

УДК 550.42

ВАРИАЦИИ ИЗОТОПНОГО ОТНОШЕНИЯ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ В МЕТАОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ И СВИДЕТЕЛЬСТВО ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В НЕОПРОТЕРОЗОЕ В ЭДИАКАРСКОЕ ВРЕМЯ

А. В. Чугаев^{1,*}, академик РАН И. В. Чернышев¹, А. Е. Будяк²,
Г. В. Манджиева¹, А. С. Садасюк¹, Б. И. Гареев³

Поступило 11.05.2018 г.

Изотопный состав U — новый геохимический индикатор, позволяющий реконструировать окислительно-восстановительные условия протекания геологических процессов. Рассмотрены полученные с помощью метода MC—ICP—MS и двойного трасера ^{236}U — ^{233}U результаты изучения изотопного отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в неопротерозойских метасадочных породах Байкало-Патомского складчатого пояса (Северное Забайкалье). По своему масштабу обнаруженные вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ($\delta^{238}\text{U}$ от $-0,37$ до $-0,11$ ‰) не выходят за пределы диапазона (от $-0,39$ до $+0,15$ ‰), характерного для метасадочных терригенных пород морского происхождения. По величинам $\delta^{238}\text{U}$ уран изученных пород Байкало-Патомского пояса (БПП) тяжелее U морской воды ($\delta^{238}\text{U} -0,41 \pm 0,03$ ‰). Наблюдается корреляция между величиной $\delta^{238}\text{U}$ в породах и их положением в стратиграфическом разрезе. Вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в терригенно-карбонатных толщах БПП указывают на изменение условий осадконакопления и возникновение анаэробной (euxinic) обстановки в процессе эволюции палеобассейна в позднеэдиакарское время.

Ключевые слова: $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ -изотопное отношение, MC—ICP—MS-метод, эдиакарский период, метасадочные породы, окислительно-восстановительные условия.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524844472-477>

Одна из ключевых задач в исследовании процессов осадконакопления различных геологических эпох — реконструкция физико-химических палеообстановок, при которых они протекали. Существенный вклад в понимание этого вопроса [7—9] вносит изучение вариаций изотопного состава U: $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в осадочных породах. Вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в различных природных объектах начали изучать немногим более 10 лет назад [10]. В качестве основной причины их возникновения сейчас признают процесс редукции $\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$, который сопровождается фракционированием ^{238}U , ^{235}U [11, 12]. При этом восстановленный U обогащается тяжёлым изотопом ^{238}U . Таким образом, $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ — чувствительный геохимический

индикатор, отражающий изменение окислительно-восстановительных условий в осадочных палеобассейнах. В свою очередь, изучение вариаций изотопного состава U осадочных пород даёт возможность оценить вклад Мирового океана как одного из глобальных геохимических резервуаров в общий масштаб природных вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в геологических объектах Земли. В нашей работе представлены результаты изучения вариаций изотопного состава U в неопротерозойских метасадочных породах Байкало-Патомского пояса (БПП) — Северное Забайкалье.

Геологическое строение БПП — одного из крупных структурных элементов Восточно-Забайкальского сегмента Центрально-Азиатского орогенного пояса, рассмотрено в целом ряде работ [1]. В пределах БПП присутствуют выступы раннедокембрийского фундамента (Чуйско-Тонодско-Нечерская цепочка блоков) и палеорифты, поднятия, эпикратонные прогибы, сложенные преимущественно неопротерозойскими и раннепалеозойскими осадочными комплексами (рис. 1). В БПП выделяют три крупные структурно-фациальные зоны: Прибайкальскую, Патомскую, Бодайбинскую [2].

