

Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 4. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (цирконов, апатитов)

Л. В. Бадида¹, А. В. Маслов^{1,2}, Г. А. Мизенс¹

¹Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mails: kokshina.lv@gmail.com, amas2004@mail.ru, mizens@igg.uran.ru

²Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2

Поступила в редакцию 12.04.2019 г., принята к печати 19.04.2019 г.

Объект исследований. Рассмотрены современные методы исследования обломочных цирконов и апатитов, используемых как минералы-индикаторы состава и возраста пород питающих провинций. **Материалы и методы.** Использованы данные об U-Pb изотопных возрастах и составе обломочных цирконов, выделенных из песчаников рифея и венда, а также нижнего триаса Южного Урала. Кроме того, привлечены многочисленные литературные данные. **Результаты.** В статье дается обзор основных методов изучения рассматриваемых минералов. Показано, что привлечение для реконструкции состава пород в источниках сноса данных по обломочным апатитам, наряду с цирконами, а также комбинация петрогенетических признаков различных обломочных минералов и информации об их возрастах обладают высоким потенциалом для точной диагностики источников сноса.

Ключевые слова: обломочные цирконы, обломочные апатиты, методы исследования, Южный Урал

Источник финансирования

Исследования проведены в соответствии с темой № AAAA-A18-118053090044-1 государственного задания ИГГ УрО РАН.

Provenance reconstructions. Article 4. Modern methods for investigating detrital minerals (zircon, apatite)

Lyudmila V. Badida¹, Andrey V. Maslov^{1,2}, Gunar A. Mizens¹

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia,
e-mails: kokshina.lv@gmail.com, amas2004@mail.ru, mizens@igg.uran.ru

²Institute of Geology, Ufimian Federal Research Centre of RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa 450077, Russia

Received 12.04.2019, accepted 19.04.2019

Research subject. This article aims to review modern methods for investigating detrital zircons and apatites used as mineral indicators of the composition and age of distributive provinces. **Materials and methods.** Data on the U-Pb-isotopic age and composition of detrital zircons isolated from Riphean and Vendian sandstones, as well as from the lower Triassic of the Southern Urals, was analysed. In addition, numerous examples and data from published sources were studied. **Conclusions.** A review of the main methods used for investigating the minerals in question was conducted. It is shown that the reconstruction of the composition of source rocks should be carried out using data on both detrital apatites and zircons. In addition, the petrogenetic signs of various detrital minerals and information about their ages have a high potential for accurate diagnosis of sources rocks.

Keywords: detrital zircons, detrital apatites, methods of research, Southern Urals

Funding information

The studies were conducted in accordance with the theme number AAAA-A18-118053090044-1 of the state assignment of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to N.S. Glushkova, who completed the illustrations for this article.

Для цитирования: Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 4. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (цирконов апатитов). *Литосфера*, **20**(3), 363-385. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-363-385

For citation: Badida L.V., Maslov A.V., Mizens G.A. (2020) Provenance reconstructions. Article 4. Modern methods for investigating detrital minerals (zircon, apatite). *Litosfera*, **20**(3), 363-385. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-3-363-385

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья завершает серию публикаций, посвященных современным методам и подходам к изучению пород петрофонда (Маслов и др., 2019, 2020; Бадида и др., 2020). Мы предполагали завершить указанную серию статей обзором методов исследования состава минералов тяжелой фракции, таких как турмалин, гранат, хромшпинелид, рутил, циркон, апатит, пироксены и амфиболы, но оказалось, что вместить имеющуюся на сегодня информацию по всем минералам в одну публикацию невозможно. В итоге сведения об использовании для указанных целей обломочных цирконов и апатитов составили отдельную статью, которая и предлагается вниманию читателей.

U-Pb-изотопное датирование обломочных цирконов стало в последние 10–15 лет в России популярным методом корреляции разрезов, исследования возраста и состава пород питающих провинций, проверки разнообразных тектонических построений, а также ряда других также весьма интересных и важных реконструкций, например, установления максимально возможного возраста осадочных образований, вопросов роста континентальной коры, выделения эпох формирования крупных масс ювенильной коры и т. п.

Вместе с тем, как отмечено в (Gillespie et al., 2018), использование данных по геохронологии циркона имеет и серьезные ограничения, связанные с тем, что циркон кристаллизуется не во всех типах магматических пород. И здесь на помощь может прийти обломочный апатит, о роли которого как индикатора состава пород питающих провинций, известно значительно меньше.

ОБЛОМОЧНЫЕ ЦИРКОНЫ: МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Важным инструментом реконструкции как предполагаемого возраста пород питающих провинций, так и их возможного состава является определение U-Pb-изотопного возраста, РЗЭ- и Lu-Hf-изотопных характеристик обломочных цирконов (Belousova et al., 2002; Barr et al., 2003; Fedo et al., 2003; Hoskin, Schaltegger, 2003; Rainbird, Davis, 2007; Dickinson et al., 2009; и др.). Получаемая с помощью анализа U-Pb-датировок информация в большинстве случаев не может быть выявлена другими методами, в частности, такими традиционными, как минералого-петрографические, геохимические анализы индикаторов палеотечений. Следует, однако, иметь в виду, что данные о возрасте обломочных цирконов в осадочных породах дают информацию о максимальном возрастном пределе формирования осадков (Barr et al., 2003).

Известно, что U-Pb-система в цирконах весьма стабильна и не подвержена влиянию процессов метаморфизма, происходящих во время седиментации во многих случаях. Следовательно, обломочные цирконы позволяют нам получить первичные возраста пород, в которых они формировались, но не предполагают, что цирконы попали в осадок из субстрата именно этого возраста, поскольку они, как хорошо известно, могут быть переотложены значительное число раз (Dickinson et al., 2009).

U-Pb-изотопное датирование цирконов, присутствующих в осадочных и метаосадочных породах, стало в последние годы весьма популярным инструментом исследований, связанных с корреляцией различных последовательностей пород и реконструкцией состава областей размыва и возраста размывавшихся комплексов (de Haas et al., 1999; Bingen et al., 2001; Williams, 2001; Lahtinen et al., 2002; Fedo et al., 2003; Hoskin, Schaltegger, 2003; Andersen, 2005; Cavosie et al., 2006; Gaucher et al., 2008; Dickinson et al., 2009; Lauri et al., 2011; Маслов и др., 2011, 2012, 2016; Андреичев и др., 2013; Романюк и др., 2013, 2014, 2018; Кириллова, 2014; Ковач и др., 2014; Костева и др., 2014; Кузьмин, 2014; Школьник и др., 2014; Ершова и др., 2015; Петров и др., 2015; Кузнецов и др., 2017; Ивлева и др., 2018; и др.), а также верификацией различных тектонических моделей (Кузнецов и др., 2012, 2014; Rainbird, Davis, 2007; и др.). Результаты U-Pb-изотопного датирования цирконов (полученные иногда весьма оригинальным способом) используются и для понимания глобальных и субглобальных процессов формирования континентальной коры (Davis, 2002; Barr et al., 2003; Griffin et al., 2004; Condie et al., 2005; Safonova et al., 2010). Большинство исследований подобного рода основано на визуальном сравнении графиков конкордантных возрастов или диаграмм плотностей вероятности (Sircombe, 2000), но в ряде публикаций используются также подходы, основанные на анализе некоторых количественных характеристик возрастных спектров (Sambridge, Compston, 1994; Sircombe, Hazelton, 2004). Следует, однако, иметь в виду, что получение корректной геологической информации любым из указанных методов требует адекватного отражения возрастными спектрами особенностей распределения различных популяций обломочных цирконов в исходных осадках.

