Zolotarev K.V. Scanning SRXF analysis and isotopes of uranium series from bottom sediments of Siberian lakes for high-resolution climate reconstructions. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.*, 2005, v. 543 (1), p. 250–254.
92. Goldberg E.L., Chebykin E.P., Zhuchenko N.A., Vorobyeva S.S., Stepanova O.G., Khlystov O.M., Ivanov E.V., Weinberg E., Gvozdkov A.N. Uranium isotopes as proxies of the environmental history of

НЕРАВНОВЕСНЫЙ УРАН ( $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$ — $^{230}\text{Th}$ ) КАК ИНДИКАТОР  
ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ. КРУПНЫЕ ВОДОЕМЫ

---

- the Lake Baikal watershed (East Siberia) during the past 150 ka. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, v. 294, p. 16–29.
93. Grachev M.A., Vorobyova S.S., Likhoshway E.V., Goldberg E.L., Ziborova G.A., Levina O.V., Khlystov O.M. A high resolution diatom record of the palaeoclimates of East Siberia for the last 2.5 my from Lake Baikal. *Quat. Sci. Rev.*, 1998, v. 17, p. 1101–1106.
  94. Horiuchi K., Minoura K., Hoshino K., Oda V., Nakamura T., Kawai T. Palaeoenvironmental history of Lake Baikal during the last 23000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, v. 157, p. 95–108.
  95. Kashiwaya K. ed. Long continental records from Lake Baikal. Springer-Verlag. Tokyo. Japan. 2003. 364 p.
  96. Khursevich G.K., Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Williams D.F., Kuzmin M.I., Fedenya S.A., Gvozdokov A.A. Insolation regime in Siberia as a major factor controlling diatom production in Lake Baikal during the past 800,000 years. *Quat. Int.*, 2001, v. 80–81, p. 47–58.
  97. Kuzmin M.I., Karabanov E.B., Kawai T., Williams D., Bychinsky V.A., Kerber E.V., Kravchinsky V.A., Bezrukova E.V., Prokopenko A.A., Geletti V.F., Kalmychkov G.V., Goreglyad A.V., Antipin V.S., Khomutova M.Yu., Soshina N.M., Ivanov E.V., Khursevich G.K., Tkachenko L.L., Solotchina E.P., Ioshida N., Gvozdokov A.N. Deep drilling on Lake Baikal: main results. *Russ. Geol. and Geoph.*, 2001, v. 42 (1), p. 3–28.
  98. Morgenstern U., Ditchburn R.G., Vologina E.G., Sturm M.  $^{32}\text{Si}$  dating of sediments from Lake Baikal. *J. Paleolimn.*, 2013, v. 50, p. 345–352.
  99. Och L.M., Müller B., Wichser A., Ulrich A., Vologina E.G., Sturm M. Rare earth elements in the sediments of Lake Baikal. *Chem. Geol.*, 2014, v. 376, p. 61–75.
  100. Prokopenko A.A., Karabanov E.B., Williams D.F., Kuzmin M.I., Shackleton N.J., Crowhurst S.J., Peck J.A., Gvozdokov A.N., King J.W. Biogenic Silica Record of the Lake Baikal Response to Climatic Forcing during the Brunhes. *Quat. Res.*, 2001, v. 55, p. 123–132.
  101. Shchetnikov A.A., Bezrukova E.V., Maksimov F.E., Kuznetsov V.Yu., Filinov I.A. Environmental and climate reconstructions of the Fore-Baikal area during MIS 5-1: Multiproxy record from terrestrial sediments of the Ust-Oda section (Siberia, Russia). *J. Asian Earth Sci.*, 2016, v. 129, p. 220–230.
  102. Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Och L., Pastukhov M.V., Zagorulko N.S. Rare Earth Elements in Tributaries of Lake Baikal. *App. Geochemistry*, 2017, v. 82, p. 164–176.
  103. Sturm M., Vologina E.G., Vorob'eva S.S. Holocene and Late Glacial sedimentation near steep slopes in southern Lake Baikal. *J. Limn.*, 2016, v. 75 (1) p. 24–35.
  104. Tarasov P., Bezrukova E., Karabanov E., Nakagawa T., Wagner M., Kulagina N., Letunova P., Abzaeva A., Granoszewski W., Riedel F. Vegetation and climate dynamics during the Holocene and Eemian interglacials derived from Lake Baikal pollen records. *Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, v. 252, p. 440–457.
  105. Tyszkowski S., Kaczmarek H., Słowiński M., Kozyreva E., Brykała D., Rybchenko A., Babicheva V.A. Geology, permafrost, and lake level changes as factors initiating landslides on Olkhon Island (Lake Baikal, Siberia). *Landslides*, 2015, v. 12 (3), p. 573–583.
  106. Watanabe T., Nakamura T., Nara F.W., Kakegawa T., Horiuchi K., Senda R., Oda T., Nishimura M., Matsumoto G.I. High-time resolution AMS  $^{14}\text{C}$  data sets for Lake Baikal and Lake Hovsgol sediment cores: changes in radiocarbon age and sedimentation rates during the transition from the last glacial to the Holocene. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 12–20.
  107. Fleisher R.L., Raabe O.G. Recoiling alpha-emitting nuclei. Mechanisms for uranium-series disequilibrium. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1978, v. 42 (7), p. 973–978.
  108. Hovsgol Drilling Project (HDP) Members Sedimentary record from Lake Hovsgol, NW Mongolia: results from the HDP-04 and HDP-06 drill cores. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 21–37.
  109. Katsuta N., Matsumoto G.I., Tani Y., Tani E., Murakami T., Kawakami S., Nakamura T., Takano M., Matsumoto E., Abe O., Morimoto M., Okuda T., Krivonogov S.K., Kawai T. A higher moisture level in the early Holocene in northern Mongolia as evidenced from sediment records of Lake Hovsgol and Lake Erhel. *Quat. Int.*, 2017, v. 455, p. 70–81.
  110. Kim B., Cheong D., Lee E. Paleoenvironmental changes in northern Mongolia during the last deglaciation revealed by trace element records in ostracods from Lake Hovsgol. *Quat. Int.*, 2015, v. 384, p. 169–179.