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

² Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

* E-mail: chug@igem.ru, vassachav@mail.ru

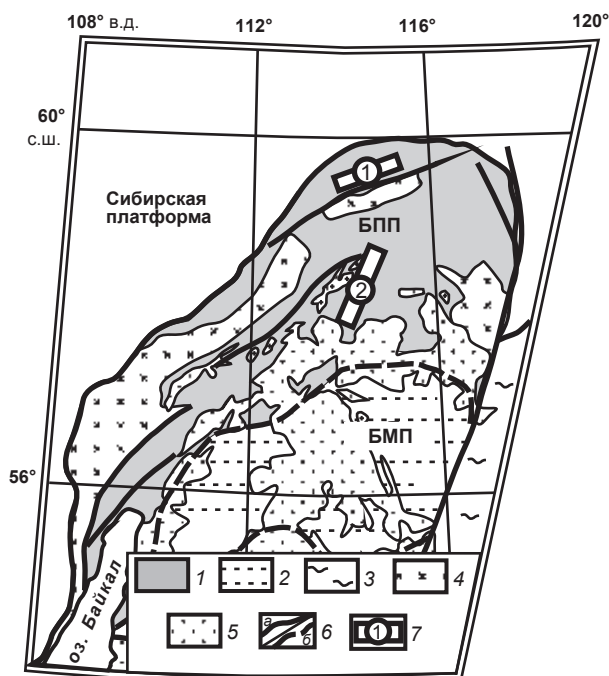


Рис. 1. Схема структурного районирования Байкало-Витимского террейна, северная часть Забайкальской складчатой области. Структурные элементы: 1 — БПП; 2 — Байкало-Муйский пояс (БМП); 3 — Алдано-Становой террейн; 4 — выступы раннепротерозойского фундамента в БПП; 5 — палеозойские гранитоиды; 6 — региональные тектонические разломы: а — надвиги, сдвиги, б — межструктурные шовные зоны; 7 — районы опробования неопротерозойских метаосадочных пород: 1 — Патомская зона, 2 — Бодайбинская зона.

Неопротерозойские терригенно-карбонатные породы в этих зонах имеют наибольшее площадное распространение. Породы претерпели полифазный метаморфизм и пластические деформации в раннепалеозойское время. Неопротерозойские отложения представлены нижним патомским комплексом и верхней юдомской (или бодайбинской) серией [2].

Осадочные толщи накапливались в морском палеобассейне на континентальной окраине Сибирского кратона. Заложение палеобассейна связывают с развитием в позднедонийское время окраинно-континентального рифтогенеза, вызванного распадом суперконтинента Родиния.

Изучение изотопного состава U проведено по валовым пробам метаосадочных пород. Применённый метод многоколлекторной масс-спектрометрии с ионизацией вещества в индуктивно связанной плазме (МС-ICP-MS) включал использование двойного изотопного ^{233}U - ^{236}U -трассера [10] для учёта фракционирования изотопов U в процедурах анализа. Химическая часть применённого метода [3] включала

отделение U от других элементов (включая Th) последовательно на трёх хроматографических колонках, соответственно анионите, катионите, специализированной смоле UTEVA. Разложение проб массой 1–1,5 г осуществляли в смеси кислот ($\text{HF} + \text{HNO}_3$) в СВЧ-печи Milestone Ethos Plus. Двойной ^{233}U - ^{236}U -трассер добавляли в пробы непосредственно перед их химическим разложением. Высокоточные измерения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в моноэлементных препаратах U выполняли согласно методике в [4] на масс-спектрометре NEPTUNE PLUS, оснащённом J-интерфейсом. Измерения величины $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в образцах чередовали с его измерениями в стандарте U CRM-112A, для которого значение $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ принимали равным $137,837 \pm 0,015$ [13]. Корректирование всех измеренных величин $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ осуществляли с использованием значения $^{236}\text{U}/^{233}\text{U}$ в трассере: $1,03183 \pm 0,00005$. Точность метода, оцененная по результатам параллельных анализов стандартного образца U IRMM-3184 и образцов горных пород GSP-1, RMG-1 $\pm 0,008\%$ (2SD).

Вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП изучены по 15 образцам, которые преимущественно относятся к терригенным породам — метагравелитам, полевошпатовым метапесчаникам, углеродистым сланцам. Только две пробы представлены известняками. Проанализированные образцы характеризуют отложения всех основных стратиграфических серий Патомской (6 проб) и Бодайбинской (9 проб) зон БПП.

Результаты измерений $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, как это уже общепринято, представлены в табл. 1, на графиках и в тексте в величинах $\delta^{238}\text{U}$ — относительных единицах (‰) отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в образце от такового в стандарте CRM-112A (табл. 1, примечание 2). Диапазон измеренных значений отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, $0,26\%$ (табл. 1), что в три раза превышает аналитическую погрешность метода. При этом по своему масштабу вариации $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в породах разрезов Патомской и Бодайбинской зон весьма близки. Для Патомской зоны $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ от $-0,37$ до $-0,13$, тогда как для пород Бодайбинской зоны — от $-0,31$ до $-0,11\%$.

