

УДК 550.84

## ПРИРОДА ДРЕВНИХ ЦИРКОНОВ ИЗ ПОРОД СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА И ПОДНЯТИЯ МЕНДЕЛЕЕВА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

**Кременецкий А.А., Громалова Н.А.**

*ФГУП «Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов»,  
Москва, e-mail: imgre@imgre.ru*

Построены графики возрастной вероятности по U-Pb датировкам возраста цирконов из базит-гипербазитовых пород Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Северного Ледовитого океана (СЛО) и выделены однотипные максимумы (100–200; 400–600; 1000–1200; 1500–2000 и более 2500 млн лет). Предполагается, что древние цирконы базит-гипербазитов САХ и СЛО были захвачены мантийными расплавами при контаминации глубинных фрагментов континентальной коры или литосферной мантии. Реконструкция этих источников проводилась по особенностям морфологии и облика цирконов, специфики их внутреннего строения (катодолуминисценция) и трендам распределения в них элементов-примесей. Выявлены различные типы распределения U, Th, HfO<sub>2</sub>, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в исследуемых цирконах и намечены критерии дискриминации их мантийных источников.

**Ключевые слова:** циркон, изотопно-геохимическое изучение, габбро-долериты, песчаники, Срединно-Атлантический хребет, Северный Ледовитый океан

## THE NATURE OF ANCIENT ZIRCONS FROM THE MID-ATLANTIC RIDGE AND MENDELEEV RISE IN THE ARCTIC OCEAN

**Kremenetsky A.A., Gromalova N.A.**

*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Earth Elements,  
Moscow, e-mail: imgre@imgre.ru*

Age probability curves were plotted from U-Pb ages of zircons of basite-ultrabasite rocks of Mid-Atlantic Ridge (MAR) and the Arctic Ocean (AO), and maximums of the same type were distinguished (100–200; 400–600; 1000–1200; 1500–2000 and more than 2500 Ma). Ancient zircons from basite-ultrabasite of MAR and AO were trapped by mantle melts with contamination of deep-fragments of the continental crust or lithosphere mantle. The reconstruction of those sources was conducted on the basis of the morphology features and habitus of zircons, specific features of their inner structure (cathodoluminescence) and trends of trace-elements distribution. Different types of the distribution of U, Th, HfO<sub>2</sub>, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were revealed in the studied zircons and criteria were outlined to distinguish their mantle sources.

**Keywords:** zircon, isotopic and geochemical study, gabbro-dolerite, sandstones, Mid-Atlantic Ridge, Arctic Ocean

В последние годы активное изотопно-геохимическое изучение цирконов из пород океанической коры (базальты, габброиды, абиссальные перидотиты) Срединно-Атлантического хребта (САХ) (рис. 1) показало, что наряду с молодыми цирконами, фиксирующими время излияния базальтов, были выявлены и более древние (PR–AR) цирконы [2, 8–11, 16, 18]. Аналогичные группы молодых и древних цирконов были обнаружены нами [5, 6, 15] в базальтах и габбро-долеритах на поднятии Менделеева в Северном Ледовитом океане (СЛО) (рис. 1). Близкий диапазон молодых и древних возрастов характерен также для цирконов из гранитов, драгированных вблизи Северного полюса [7], а также детритовых цирконов из песчаников и из донных осадков на хребте Ломоносова [12] и на поднятии Менделеева [1, 3]. И, наконец, такой же широкий диапазон значений возраста (K<sub>1</sub>–AR) демонстрируют детритовые цирконы из габбро-долеритов и песчаников, развитых на островах и побережье СЛО [14, 17] (рис. 1).

**Цель** – разработка критериев дискриминации источников (корового, мантийного или корово-мантийного) древних цирконов из основных магматических пород САХ и СЛО.

### Материалы и методы исследования

Цирконы исследовались в двух группах пород: габбро-долеритах (3 пробы) и в песчаниках (7 проб), отобранных при драгировании на поднятии Менделеева СЛО. Подготовка проб цирконов, выделенных из вышеназванных пород, проводилась по методике [5]; U-Pb-анализы выполняли в ЦИИ ВСЕГЕИ на мультиколлекторном вторично-ионном высокоразрешающем масс-спектрометре SHRIMP-II; химический состав внутренних неоднородностей цирконов исследовался в ИМГРЭ с помощью микрорентгено-спектрального анализатора Camebax-microbeam (аналитик И.М. Куликова).