Качество геологической информации, полученной при анализе U-Pb-изотопных возрастов детритовых цирконов, в первую очередь обусловлено количеством проанализированных зерен и “стратегией” их отбора (Andersen, 2005). При поиске каких-либо экзотических пород в областях размыва или использовании сведений о возрасте обломочных цирконов для установления минимального возраста накопления тех или иных толщ весьма важно обнаружение всех присутствующих в породах популяций цирконов, даже самых малых.

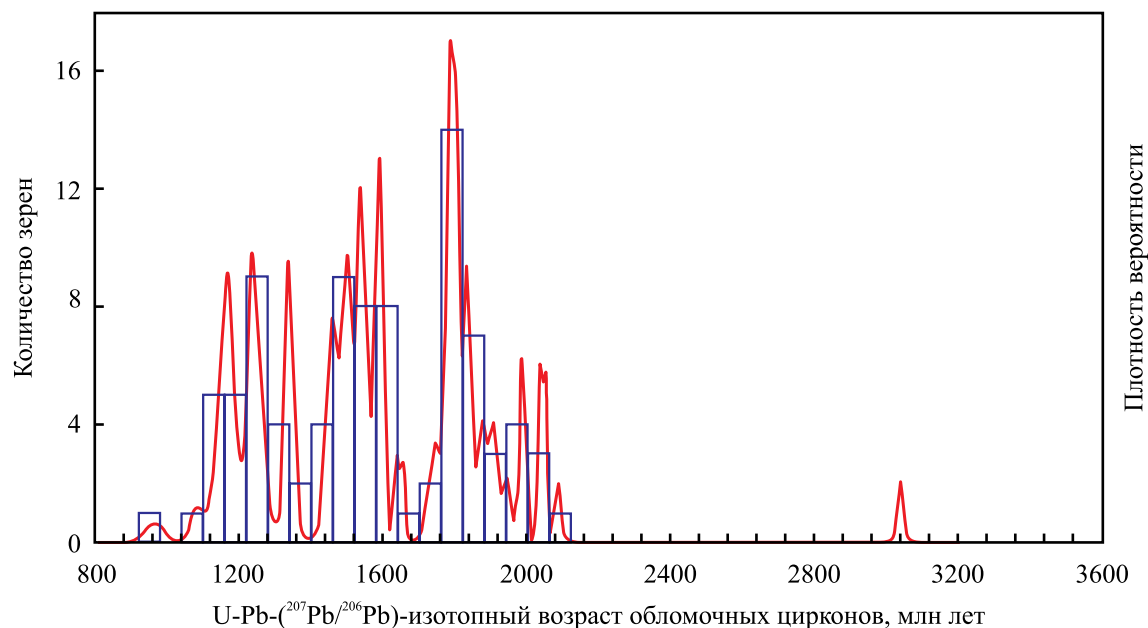


Рис. 1. Гистограмма и кривая плотности вероятности U-Pb изотопных возрастов обломочных цирконов с дискордантностью менее $\pm 10\%$, выделенных из песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея Башкирского мегантиклинория.

Fig. 1. The histogram and the probability density curve of the U-Pb isotopic ages of detrital zircons with less than $\pm 10\%$ discordance of Biryan subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation sandstones, the Bashkir meganticlinorium.

Однако, несмотря на то, что специальными исследованиями (Sircombe, 2000; Vermeesch, 2004) была показана важность изучения статистически надежных выборок (т.е. выборок с числом конкордантных датировок более 115–120), во многих работах все еще встречаются выводы, основанные на ограниченном количестве данных.

В результате численного моделирования и статистических выкладок установлено, что для получения полного представления о распределении плотности вероятности U-Pb изотопных возрастов детритовых цирконов в той или иной обломочной породе, что только и дает исчерпывающие сведения о самых малых возрастных популяциях, необходима информация по нескольким сотням случайным образом экстрагированных из каждого образца зерен (Andersen, 2005). Как правило, однако, это маловероятно даже в случае использования такого высокопроизводительного метода, как LA-ICP-MS. На практике в большинстве случаев используется компромиссное решение: 1) из каждого образца случайным образом выделяется и анализируется такое количество цирконов, которое обеспечивает достижение плотности вероятности 0.5 при пределе обнаружения 1–2%, что соответствует примерно 35–70 зернам; 2) дополнительно, для выявления самых малых популяций цирконов, необходимо изучение зерен, отобранных специальным

образом. Речь идет о сочетании зерен случайного и неслучайного отбора, используемых для анализа. Более подробно об этом можно посмотреть в статье (Andersen, 2005).

Большинство исследований детритовых цирконов последних лет преимущественно сфокусировано на анализе только возрастных спектров, например, таких, как на рис. 1. Вместе с тем редкие и рассеянные элементы, содержащиеся в цирконе, а также Lu-Hf изотопная систематика могут дать существенную дополнительную информацию относительно типов и особенностей формирования пород в областях размыва (Belousova et al., 2002; Hoskin, Schaltegger, 2003; Kinney, Maas, 2003; Griffin et al., 2004; Andersen, 2005; и др.). Следует отметить тем не менее, что первоначально ряд авторов испытывал определенный скепсис в отношении индикаторной роли РЗЭ в цирконах (Hoskin, Ireland, 2000), но позднее, на существенно более представительном материале и с привлечением более широкого спектра элементов-примесей, было показано, что распределение последних в той или иной мере отражает состав материнских пород и параметры процессов кристаллизации (Belousova et al., 2002; и др.). Так, цирконы из сиенитов, базальтов и кимберлитов обладают весьма низкими содержаниями гафния; максимальные концентрации данного элемента присущи некоторым грани-