111. Mochizukia A., Murata T., Hosoda K., Katano T., Tanaka Y., Mimura T., Mitamura O., Nakano S., Okazaki Y., Sugiyama Y., Satoh Y., Watanabe Y., Dulmaa A., Ayushsuren C., Ganchimeg D., Drucker V.V., Fialkov V.A., Sugiyama M. Distributions and geochemical behaviors of oxyanion-forming trace elements and uranium in the Hövsgöl–Baikal–Yenisei water system of Mongolia and Russia. *J. Geochem. Exploration*, 2018, v. 188, p. 123–136.
112. Orkhonselenge A., Krivonogov S.K., Mino K., Kashiwaya K., Safonova I.Y., Yamamoto M., Kashima K., Nakamura T., Kim J.Y. Holocene sedimentary records from Lake Borsog at the eastern shore of Lake Hovsgol, Mongolia, and their paleoenvironmental implications. *Quat. Int.*, 2013, v. 290–291, p. 95–109.
113. Oyunchimeg T., Chebykin E.P. High-Performance Technique on the Base of ICP-MS for Obtaining High-Resolution Records of Climate-Sensitive Elements in Bottom Sediments of Lake Hovsgol (Mongolia) // *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2009. T. 17. S 97–110.
114. Prokopenko A.A., Khursevich G.K., Bezrukova E.V., Kuzmin M.I., Boes X., Williams D.F., Fedenya S.A., Kulagina N.V., Letunova P.P., Abzaeva A.A. Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed. *Quat. Res.*, 2007, v. 68, p. 2–17.
115. Solotchina E.P., Prokopenko A.A., Kuzmin M.I., Solotchin P.A., Zhdanova A.N. Climate signals in sediment mineralogy of Lake Baikal and Lake Hovsgol during the LGM-Holocene transition and the 1-Ma carbonate record from the HDP-04 drill core. *Quat. Int.*, 2009, v. 205, p. 38–52.
116. Watanabe T., Minoura K., Nara F.W., Shichi K., Horiuchi K., Kakegawa T., Kawai T. Last glacial to post glacial climate changes in continental Asia inferred from multi-proxy records (geochemistry, clay mineralogy, and paleontology) from Lake Hovsgol, northwest Mongolia. *Glob. Planet. Change*, 2012, v. 88–89, p. 53–63.
117. Zhang C., Zhang W., Feng Z., Mischke S., Gao X., Gao D., Sun F. Holocene hydrological and climatic change on the northern Mongolian Plateau based on multi-proxy records from Lake Gun Nuur. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, v. 323–325, p. 75–86.
118. Vosel' Ju.S. Geohimija urana v sovremennyh karbonatnyh otlozhenijah malyh ozer (formy nahozhdenija i izotopnye otnoshenija  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ). Diss. ... kand. geol.-min. nauk. Novosibirsk: In-t geologii i mineralologii im. V.S. Soboleva SO RAN. 2015. 128 p. (in Russian)
119. Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Hodzher T.V., Grachev M.A. Sovremennoe sostojanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym jelementam // *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2012. T. 20. pp. 613–631. (in Russian)
120. Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Il'jasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornjakov S.A., Seminskij A.K., Snopkov S.V., Chechel'nickij V.V., Gileva N.A. Razrabotka Kultuuskogo sejsmoprognosticheskogo poligona: variacii ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) i  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  v podzemnyh vodah iz aktivnyh razlomov zapadnogo poberezh'ja Bajkala // *Geodinamika i tektonofizika*. 2015. T. 6 (4). pp. 519–553. (in Russian)

*Поступила в редакцию 05.09.2020 г.*