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны гистограммы U-Pb возраста цирконов из пород САХ и СЛО, построенные нами по данным цитированных выше авторов. Сравнительный анализ

этих гистограмм позволяет выявить следующие общие закономерности:

– для цирконов из базит-гипербазитовых магматических пород, отобранных вдоль САХ (рис. 2, а), характерны следующие максимумы значений U-Pb возраста: 10–30; 200–600; 1500–2000 и более 2500 млн лет;

– для цирконов из основных магматических пород, отобранных с поднятия Менделеева (рис. 2, б), характерны: 100–200; 300–700; 1000–1200; 1500–2000; и 2650–2700 млн лет;

– для цирконов из песчаников, развитых на островах и на побережье СЛО (рис. 2, в): 200–300; 450–700; 1100–1300; 1500–2000; и 2400–2700 млн лет;

– для цирконов из песчаников, отобранных с поднятия Менделеева (рис. 2, г): 100–200; 300–600; 1000–1200; 1500–2000 и более 2500 млн лет.



Рис. 1. Схематическая карта Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Северного Ледовитого океана (СЛО) с районами отбора проб для изотопно-геохимического изучения цирконов [1]

Обобщая полученные данные, можно наметить следующие сквозные максимумы U-Pb датировок цирконов, свойственные всем вышеперечисленным группам пород: 100–200; 400–600; 1000–1200; 1500–2000 и более 2500 млн лет. При этом особое внимание, прежде всего, заслуживают сквозные максимумы древних (PR-AR) значений возраста цирконов, т.е. явно ксеногенных зёрен, захваченных молодыми базит-гипербазитовыми расплавами при их контаминации более древних блоков коры или литосферной мантии.

Широкое развитие древних ксеногенных цирконов в САХ, во-первых, подвергает сомнению традиционные представления о глубинном строении срединных океанических хребтов, а, во-вторых, предполагает наличие под этими хребтами фрагментов либо древней океанской литосферы [10], либо доокеанической коры [11], либо «растощенного» древнего докембрийского субстрата [9], либо блоков нижней континентальной коры в астеносферной мантии [8], либо гетерогенной по возрасту и тектонически расслоенной литосферной мантии [18]. Если это так, то литосферная мантия под океанами мало чем отличается по возрасту, а следовательно, и по составу от таковой под континентами. При этом если источниками океанических вулканов можно по-прежнему считать примитивную мантию (или её диплетированные и/или обогащённые резервуары), то постоянное присутствие в этих же вулканитах древних цирконов прямо указывает на признаки возможного смешения этих расплавов с веществом либо древней коры континентов, либо древней океанской литосферы. По нашему мнению, ответ на этот вопрос, в первую очередь, должны дать сами древние цирконы, строение и структура которых, а также особенности их химического состава позволяют с определённой долей вероятности дискриминировать их мантийное или коровое происхождение [19].

Ниже обсуждаются предварительные результаты решения поставленной проблемы на примере базитовых пород и песчаников, драгированных нами в 2012 г. на поднятии Менделеева в СЛО [6]. Морфологически дно СЛО делится на три морфоструктурно обособленных блока: Норвежско-Гренландский, Евразийский и Амеразийский. Первые два блока схожи между собой, по сейсмичности, аномальному магнитному полю и глубинному строению они относятся к океанической плите и рассматриваются как продолжение Северо-Атлантического срединного хребта (хребты Мона, Книповича, Гаккеля). Амеразийский суббассейн

разделяется на две морфоструктурные провинции: Центрально-Арктическую область океанских поднятий, (хребт Ломоносова, поднятия Альфа и Менделеева, Чукотское плато и котловины Макарова и Подводников) и Канадскую котловину. Выполненные в последние годы обобщения, в т.ч. новых геолого-геофизических материалов

не оставили сомнений в том, что дно Евразийского бассейна имеет под собой кору океанического типа, а хребт Ломоносова и Чукотское плато являются блоками континентальной коры. Что же касается природы поднятия Альфа-Менделеева и Канадской котловины, то она до сих пор остается предметом острых дискуссий.