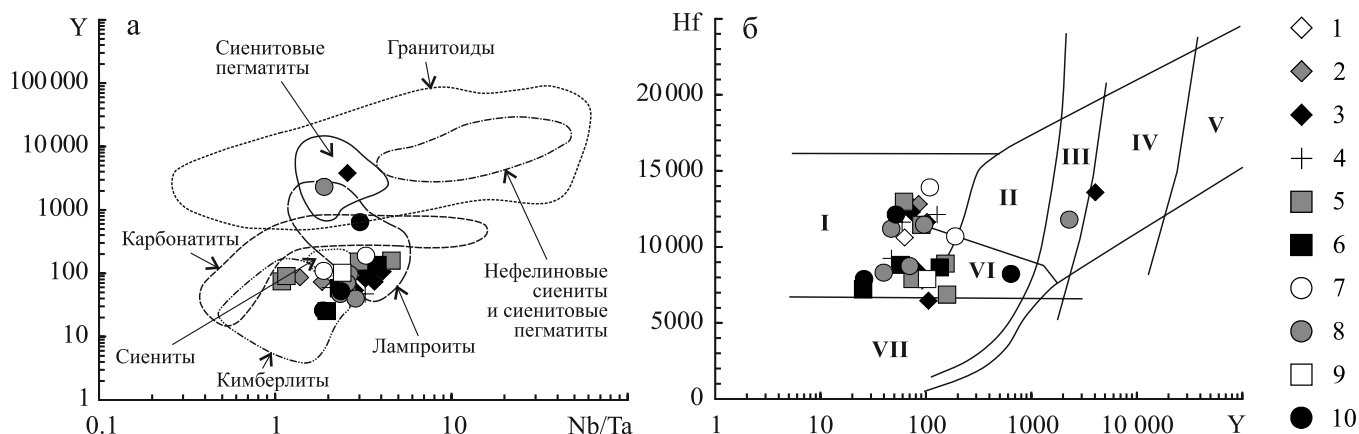


Рис. 2. Диаграммы Nb/Ta–Y (а) и Y–Hf (б) (Belousova et al., 2002) и положение на них точек состава обломочных цирконов из песчаников нижнего триаса Южного Урала (Маслов и др., 2016).

Поля цирконов: I – из кимберлитов; II – из ультраосновных, основных и пород среднего состава; III – из кварцсодержащих средних пород и пород кислого состава; IV – из кислых пород с высоким содержанием SiO₂; V – из грейзенов; VI – из щелочных пород и щелочных метасоматитов щелочных комплексов; VII – из карбонатитов. Возраст: 1 – неоархейский, 2 – палеопротерозойский, 3 – мезопротерозойский, 4 – неопротерозойский, 5 – вендский, 6 – кембрийский, 7 – силурийский, 8 – девонский, 9 – каменноугольный, 10 – пермский.

Fig. 2. The Nb/Ta–Y (a) and Y–Hf (б) diagrams (Belousova et al., 2002) and the position on them of the data points of detrital zircons from the Lower Triassic sandstones, the Southern Urals (Maslov et al., 2016).

Zircon fields: I – from kimberlites; II – from ultramafic, mafic and intermediate rocks; III – from quartz-bearing intermediate and felsic rocks; IV – from felsic rocks with “high” SiO₂ content; V – from greisens; VI – from alkaline rocks and alkaline metasomatites of alkaline complexes; VII – from carbonatites. Ages of zircons: 1 – Neo-Archean, 2 – Paleoproterozoic, 3 – Mesoproterozoic, 4 – Neoproterozoic, 5 – Vendian, 6 – Cambrian, 7 – Silurian, 8 – Devonian, 9 – Carboniferous, 10 – Permian.

тоидам и пегматитам нефелиновых сиенитов (Wiedenbeck et al, 1995; Belousova et al., 2002). По данным (Hoskin, Ireland, 2000), наибольшие значения Zr/Hf характерны для цирконов кимберлитов (75–168) и карбонатитов (до ≈250).

Цирконы из других типов магматических образований характеризуются близкими к хондритовым величинами отношения Zr/Hf (≈37). Концентрации иттрия в цирконах из кимберлитов редко превосходят 10 г/т, а в цирконах гранитоидов могут достигать величин 10 000 г/т. Значение Hf/Y в цирконах из кимберлитов составляет 50–1000, а в цирконах гранитоидов – всего 1–15.

Цирконы сиенитов и пегматитов из нефелиновых сиенитов характеризуются еще более низкими величинами данного параметра (0.8–4). Содержания Ta и Nb варьируют в пределах 0.2–21 и 0.4–120 г/т соответственно. Максимальные значения Nb/Ta достигают 40–48 в цирконах сиенитов, пегматитов нефелиновых сиенитов, а также некоторых гранитоидов, минимальные наблюдаются в цирконах из кимберлитов (Belousova et al., 2002) (рис. 2).

Содержания урана в цирконах варьируют от 0.1 до более 10 000 г/т. Для тория свойственны примерно такие же пределы вариаций (1–10 000 г/т). Наименьшие концентрации обоих элементов (соответственно 6–60 и 2–15 г/т) характерны для цирконов из кимберлитов, максимальные присущи цир-

конам гранитоидов и пегматитов. Величина отношения Th/U составляет преимущественно 0.1–1.0. В то же время в некоторых сиенитах и пегматитах нефелиновых сиенитов этот параметр доходит до 100–1000 и более. Цирконы карбонатитовых комплексов характеризуются значениями Th/U ≈ 100, что в основном контролируется необычно низкими концентрациями в них урана (Belousova et al., 2002). По данным (Ahrens et al., 1967; Vavra et al., 1999; Hartmann et al., 2000; Hartmann, Santos, 2004), величины Th/U в цирконах магматического генезиса варьируют от 0.2 до 1.5, а в кристаллах из метаморфических образований рассматриваемый параметр значительно ниже (0.001–0.1) (рис. 3).

Наиболее высокими содержаниями РЗЭ характеризуются цирконы пегматитов и гранитоидов. Считается, что относительное обогащение их легкими лантаноидами в существенной мере обусловлено процессами метамиктизации. В цирконах из основных пород сумма РЗЭ варьирует от 100–1000 г/т и иногда достигает 2000 г/т. В цирконах из карбонатитов и лампроитов ΣРЗЭ редко превышает 600–700 г/т, а из кимберлитов – обычно характеризуется величинами менее 50 г/т (Belousova et al., 1998, 2002). Показателем степени обогащения цирконов тяжелыми РЗЭ является отношение (Yb/Sm)_N (Belousova et al., 2002). Для цирконов из пегматитов этот параметр составля-

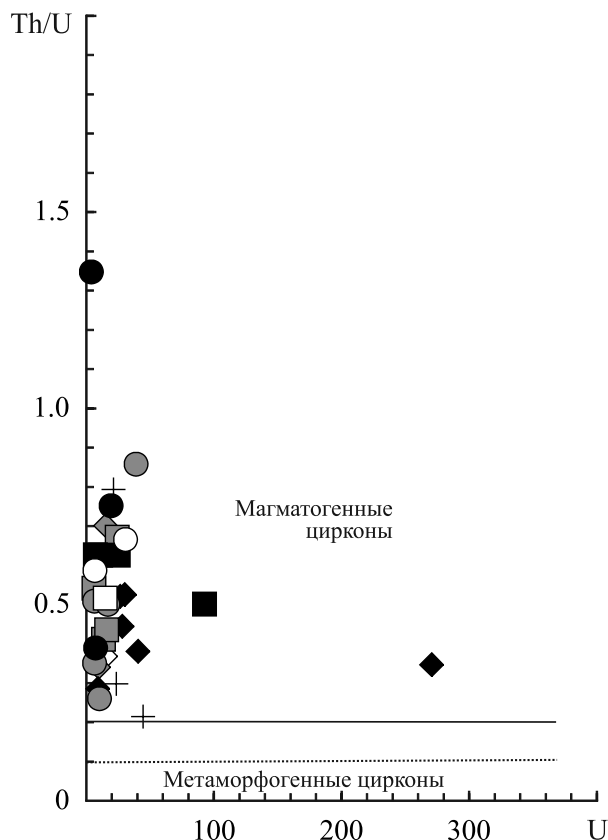


Рис. 3. Диаграмма U–Th/U (Belousova et al., 2002) и распределение на ней фигуративных точек состава обломочных цирконов из песчаников нижнего триаса Южного Урала (Маслов и др., 2016).

Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 3. The U–Th/U diagram (Belousova et al., 2002) and the distribution on it of the data points of detrital zircons from the Lower Triassic sandstones, Southern Urals (Maslov et al., 2016).

Legend – see Fig. 2.

ет ≈ 100 –300, а цирконы из кимберлитов и карбонатитов, характеризующиеся пологим относительно хондрита распределением РЗЭ, имеют значения $(Yb/Sm)_N$ от 3 до 30. Цирконы сиенитовых пегматитов обладают наиболее выраженной положительной цериевой аномалией (2–300 и более) (рис. 4); для таких кимберлитов, карбонатитов и гранитоидов свойственны значения Ce/Ce^* от 1 до 10. Цирконы кимберлитов и карбонатитов обычно лишены европиевой аномалии, или величина ее весьма небольшая, более выражена отрицательная Eu аномалия в цирконах из кислых магматических пород. Наибольшие ее величины свойственны метамиктным цирконам, кристаллизовавшимся из остаточных/поздних магм и обогащенных U, Th и РЗЭ. Корреляция между Ce/Ce^* и Eu/Eu^* обычно отсутствует (Belousova et al., 2002).

Содержание и соотношение в обломочных цирконах таких элементов, как Ta, Nb, Y, Sm, Hf и ряда других, дают возможность наметить состав/тип материнских пород и сопоставить их с данными петрографических и геохимических исследований. Считается (Belousova et al., 2002), что для распознавания цирконов из кимберлитов, карбонатитов, долеритов и пегматитов нефелин-сиенитового ряда достаточно, как правило, какой-то одной дискриминантной диаграммы, например, для долеритов это диаграммы U–Y (рис. 5), Yb/Sm–Y или Ta–Nb, тогда как для идентификации цирконов из других типов изверженных пород обычно используются сведения, полученные при анализе нескольких зависимостей.

По данным (Grimes et al., 2007), соотношения между U и Yb, Hf и U/Yb, а также Y и U/Yb позволяют разделить цирконы, кристаллизовавшиеся в океанических габброидах, континентальных гранитоидах и кимберлитах (рис. 6). Следует, однако, иметь в виду, что абсолютные концентрации U, Th и Yb в индивидуальных зернах цирконов могут в существенной степени варьировать; в то же время определенная корреляция между ними все же наблюдается. Например, средние значения U/Yb растут от океанических габброидов (0.18) к континентальным гранитоидам (1.07) и кимберлитам (2.1) (Grimes et al., 2007).

Статистическая обработка данных по содержанию элементов-примесей в цирконах из магматических пород разных типов позволяет в ряде случаев решить и обратную задачу – на основе сведений об особенностях распределения в цирконах редких и рассеянных элементов установить состав материнских типов пород (Belousova et al., 2002; и др.). Один из возможных приемов для такого рода реконструкций – использование “алгоритма CART” (Belousova et al., 2002), с помощью которого данные о содержании в конкретном зерне обломочного циркона таких элементов, как Lu, Hf, Y, U и Yb, позволяют сделать вывод о принадлежности его к одному из определенных типов пород (кимберлитам, карбонатитам, сиенитам, нефелиновым сиенитам/сиенитовым пегматитам, базальтам (габбро)/“базитам”, долеритам, гранитоидам, сиенитам/монцонитам и др.). Подробную информацию об этом алгоритме на русском языке можно найти в работе (Романюк и др., 2018). По содержанию редких и рассеянных элементов в обломочных цирконах последние могут быть отнесены к производным нескольких групп гранитоидов: 1) с содержанием $SiO_2 < 65$ мас.% (т.н. “диориты”); 2) с содержанием SiO_2 от 65 до 75 мас.% (т.н. “граниты”); и 3) с содержанием оксида кремния более 75 мас.% (т.н. “лейкограниты”). Как отмечено в упомянутой работе (там же, с. 9, 10), “... прогноз типа родительских пород носит статистический характер, прогноз для индивидуального циркона пока не очень надежен.