По диапазону величин $\delta^{238}\text{U}$, лежащих в пределах от $-0,37$ до $-0,11\%$ (при среднем значении $\delta^{238}\text{U} = -0,25 \pm 0,08\%$, SD) неопротерозойские метаосадочные породы БПП близки к раннедокембрийским (~2,5 млрд лет) чёрным сланцам бассейна Хамерсли (Западная Австралия), для которых $\delta^{238}\text{U}$ от $-0,39$ до $-0,02\%$ (при среднем $\delta^{238}\text{U} = -0,24 \pm 0,1\%$) [7]. По величинам $\delta^{238}\text{U}$ U изученных нами пород тяжелее U морской воды ($\delta^{238}\text{U} = -0,41 \pm 0,03\%$) и отвечает области значений современных осадков

($\delta^{238}\text{U} = -0,28 \pm 0,19\%$), формирование которых происходит в открытых морских бассейнах на континентальных склонах в слабо окислительных условиях [12].

Изученная коллекция образцов — разновозрастные осадочные отложения БПП, отличающиеся по своим геохимическим особенностям и условиям формирования [6]. Одна из наиболее варьирующих характеристик для

них — величина параметра $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$, лежащая от $-19,9$ до $-3,0$ (табл. 1). Неоднородность неопротерозойских отложений БПП по величине $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ обусловлена особенностями геотектонической эволюции палеобассейна, в ходе которой происходила смена областей сноса (источников) кластогенного материала. В качестве таких источников рассматриваются раннедокембрийские породы Сибирского кратона и породы

Таблица 1. Результаты измерений $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадочных породах БПП (Северное Забайкалье)

Номер образца	Серия/свита	Порода	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$	$\delta^{238}\text{U}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$
Патомская зона					
Chi-2	Юдомская/ жербинская	Углеродистые полевошпат-кварцевые метапесчаники	137,819	-0,13	-4,3
Chi-1	Жуинская/ никольская	Светло-серый, плитчатый известняк	137,800	-0,27	-8,5
VI-15/1	Дальнетайгинская/ валюхтинская	Углеродистые алевролитистые сланцы кварц-хлорит-серицитового состава	137,795	-0,31	-3,0
Bг-2	Дальнетайгинская/ баракунская	Углеродистые алевролитистые сланцы серицит-полевошпат-кварцевого состава	137,786	-0,37	-18,4
bg-3	Баллаганаская/ бугарихтинская	Углеродистые алевролитистые сланцы хлорит-серицит-плагиоклаз-кварцевого состава	137,790	-0,34	-18,2
ba-6	Баллаганаская/ хайвергинская	Среднезернистый слюдистый метапесчаник	137,794	-0,31	-19,9
Бодайбинская зона					
IL-17	Юдомская/ илигирская	Метаалевролиты тёмно-серые, массивные, однородные	137,804	-0,24	-4,8
BD-Kv-27	Юдомская/ догалдынская	Полимиктовые метапесчаники светло-серые, мелкозернистые, с вкрапленностью пирита	137,822	-0,11	-6,0
BD-Kv-44	Юдомская/ анангрская	Полимиктовые метагравелиты с обломками угловатой формы до 6×4 мм; вкрапленность кристаллов пирита до 5 мм, правильной кубической формы	137,813	-0,18	-8,9
BD-An-120	То же	Метапесчаники светло-серые с крупными кристаллами пирита	137,812	-0,18	-5,7
VCH-16/16	Жуинская/ вачская	Углеродистые алевролитистые сланцы	137,812	-0,18	-9,9
HT-2-05	Дальнетайгинская/ хомолхинская	Углеродистые филлитовые сланцы	137,796	-0,30	-3,3
BD-BJ-66	Дальнетайгинская- бужуихтинская	Углеродсодержащие филлитовые сланцы	137,796	-0,30	-14,9
BD-MP-44	Баллаганаская/ мариинская	Слоистые, плитчатые известняки серые	137,794	-0,31	-12,7
BD-XV-28	Баллаганаская/ хайвергинская	Известковистые сланцы, тонкоплитчатые, мелкозернистые, серые	137,803	-0,25	-17,7

Примечания. 1) Подробная литологическая и геохимическая характеристики пород, координаты мест их отобования, значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ были ранее приведены в [6].