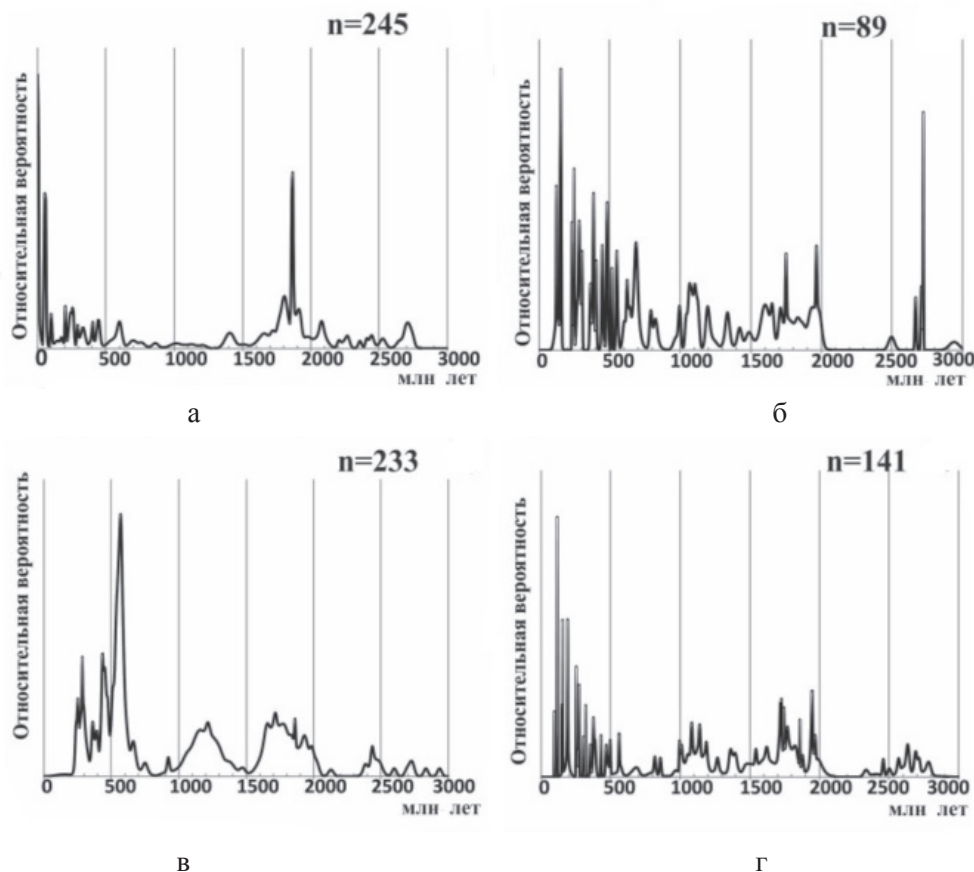


Рис. 2. Графики возрастной вероятности U-Pb датировок цирконов: а – из базальтов, габброидов и абиссальных перидотитов САХ [8,11]; б – из габбро-долеритов; в – из песчаников побережья Американо-Арктического бассейна СЛО [17]; г – из песчаников поднятия Менделеева СЛО

В 2012 г., в ходе экспедиции «Арктика-2012», исследование пород дна СЛО проводилось вдоль центральной части поднятия Менделеева от 77° с.ш. до 83° с.ш. на 7 комплексных полигонах [6]. На двух из них в коренных породах дна на глубинах около 2600 м впервые были пробурены неглубокие скважины, вскрывшие базальты и андезитобазальты. Кроме того, на всех полигонах с помощью драги и грейфера было отобрано более 20 тысяч обломков пород разного состава. Среди последних преобладают (63%) карбонатные породы, в т.ч. доломиты с палеозойской фауной трилобитов и панцирных рыб (D<sub>3</sub>-С). Далее по распространности следуют терригенные породы (20%, с преобладанием кварцевых песчани-

ков), обломки магматических пород составляют 10% (в т.ч. долериты и габбро-долериты – 8% и граниты – 2%); и завершают этот ряд метаморфические породы (6%).

Плотности встречаемости U-Pb датировок возраста цирконов из габбро-долеритов и из песчаников показаны на гистограммах (рис. 2, б, г).