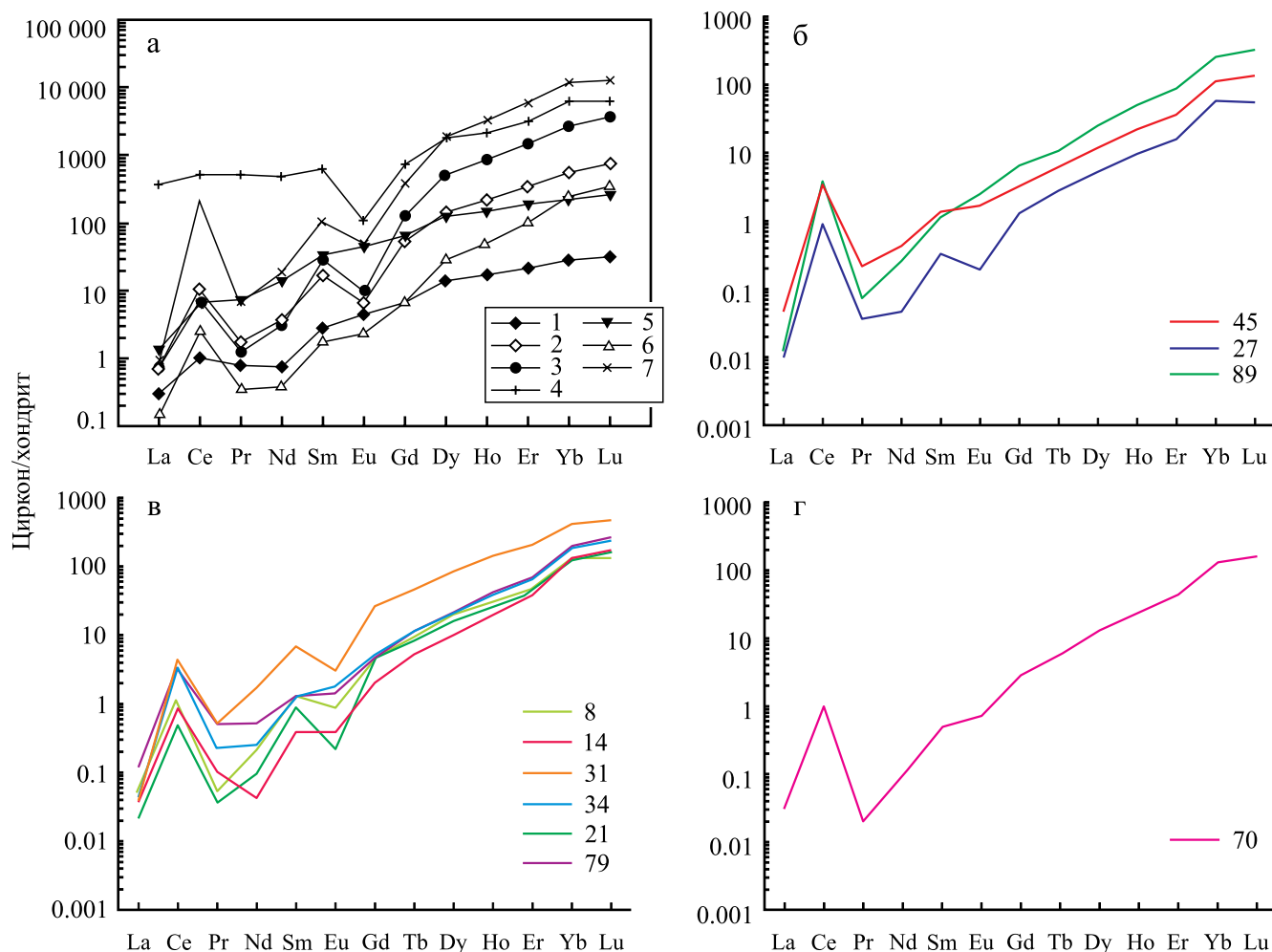


Рис. 4. Нормированные по хондриту спектры РЗЭ в цирконах из разных типов магматических пород (а) (Belousova et al., 2002) и распределение нормированных по хондриту лантаноидов в обломочных цирконах вендского (б), девонского (в) и пермского (г) возраста, присутствующих в песчаниках нижнего триаса Южного Урала (Маслов и др., 2016).

Цирконы: 1 – из кимберлитов, 2 – из лампроитов, 3 – из долеритов, 4 – из гранитоидов, 5 – из карбонатитов, 6 – из сиенитов, 7 – из сиенитовых пегматитов. Номера кривых на “б”–“г” соответствуют номерам зерен, указанным в работе (Маслов и др., 2016).

Fig. 4. Normalized to chondrite REE spectra in zircons from different types of igneous rocks (a) (Belousova et al., 2002) and the distribution of lanthanides normalized to chondrite in detrital zircons of the Vendian (б), Devonian (в) and Permian (г) ages, the Lower Triassic sandstones of the Southern Urals (Maslov et al., 2016).

Zircons: 1 – from kimberlites, 2 – from lamproites, 3 – from dolerites, 4 – from granitoids, 5 – from carbonatites, 6 – from syenites, 7 – from syenitic pegmatites. The numbers of the curves on parts “б”–“г” correspond to the numbers of grains in (Maslov et al., 2016).

В связи с этим содержательно интерпретируются только валовые параметры кремнекислотности для больших групп цирконов (“граниты” и “диориты”) и статистически представительные группы специфических цирконов, родственность происхождения которых по особенностям содержания элементов-примесей подтверждается также сходством U-Pb значений возраста или Hf-изотопией”.

В статье Т.В. Романюк с соавторами (2018) приведены кроме того результаты комплексного изучения обломочных цирконов из песчаников чудин-

ской и навышской подсистем айской свиты нижнего рифея Башкирского мегантиклинория. Здесь детально рассмотрены почти все современные приемы и методы такого рода реконструкций – проанализированы спектры U-Pb-изотопных возрастов, распределение редких и рассеянных элементов (в том числе с использованием “алгоритма CART”) и Lu-Hf изотопная систематика цирконов. Мы же приведем пример анализа данных о распределении редких и рассеянных элементов с помощью “алгоритма CART” только шести зерен обломочных

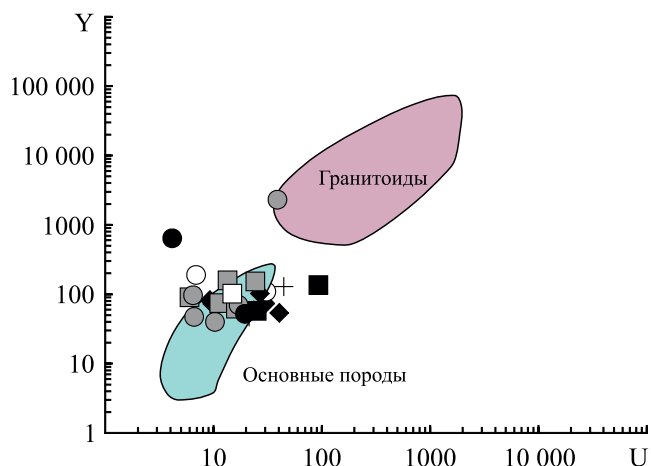


Рис. 5. Диаграмма U–Y в редакции (Andersen et al., 2011) и положение на ней точек состава обломочных цирконов из песчаников нижнего триаса Южного Урала, по (Маслов и др., 2016).

Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 5. The U–Y diagram in (Andersen et al., 2011) version and the position on it of the data points of detrital zircons from the Lower Triassic sandstones, Southern Urals, according to (Maslov et al., 2016).

Legend – see Fig. 2.

цирконов из песчаников навьшской подсвиты айсской свиты и зигальгинской свиты типового разреза рифея Башкирского мегантиклинория, используя для этого аналитические материалы, любезно предоставленные Н.Б. Кузнецовым и Т.В. Романюк (ГИН РАН, г. Москва) (табл. 1).

Оценивая шаг за шагом содержания в указанных зернах Lu, Hf, Y, затем опять Hf или U, а в случае необходимости и Yb, мы можем видеть, что зерно 1 (U–Pb возраст 1.95 млрд лет) попало в осадок за счет разрушения диоритов (рис. 7). Зерно 2 (возраст 3.26 млрд лет) из песчаников того же стратиграфического уровня произошло из долеритов. Материнскими породами для зерна 3 (возраст 2.85 млрд лет) являлись, по всей видимости, карбонаты. Напротив, все взятые нами в качестве примеров обломочные цирконы разного возраста (зерно 4 – 1.96 млрд лет, зерно 5 – 2.76 млрд лет и зерно 6 – 2.10 млрд лет) из песчаников зигальгинской свиты попали в осадок предположительно за счет размыва одного типа материнских пород, а именно гранитоидов с содержанием $\text{SiO}_2 < 65$ мас. %, т.е. диоритов. Несколько иные выводы получаются в результате анализа распределения указанных выше зерен цирконов на диаграмме Ti–ΣPЗЭ (рис. 8), словно бы подтверждая справедливость слов Е.А. Белосовой и ее соавторов (Belousova et al., 2002) о необходимости для достижения непротиворечивых результатов использования во многих случаях не одной, а нескольких дискриминантных диаграмм.