$$2) \delta^{238}\text{U} = \left[\frac{(^{238}\text{U}/^{235}\text{U})_{\text{обр}}}{(^{238}\text{U}/^{235}\text{U})_{\text{ст}}} - 1 \right] \times 1000\%, \text{ где } (^{238}\text{U}/^{235}\text{U})_{\text{ст}} = 137,837 \pm 15 [13].$$

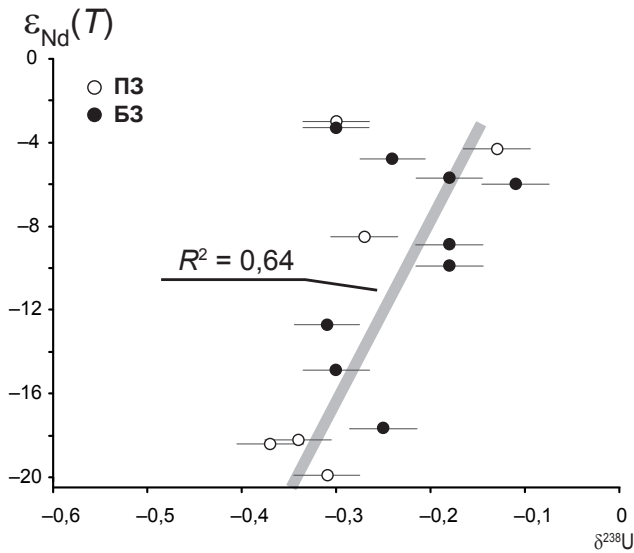


Рис. 2. Корреляция величин $\delta^{238}\text{U}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ в неопротерозойских метаосадочных породах Патомской (ПЗ) и Бодайбинской (БЗ) структурно-фациальных зон БПП (Северное Забайкалье). Масштаб приведённых на графике погрешностей $\delta^{238}\text{U}$ соответствует $\pm SD$.

новообразованной неопротерозойской коры Байкало-Муйского террейна [14, 5]. Сопоставление значений $\delta^{238}\text{U}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ для изученных образцов показало, что, в целом имеется положительная корреляция ($R^2 = 0,64$) между этими параметрами для большей части проб (рис. 2). Только две точки отклоняются от этой закономерности. Они соответствуют пробам углеродистых сланцев, отобранных из верхней части дальнетайгинской серии Патомской и Бодайбинской зон. Для обоих образцов получены сходные значения $\delta^{238}\text{U}$ ($-0,30$ и $-0,31\text{‰}$) и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ ($-3,3$ и $-3,0$). Наличие устойчивой корреляции между величинами параметров $\delta^{238}\text{U}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ может свидетельствовать о том, что возможной причиной вариаций $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в метаосадках БПП являлась исходная неоднородность пород – источников терригенного материала по величине $\delta^{238}\text{U}$. Такое предположение не противоречит известным данным о природных вариациях $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ в различных по составу и происхождению магматических, метаморфических породах, для которых $\delta^{238}\text{U}$ изменяется в относительно широких пределах от $-0,46$ до $-0,02\text{‰}$ [7, 12].

С другой стороны, обнаруживаются и иные зависимости. Прослеживается изменение величины параметра $\delta^{238}\text{U}$ в стратиграфических разрезах ПЗ и БЗ (рис. 3). Эти изменения для обеих зон носят сходный характер. Для наиболее древних отложений баллаганаской, дальнетайгинской серий величина $\delta^{238}\text{U}$ достаточно постоянна, в среднем

$-0,31 \pm 0,04\text{‰}$ (SD). Напротив, систематически более тяжёлый изотопный состав U устанавливается для пород жуинской, юдомской серий. Для них среднее значение $\delta^{238}\text{U} = -0,18 \pm 0,06\text{‰}$ (SD). Следует отметить, что формирование осадочных толщ баллаганаской, дальнетайгинской серий, с одной стороны, и жуинской, юдомской серий, с другой, происходило на разных этапах геотектонической эволюции палеобассейна и при различающихся условиях. Отложения нижних серий ($\sim 750\text{--}580$ млн лет назад) патомского комплекса накапливались в шельфовой зоне в условиях открытого морского бассейна, тогда как образование терригенно-карбонатных пород жуинской, юдомской серий ($580\text{--}540$ млн лет назад) происходило уже в бассейне типа “foreland”. Предполагается, что в позднеэдиакарское время сформировался достаточно изолированный бассейн с застойными условиями и анаэробной обстановкой в зонах осадконакопления [2, 6].