По морфологии, внешнему облику, а также по внутреннему строению (катодолуминесценция, CL) цирконы из габбро-долеритов и песчаников между молодыми и древними цирконами фиксируются следующие отличия: в группе габбро-долеритов для молодых цирконов характерны: призматическая форма кристаллов, осцилляторная зональность, в CL часто секториальность,

отсутствие трещин и большого количества включений (кристаллы могут быть как окатанные, так и преимущественно неокатанные) (рис. 3, а), тогда как для древних характерен удлинённый, удлинённо-призм. и близкие к изометричным формы, часто с наличием ядер на фото в CL, окатанность, наличие большого количества трещинноватости (рис. 3, б). В группе песчаников для

молодых цирконов характерны удлинённые, удлинённо-призматические кристаллы, часто с осцилляторной зональностью, часто неокатанные или слабоокатанные без большого количества трещин (рис. 3, в), в то время как для древних цирконов – хорошо окатанные с большим количеством включений, форма, как правило, удлинённо-призматическая (рис. 3, г).

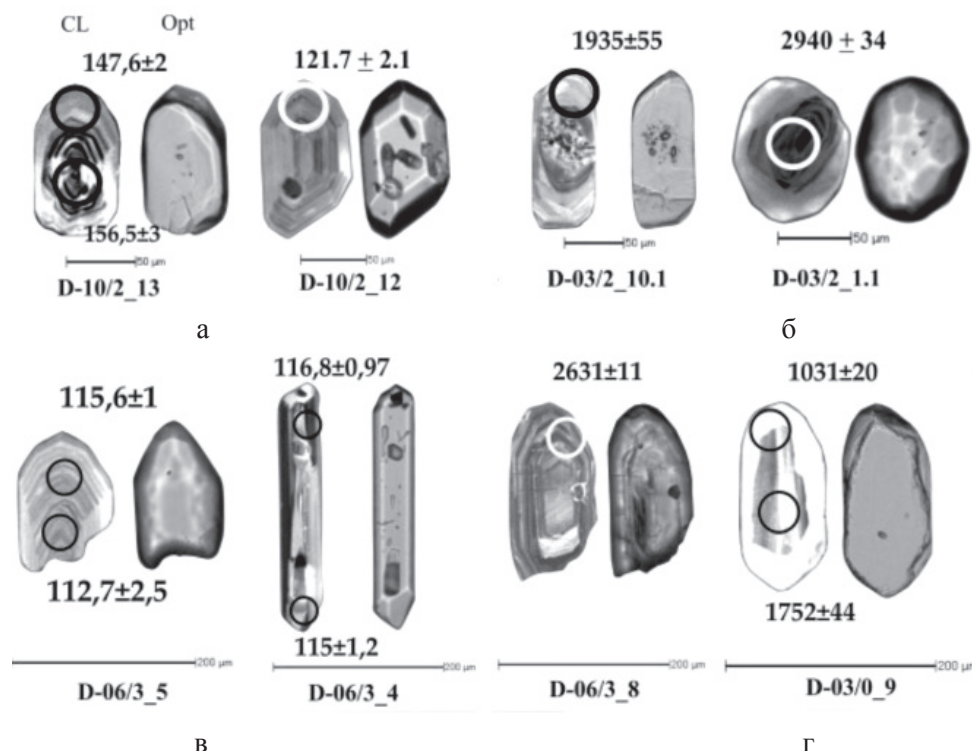


Рис. 3. Микрофотографии молодых (а, в) и древних (б, г) цирконов из: а – габбро-долеритов; б – песчаников, в проходящем свете (Opt) и в режиме катодолуминесценции (CL)

Для дискриминации возможных источников исследуемых цирконов (коровые, мантийные или корово-мантийные) нами были проведены микросондовые профильные исследования (от центра к периферии) всех датированных зёрен цирконов в представительных выборках из габбро-долеритов и из песчаников. На рис. 4 показано распределение средних содержаний U Th (г/т), HfO<sub>2</sub>, Tr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (масс. %) (в системе центр-край) для молодых и древних цирконов исследуемых пород. Сравнительный анализ этих значений показывает, что в группе габбро-долеритов древние цирконы отличаются от молодых пониженными значениями средних содержаний U и Th и повышенными – остальных элементов (рис. 4, а); в группе же песчаников древние цирконы также характеризуются пониженными значениями U и Th, одна-

ко для других элементов за исключением Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> значения средних содержаний равны (рис. 4, б). Реликтовые ядра древних цирконов из песчаников характеризуются относительно более высокими содержаниями в таковых из габбро-долеритов ZrO<sub>2</sub>, (на 1,44 масс. %), HfO<sub>2</sub> Tr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; равными содержаниями P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Th и относительно более низкими содержаниями Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в 6 раз), U в 1,8 раз и Pb<sup>206\*</sup> в 10 раз. В древних реликтовых ядрах габбро-долеритов (по сравнению с краями) больше ZrO<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, меньше HfO<sub>2</sub>, Tr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При сравнении древних цирконов из габбро-долеритов и песчаников значимые отличия между ними фиксируются более высокими значениями Tr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и более низкими (U, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> песчаниках (рис. 4, в), что соответствует известным дискриминациям [9] цирконов, имеющих соответственно мантийный



или коровый источники. Более наглядно это различие проявлено на диаграмме U/Th-Hf [13], где фигуративные точки габ-

бро-базальтов тяготеют к полю мантийных, а песчаников – к полю континентальных пород.