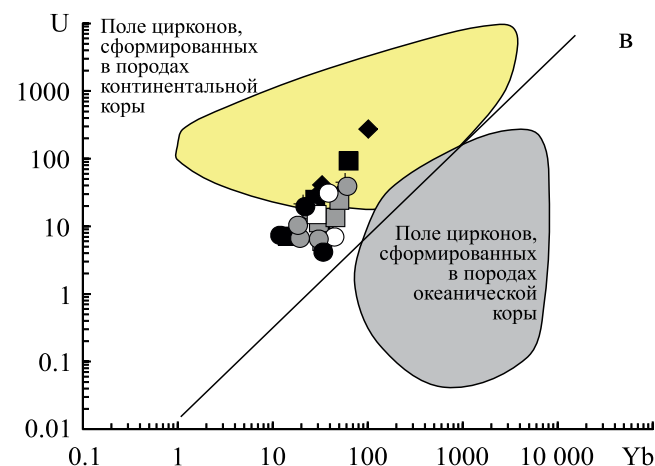
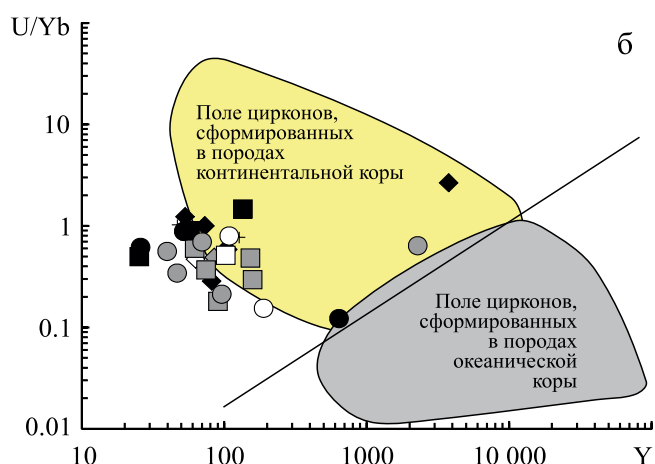
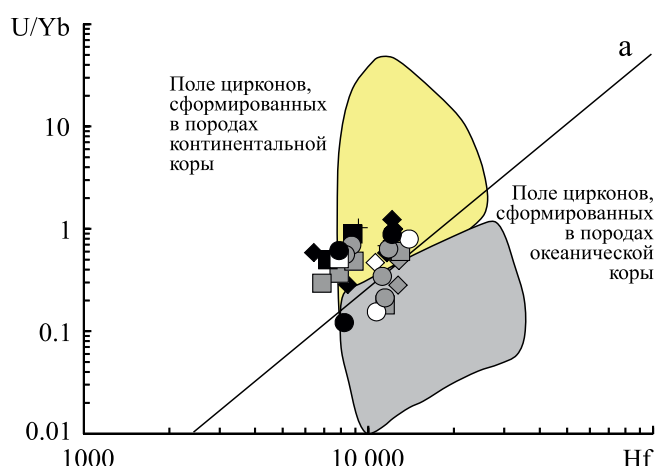


Рис. 6. Положение точек состава обломочных цирконов из песчаников нижнего триаса Южного Урала на диаграммах Hf–U/Yb (а), Y–U/Yb (б) и Yb–U (в) (Grimes et al., 2007).

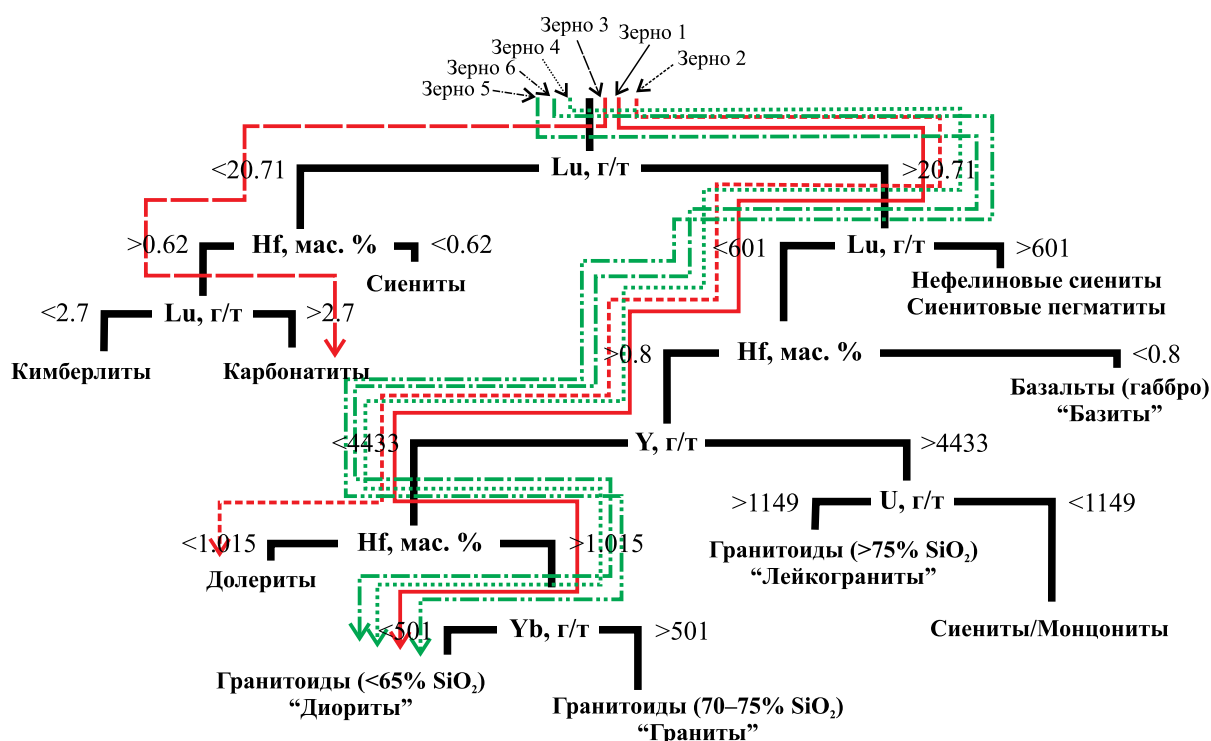
Условные обозначения – см. рис. 2.

Fig. 6. Position of data points of detrital zircons from the Lower Triassic sandstones, the Southern Urals, on the Hf–U/Yb (a), Y–U/Yb (б) and Yb–U (в) diagrams (Grimes et al., 2007).

Legend – see Fig. 2.