В современных морских бассейнах, для которых характерна слабая циркуляция придонных вод и анаэробная обстановка, аутигенный U новообразованных осадков в большей степени обогащён тяжёлым ^{238}U по сравнению с U , растворённым в морской воде [8]. Преимущественное накопление изотопа ^{238}U в осадках и, как следствие, высокие значения $\delta^{238}\text{U}$ обусловлены фракционированием изотопов ^{238}U , ^{235}U в процессе редукции урана ($\text{U(VI)} \rightarrow \text{U(IV)}$). Учитывая вышесказанное, можно предположить, что утяжеление изотопного состава U в метаосадках жуинской, юдомской серий вызвано анаэробной обстановкой

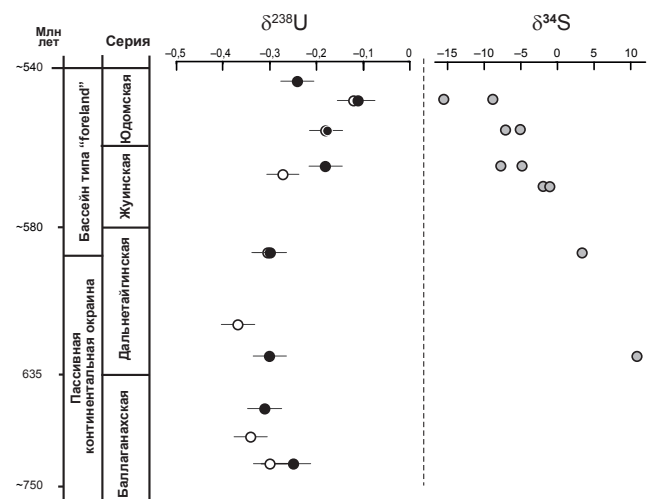


Рис. 3. Изменение величин $\delta^{238}\text{U}$ и $\delta^{34}\text{S}$ в стратиграфическом разрезе неопротерозойских метаосадочных пород БПП. Условные обозначения приведены на рис. 2. Данные $\delta^{34}\text{S}$ из [6]. Погрешность $\delta^{34}\text{S}$ меньше размера символов. Масштаб приведённых на графике погрешностей $\delta^{238}\text{U}$ соответствует $\pm SD$.

в палеобассейне во время их накопления и поступлением аутигенного U в осадки. В пользу такого вывода свидетельствует повышенное содержание в породах жуинской серии органического вещества (в сланцах вачской свиты концентрация $C_{орг}$ до 10 мас.%), а также присутствие в толщах сульфидной минерализации. Изменение условий осадконакопления на границе дальнетайгинской и жуинской серий фиксируется также результатами изучения вариации $\delta^{34}S$ в пиритах пород Бодайбинской зоны [6]. Сера пирита из метаосадков жуинской и юдомской серий отличается существенно более лёгким изотопным составом ($\delta^{34}S$ от $-1,0$ до $-15,5\%$) по сравнению с таковой в пирите нижележащих пород дальнетайгинской серии ($\delta^{34}S$ от $+3,4$ до $+10,9\%$). При этом обнаруживается отрицательная корреляция между величинами $\delta^{238}U$ для пород и $\delta^{34}S$ для пирита из терригенно-карбонатных толщ жуинской, юдомской серий Бодайбинской зоны (рис. 3).

В заключение отметим следующее. Изотопный состав U метаосадочных пород БПП ($\delta^{238}U$ от $-0,37$ до $-0,11\%$) находится в пределах (от $-0,39$ до $+0,15\%$), характерного для древних метаосадочных терригенных пород, формирование которых происходило в морских палеобассейнах [7, 9]. Установлено изменение величины $\delta^{238}U$ в стратиграфическом разрезе терригенно-карбонатных толщ БПП. Породы верхних стратиграфических интервалов (жуинская, юдомская серии) характеризуются систематически более тяжёлым изотопным составом U, что свидетельствует о присутствии в них аутигенного U, образованного за счёт частичной редукции U морской воды. Эти различия $\delta^{238}U$ указывают на изменение ~ 580 млн лет назад окислительно-восстановительных условий в палеобассейне и на возникновение анаэробной обстановки в зонах осадконакопления. По возрасту это событие близко к одному из важных этапов докембрийской эволюции Земли — “Neoproterozoic Oxidation Event”, с которым связывают резкое повышение концентрации химически не связанного кислорода в земной атмосфере и в водах Мирового океана [15]. Данный фактор мог оказать существенное влияние на скорость процессов поверхностного выветривания пород и, соответственно, на объём поступления в океан со стоком речных вод U и других металлов. Как следствие повышения содержания U в морской воде следует предполагать и увеличение доли аутигенного U в формирующихся осадках.