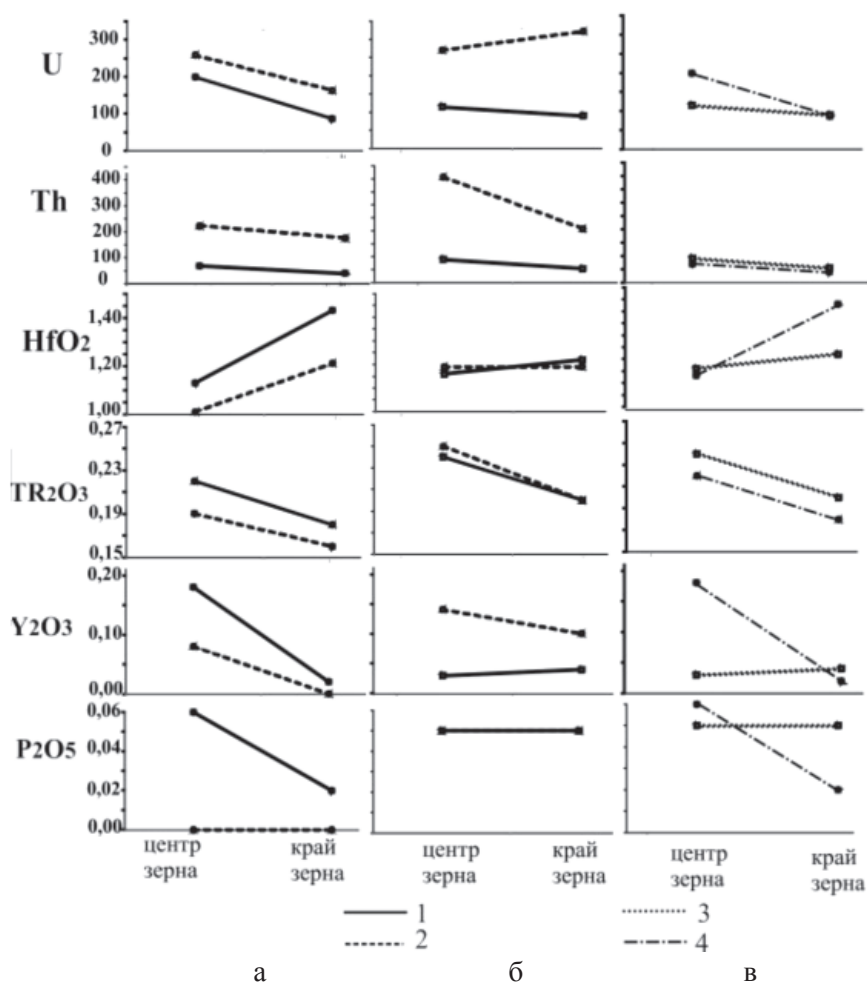


Рис. 4. Тренды распределения средних содержаний элементов – примесей (U, Th (г/т); HfO<sub>2</sub>, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (масс. %)) в древних (1) и молодых (2) цирконах из габбро-долеритов (а) и песчаников (б), а также сравнительная характеристика древних цирконов (в) из песчаников (3) и габбро-долеритов (4) с поднятия Менделеева в СЛО

### Выводы, заключение

Выявлены различия между молодыми и древними цирконами по их морфологии, облику, неоднородностям внутреннего строения, а так же по трендам распределения элементов-примесей. Полученные данные рассматриваются нами в качестве предварительных геохимических критериев оценки возможных источников (мантийных или коровых) ксеногенных древних цирконов (в том числе и их ядер) в базит-гипербазитовых породах САХ и СЛО. С целью более надёжной реконструкции первичной природы исследуемых древних цирконов нами предусмотрено на следующем этапе изучение в них изотопного состава гафния в соответствии с рекомендациями [4] и ре-

зультатами выполненного изучения нами (совместно с Е. Белоусовой) источников цирконов из титан-цирконовых россыпей Австралии (рис. 5).