Таблица 1. Содержание ряда редких и рассеянных элементов в обломочных цирконах айской и зигальгинской свит рифея Башкирского мегантиклинория**Table 1.** The content of rare and scattered elements in the clastic zircons of the Riphean Ai and Zigalga suites in Bashkir meganticlinorium

Стратон, свита	U-Pb-изотопный возраст зерна обломочного циркона, млрд лет	Номер анализа	Номер зерна на рис. 7 и 8	Y, г/т	Yb, г/т	Lu, г/т	Hf, мас. %	Ti, г/т	Сумма РЗЭ, г/т
Нижний рифей, айская	1.95	020-1-18-21	1	300.14	127.06	23.55	1.22	2.23	1485.16
	3.20	100-1-46-72	2	571.29	171.63	30.08	0.95	7.60	1153.89
	2.85	100-1-47-87	3	288.97	89.59	16.50	1.03	1.99	2231.99
Средний рифей, зигальгинская	1.96	K13_019-018	4	1119.8	357.26	65.86	2.04	15.54	751.44
	2.76	K13_019-049	5	691.35	226.92	44.07	1.91	6.64	501.49
	2.10	K13_019-135	6	929.89	309.46	56.55	1.58	32.16	695.05

**Рис. 7.** Пример реконструкции возможного состава материнских пород для зерен обломочных цирконов, выделенных из песчаников навашской подсвиты айской свиты нижнего рифея (зерна 1–3) и зигальгинской свиты среднего рифея (зерна 4–6), с помощью “алгоритма CART”.**Fig. 7.** An example of the reconstruction of the possible composition of parent rocks for detrital zircons from the sandstones of the Navysh Subformation of the Lower Riphean Ai Formation (grains 1–3) and the Middle Riphean Zigalga Formation (grains 4–6), using the CART2000 classification tree.

Интересные результаты могут быть получены и при совместном анализе данных по U-Pb изотопному возрасту обломочных цирконов и изотопному составу гафния. Например, в публикациях (Andersen et al., 2002, 2004) показано, что мезо- и палеопротерозойские детритовые цирконы из метасадочных пород Норвегии и Швеции характери-

зуются различным изотопным составом Hf и, следовательно, представляют собой комплексы пород, сформированные в разных тектонических обстановках. Работы подобного плана в последние годы появились и для ряда объектов, расположенных на территории России (Романюк и др., 2013, 2014; Туркина и др., 2014; и др.). Так, анализ Lu-Hf-изотопной

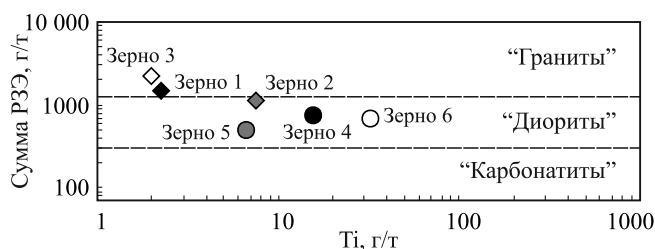


Рис. 8. Положение точек состава обломочных цирконов из песчаников навашской подсвиты айской свиты (зерна 1–3) и зигальгинской свиты среднего рифея (зерна 4–6) на диаграмме Ti–ΣРЭ.

Fig. 8. Position of the data points of detrital zircons from the sandstones of the Navysh Subformation of the Lower Riphean Ai Formation (grains 1–3) and the Middle Riphean Zigalga Formation (grains 4–6) on the Ti–REE diagram.

системы обломочных цирконов из песчаников той же навашской подсвиты айской свиты Башкирского мегантиклинория выявил широкий разброс величины ϵ_{Hf} (+7.1...–20.2). Положительные значения ϵ_{Hf} в кристаллах указывают на то, что материнскими по отношению к ним породами были мантийные магматические образования, отрицательные величины ϵ_{Hf} означают участие древнего корового материала в субстрате, при плавлении которого сформировались материнские магмы (Griffin et al., 2000, 2006; Belousova et al., 2006, 2010; Романюк и др., 2014). Пример построения диаграмм модельного возраста T_{DM}^{C} , оцененных по параметрам Lu–Hf изотопной системы в зависимости от $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраста обломочных цирконов (навашская подсвита айской свиты), приведен на рис. 9.

Сопоставление на диаграмме U–Pb возраст– ϵ_{Hf} , восходящей к классическим работам (Patchett, Tatsumoto, 1980; Patchett et al., 1981; Patchett, 1983), фигуративных точек цирконов из песчаников навашской подсвиты айской свиты с известными значениями возраста и изотопно-геохимическими характеристиками кристаллических комплексов Волго-Уральской области Восточно-Европейской платформы, по данным, приведенным в статье (Романюк и др., 2018), показало, что точки обломочных цирконов не имеют статистически значимых совпадений с полями различных комплексов Бакалинского блока и колыванскими эндербитами. Установлено также, что ряд точек обломочных цирконов локализованы на указанной диаграмме в поле составов пород южной части Волго-Сарматского коллизионного орогена. Еще один вывод обсуждаемого исследования состоит в том, что "...фигуративные точки, соответствующие палеопротерозойскому возрасту (1.9–2.2 млрд лет), с размахом ... значений ϵ_{Hf} от максимальных положительных ... до отрицательных, соответствующих

модельному возрасту ... до 3.9 млрд лет ... (рециклинг палеоархейской коры), выстраиваются в вертикально вытянутые области ... [Эти] области ... интерпретируются как отражающие результат смешения в разных пропорциях ювенильного и изотопно-зрелого корового материала, которое может происходить в длительно действующих вулканических дугах на окраинах континентов и/или в коллизионных [палеопротерозойских] орогенах" (там же, с. 19–23) (см. рис. 9). Таким образом, авторы цитируемой работы считают, что, по крайней мере, часть обломочных цирконов в песчаниках базальных уровней типового разреза рифея представляют собой продукты разрушения кристаллических комплексов пород Волго-Сарматского орогена.

ОБЛОМОЧНЫЕ АПАТИТЫ: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В публикации (Abdullin et al., 2016) со ссылкой на работы (Dill, 1994; Morton, Hallsworth, 1999; Belousova et al., 2002; Piccoli, Candela, 2002; Morton, Yaxley, 2007; Chu et al., 2009; Jafarzadeh et al., 2014; и др.) показано, что апатит, обычный для многих магматических, метаморфических и осадочных пород минерал, содержит широкий спектр редких и рассеянных элементов, замещающих и анионные, и катионные позиции. Соответственно, геохимические особенности апатита могут дать информацию о составе тех пород, в которых он находился до попадания в осадок. Существенное значение имеет здесь и то, что указанный минерал довольно устойчив при транспортировке и постседиментационных трансформациях вмещающих пород. Однако стоит учитывать, что его стабильность тем не менее несколько варьирует в зависимости от окружающей среды (Pettijohn, 1941; Morton, Hallsworth, 1999; Morton, 2012).

Установлено, что спектры распределения РЭ в апатите контролируются главным образом составом пород, в которых он формировался (Belousova et al., 2002). В случае апатитов из магматических пород наклон нормированных по хондриту кривых распределения РЭ, выраженный как $(\text{Ce/Yb})_{\text{N}}$, уменьшается от ультраосновных пород (включая мантийные производные и карбонатиты) через промежуточные разности к существенно фракционированным (граниты и пегматиты) (Belousova et al., 2002; Chu et al., 2009; и др.). Большинство апатитов из мигматитов и метаморфических пород имеют почти плоское распределение РЭ или деплетированы легкими лантаноидами ($(\text{Ce/Yb})_{\text{N}} \leq 1$) Morton, Yaxley, 2007; Hammerli et al., 2014; и др.), хотя для апатитов из некоторых очковых гнейсов и гранулитов также может быть свойственно обогащение ЛРЭ (Bingen et al. 1996; Bea, Montero, 1999; и др.).