Таким образом, основная причина выявленных вариаций $^{238}U/^{235}U$ в метаосадочных породах

БПП — изменение окислительно-восстановительных условий в осадочном палеобассейне. Возможная исходная неоднородность по изотопному составу U пород — источников кластогенного материала, по-видимому, не вносила значимый вклад в вариации $^{238}U/^{235}U$ в осадочных толщах БПП. В пользу этого свидетельствует близость величин $\delta^{238}U$ отложений дальнетайгинской, баллаганахской серий, для которых, напротив, фиксируются наиболее контрастные значения $\epsilon_{Nd}(T)$ от $-19,9$ до $-3,0$.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках плана исследований по гранту Российского научного фонда № 16–17–10221.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1998. 402 с.
2. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А. и др. // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.
3. Манджиева Г.В., Садасюк А.С., Чернышев И.В. и др. // Масс-спектрометрия. 2018. Т. 15. № 1. С. 12–21.
4. Чернышев И.В., Голубев В.Н., Чугаев А.В., Баранова А. Н. // Геохимия. 2014. № 12. С. 1059–1078.
5. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В. и др. // Геохимия. 2017. № 1. С. 17–25.
6. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В. и др. // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 213–244.
7. Kendall B., Brennecke G.A., Weyer S., Anbar A. D. // Chem. Geol. 2013. V. 362. P. 105–114.
8. Rolison J.M., Stirling C.H., Middag R., Rijkenberg M.J. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2017. V. 203. P. 69–88.
9. Phan T.T., Gardiner J.B., Capo R.C., Stewart B.W. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2018. V. 222. P. 187–211.
10. Stirling C.H., Anderson M.B., Potter E.K., Halliday A.N. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2007. V. 264. P. 208–225.
11. Schauble E.A. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 2170–2189.
12. Weyer S., Anbar A.D., Gerdes A., et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2008. V. 72. Iss. 2. P. 345–359.
13. Richter S., Eykens R., Kühn H., et al. // Int. J. Mass Spectrometry. 2010. V. 295. P. 94–97.
14. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N. // Precamb. Res. 2015. V. 267. № 1. P. 39–71.
15. Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J. // Nature. 2014. V. 506. P. 307–315.

**VARIATIONS OF THE $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ISOTOPE RATIO
IN METASEDIMENTARY ROCKS AND EVIDENCE OF CHANGES
IN SEDIMENTATION CONDITIONS DURING THE EDIACARIAN
PERIOD OF THE NEOPROTEROZOIC**

**A. V. Chugaev, Academician of the RAS I. V. Chernyshev, A. E. Budyak,
G. V. Mandzhieva, A. S. Sadasyuk, B. I. Gareev**

Received May 11, 2018

The isotopic composition of uranium is a new geochemical indicator that facilitates reconstruction of the redox conditions of geological processes. In this paper the results of study of the $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ isotope ratio in the Neoproterozoic metasedimentary rocks of the Baikal–Patom fold belt (Northern Transbaikalia) were obtained using the MC-ICP-MS method and $^{233}\text{U}+^{236}\text{U}$ double spike. The scale of $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio variations ($\delta^{238}\text{U} = -0.37$ to -0.11%) is within the range of (-0.39 to $+0.15\%$), typical of metasedimentary terrigenous rocks of marine origin. In terms of the $\delta^{238}\text{U}$ values, uranium of the BPB rocks studied is heavier than seawater uranium ($\delta^{238}\text{U} = -0.41 \pm 0.03$). There is a correlation between the $\delta^{238}\text{U}$ value in the rocks and their position in the stratigraphic section. Variations of the $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio in the terrigenous-carbonate sequences of BPB indicate that the sedimentation conditions changed and euxinic conditions were established in the course of evolution of the paleobasin in the Late Ediacarian Period.

Keywords: $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ isotopic ratio, MC-ICP-MS method, Ediacarian Period, metasedimentary rocks REDOX condition.