### Список литературы

1. Оценка возраста и источников сноса кварцевых песчаников поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан): морфология и SHRIMP анализ цирконов / Б.В. Беляцкий, А.Н. Ларионов, И.А. Андреева и др. // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизм: материалы III Российской конференции, – М., 2006. – Т. 1. – С. 101–105.
2. Находки молодых и древних цирконов в габброидах впадины Маркова, Срединно-Атлантический хребет, 5030.6'–5032.4' с.ш. (результаты SHRIMP-II U-Pb-датирования): значение для понимания глубинной геодинамики современных океанов / Н.С. Бортников, Е.В. Шарков, О.А. Богатиков

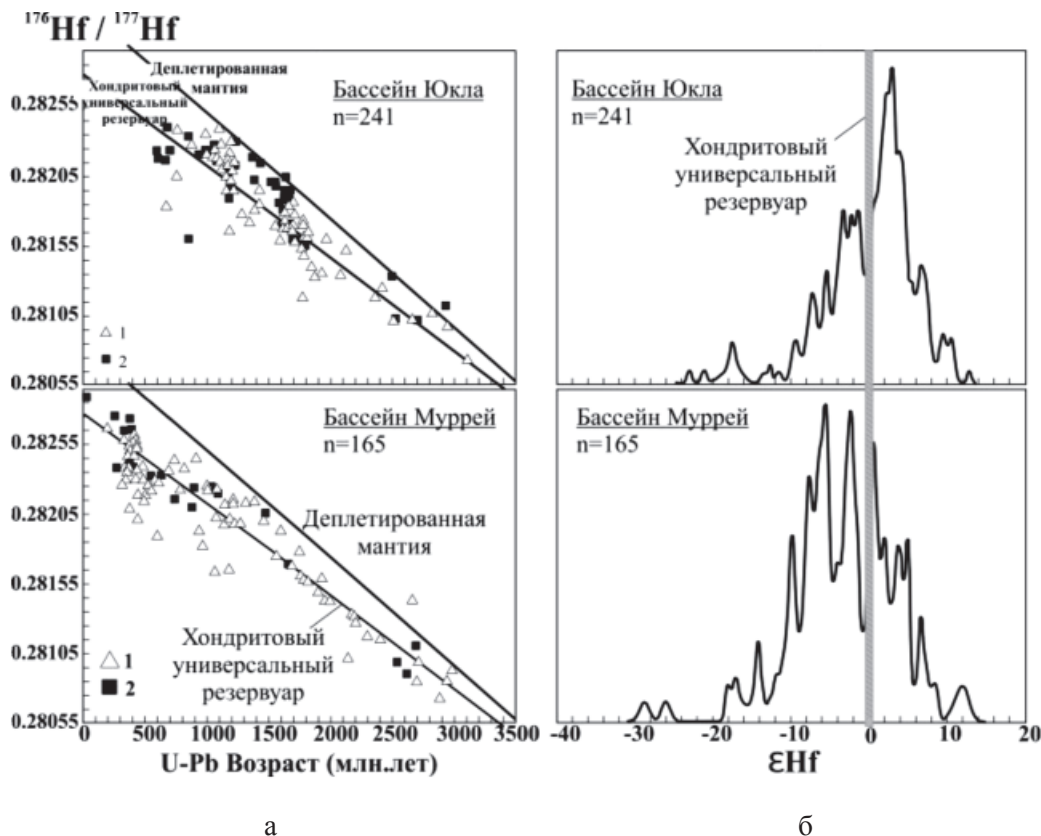


Рис. 5. Диаграмма  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  – U-Pb возраст (а) и  $\epsilon\text{Hf}$  цирконов из россыпных месторождений Австралии: 1 – цирконы из гранитоидов (70-75%SiO<sub>2</sub>); 2 – цирконы из мафических пород

и др. // Доклады академии наук. Геохимия. – 2008. – Т. 421, № 3. – С. 240–248.

3. Новые данные о составе и происхождении донных осадков южной части поднятия Менделеева (Северный ледовитый океан) / В.Я. Кабаньков, И.А. Андреева, В.В. Крупская и др. // Доклады академии наук. Геология. – 2008. – Т. 419, № 5. – С. 653–657.

4. Циркон в габброидах из осевой зоны Срединно-Атлантического хребта: U-Pb-возраст и  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ -отношения (результаты исследований методом лазерной абляции) / Ю.А. Костицын, Е.А. Белоусова, Н.С. Бортник, Е.В. Шарков // Доклады академии наук. Геохимия. – 2009. – Т. 428, № 5. – С. 654–662.

5. Изотопно-геохимические особенности новообразованных кайм цирконов – критерий идентификации источников питания Ti-Zr-россыпей / А.А. Кременецкий, Н.А. Громалова, Е. Белоусова, Л.И. Веремева // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 6. – С. 516–537.

6. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области центрально-арктических поднятий / А.Ф. Морозов, О.В. Петров, С.П. Шокальский, С.Н. Кашубин, А.А. Кременецкий и др. // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 53. – С. 34–55.

7. Архейские граниты на Северном полюсе / О.В. Петров, А.Ф. Морозов, А.А. Лайба и др. // Строне и история развития литосферы. Paulsen Editions. – М. –СПб.: 2010.

8. Молодые и древние цирконы из пород океанической литосферы Центральной Атлантики, геотектонические следствия / С.Г. Сколотнев, В.Е. Бельтнев, Е.Н. Лепехина, И.С. Ипатьева // Геотектоника. – 2010. – № 6. – С. 24–59.

9. Древние породы в Срединно-Атлантическом хребте / А.И. Трухалев, Ю.Е. Погребницкий, Б.В. Беляц-

кий и др. // Отечественная геология. – 1993. – № 11. – С. 8189.

10. Мезозойский циркон из габбро-норитов осевой зоны Срединно-Атлантического хребта, 6° с.ш. (район впадины Макарова) / Е.В. Шарков, Н.С. Бортник, О.А. Богатиков и др. // Доклады академии наук. Геохимия. – 2004. – Т. 396, № 5. – С. 675–679.

11. Возраст и этапность формирования магматических пород Срединно-Атлантического хребта по геологическим и радиологическим данным / О.Г. Шулятин, С.И. Андреев, Б.В. Беляцкий, А.И. Трухалев // Региональная геология и металлогения. – 2012 – № 50. – С. 28–36.

12. Grantz A., Pease V. L., Willard D.A. et al. *Geological Society of America Bulletin*. – 2001. – Vol. 113, № 10. – P. 1272–1281.

13. Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B. et al. *Geology*. – 2007. – Vol. 35. – P. 643–646.

14. Hadlari T., Davis W.J., Dewing K. et al. *Geological Society of America Bulletin*. – 2012. – Vol. 124, № 7/8. – P. 1155–1168.

15. Kremenetsky A., Gromalova N., Rekant P. *4-th international geological conference, Brno, Czech Republic*. – 2013. – 56 p.

16. Lissenberg C.J., Rioux M., Shimizu N., Bowring S.A., Mevel C. *Science*. – 2009. – Vol. 323. – P. 1048–1050.

17. Miller E.L., Soloviev A., Kuzmichev A., Gehrels G., Toro J., Tuchkova M. *Norwegian Journal of Geology*. – 2008. – Vol. 88. – P. 201–226.

18. Pilot J., Werner C.D., Haubrich F., Baumann N. *Nature*. – 1998. – Vol. 393. – P. 676–679.

19. Zircon Ed. Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. – 2003. – Vol. 53. – 500 p.

## References

1. Belyackij B.V., Larionov A.N., Andreeva I.A. i dr. Ocenka vozrasta i istochnikov snosa kvarcevyx peschanikov podnyatiya Mendeleeva (Severnyj Ledovityj okean): morfologiya i SHRIMP analiz cirkonov // Izotopnoe datirovanie processov rudoobrazovaniya, magmatizma, osadkonakopleniya i metamorfizm: materialy III Rossijskoj konferencii, Moskva, 2006. T. 1. pp. 101–105.
2. Bortnikov N.S., Sharkov E.V., Bogatkov O.A. i dr. Naxodki molodyx i drevnix cirkonov v gabbroidax vpadiny Markova, Sredinno-Atlanticheskij xrebet, 5030.6'-5032.4' s.sh. (rezul'taty SHRIMP-II U-Pb-datirovaniya): znachenie dlya ponimaniya glubinnoj geodinamiki sovremennyx okeanov // Doklady akademii nauk. Geoximiya. 2008. T. 421, no. 3. pp. 240–248.
3. Kaban'kov V.Ya., Andreeva I.A., Krupskaya V.V. i dr. Novye dannye o sostave i proisxozhdenii donnyx osadkov yuzhnoj chasti podnyatiya Mendeleeva (Severnyj ledovityj okean) // Doklady akademii nauk. Geologiya. 2008. T. 419, no. 5. pp. 653–657.
4. Kosticyn Yu.A., Belousova E.A., Bortnikov N.S., Sharkov E.V. Cirkon v gabbroidax iz osevoj zony Sredinno-Atlanticheskogo xrebeta: U-Pb-vozrast i 176Hf/177Hf-otnosheniya (rezul'taty issledovaniy metodom lazernoj ablyacii) // Doklady akademii nauk. Geoximiya. 2009. T. 428, no. 5. pp. 654–662.
5. Kremeneckij A.A., Gromalova N.A., Belousova E., Veremeeva L.I. Izotopno-geoximicheskie osobennosti novoobrazovannyx kajm cirkonov kriterij identifikacii istochnikov pitaniya Ti-Zr-rossypej // Geologiya rudnyx mestorozhdenij. 2011. T. 53, no. 6. pp. 516–537.
6. Morozov A.F., Petrov O.V., Shokal'skij S.P., Kashubin S.N., Kremeneckij A.A. i dr. Novye geologicheskie dannye, obosnovyvyayushhie kontinental'nuyu prirodu oblasti central'no-arkticheskix podnyatij // Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2013. no. 53, pp. 34–55.
7. Petrov O.V., Morozov A.F., Lajba A.A. i dr. Arxejskie granity na Severnom polyuse // Stroenie i istoriya razvitiya litosfery. Paulsen Editions. M. -S-Peterburg: 2010.
8. Skolotnev S.G., Bel'tenev V.E., Lepexina E.N., Ipat'eva I.S. Molodye i drevnie cirkony iz porod okeanicheskoy litosfery Central'noj Atlantiki, geotektonicheskie sledstviya // Geotektonika. 2010. no. 6. pp. 24–59.
9. Truxalev A.I., Pogrebickij Yu.E., Belyackij B.V. i dr. Drevnie porodы v Sredinno-Atlanticheskome xrebeta // Otechestvennaya geologiya. 1993. no. 11. pp. 81–89.
10. Sharkov E.V., Bortnikov N.S., Bogatkov O.A. i dr. Mezozojskij cirkon iz gabbro-noritov osevoj zony Sredinno-Atlanticheskogo xrebeta, 60 s.sh. (rajon vpadiny Makarova) // Doklady akademii nauk. Geoximiya. 2004. T. 396, no. 5. pp. 675–679.
11. Shulyatin O.G., Andreev S.I., Belyackij B.V., Truxalev A.I. Vozrast i e'tapnost' formirovaniya magmaticeskix porod Sredinno-Atlanticheskogo xrebeta po geologicheskim i radiologicheskim dannym // Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2012 no. 50. pp. 28–36.
12. Grantz A., Pease V. L., Willard D.A. et al. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, Vol. 113, no. 10, pp. 1272–1281.
13. Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B. et al. *Geology*, 2007, Vol. 35, pp. 643–646.
14. Hadlari T., Davis W.J., Dewing K. et al. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, Vol. 124, no. 7/8, pp. 1155–1168.
15. Kremeneckij A.A., Gromalova N., Rekant P. *4-th international geological conference*, Brno, Czech Republic, 2013, 56 p.
16. Lissenberg C.J., Rioux M., Shimizu N., Bowring S.A., Mevel C. *Science*, 2009, Vol. 323, pp. 1048–1050.
17. Miller E.L., Soloviev A., Kuzmichev A., Gehrels G., Toro J., Tuchkova M. *Norwegian Journal of Geology*, 2008, Vol. 88, pp. 201–226.
18. Pilot J., Werner C.D., Haubrich F., Baumann N. *Nature*, 1998, Vol. 393, pp. 676–679.
19. Zircon Ed. Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, Vol. 53, 500 p.

## Рецензенты:

Левченко Е.Н., д.г.-м.н., зав. отделом института, ФГУП ИМГРЭ, г. Москва;

Роговой В.М., д.г.-м.н., старший научный сотрудник, г.н.с., ФГУП ИМГРЭ, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 23.08.2013.