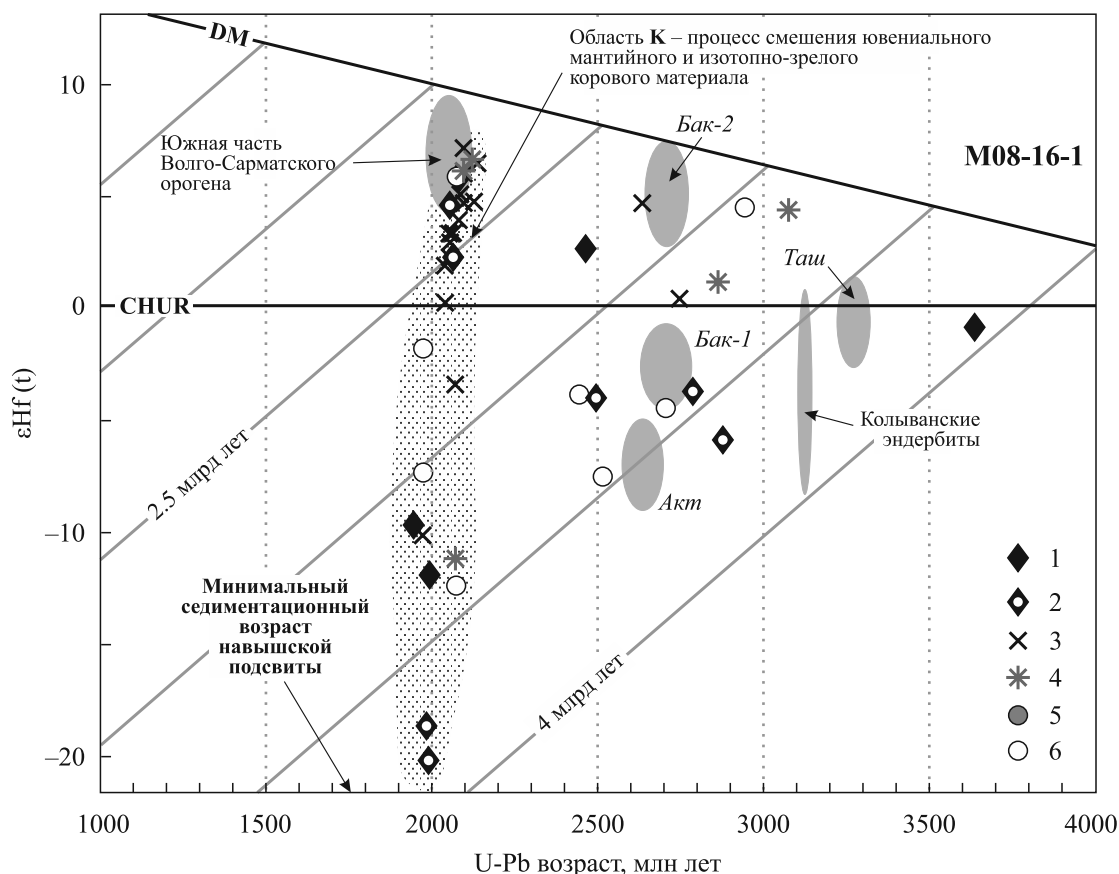


Рис. 9. Диаграмма U-Pb возраст– ε_{Hf} и положение на ней фигуративных точек состава обломочных цирконов навашской подсвиты айской свиты нижнего рифея Башкирского мегантиклинория (Романюк и др., 2014).

Зерна с характеристиками, свойственными: 1 – цирконам из “карбонатитов”; 2 – крупным прозрачным вишневым цирконам из “карбонатитов”; 3 – цирконам из “диоритов”; 4 – прозрачным желтым цирконам из “диоритов”; 5 – цирконам из “гранитов”; 6 – данных по содержанию редких и рассеянных элементов в цирконах нет.

Серые эллипсы – поля фигуративных точек возраста и T_{DM} , оцененных по Sm-Nd изотопной системе, для Бакалинского блока Волго-Урала и (комплексы: Таш – Ташлярский, Бак-1, Бак-2 и Акт – Актанышский), по (Bogdanova et al., 2010), для южной части Волго-Сарматского орогена, спаявшего Волго-Уралою и Сарматия (“поле BCO”), по (Bibikova et al., 2009), для колыванских эндебритов, по (Bogdanova et al., 2013).

Fig. 9. The U-Pb age– ε_{Hf} diagram and the position on it of the data points of the detrital zircons of the Navysh Sub-formation of the Lower Riphean Ai Formation, the Bashkir meganticlinorium (Romanyuk et al., 2014).

Grains with characteristic of: 1 – zircons from “carbonatites”; 2 – large transparent cherry zircons from “carbonatites”; 3 – zircons from “diorites”; 4 – transparent yellow zircons from “diorites”; 5 – zircons from “granites”; 6 – no data on the content of trace elements in zircons.

Gray ellipses are the fields of data points of ages and T_{DM} , estimated by the Sm-Nd isotopic system, for the Bakalinsky block of the Volga-Uralia (complexes: Tash – Tashlyarsky, Bak-1, Bak-2 and Akt – Aktanyshsky), according to (Bogdanova et al., 2010), for the southern part of the Volga-Sarmatian orogen, which soldered the Volga-Uralia and Sarmatia (“BCO field”), according to (Bibikova et al., 2009), for Kolyvan enderbites, according to (Bogdanova et al., 2013).

Сумма РЗЭ в апатитах из кислых, средних-основных а также щелочных магматических пород является весьма важным индикатором, как это было показано авторами публикации (Fleischer, Altschuler, 1986), предложившими дискриминантную диаграмму $(\text{La} + \text{Ce} + \text{Pr})/\Sigma\text{РЗЭ}$ (мас. %)– La/Nd (рис. 10). В соответствии с выделенными на указанной диаграмме полями апатиты кислых магматических пород характеризуются значениями $(\text{La} + \text{Ce} + \text{Pr})/\Sigma\text{РЗЭ} < 52$. Апатиты из магматиче-

ских пород среднего и основного состава обладают несколько большими величинами данного параметра (52–68), тогда как апатиты из щелочных пород имеют значения $(\text{La} + \text{Ce} + \text{Pr})/\Sigma\text{РЗЭ} > 68$.

Сопоставление составов обломочных апатитов с составом этого минерала в ряде референтных объектов (гранитах S-типа, кислых мигматитах, орто- и парагнейсах гранулитовой фации, метасадочных породах средних и высоких ступеней метаморфизма и др.) и, соответственно, ре-

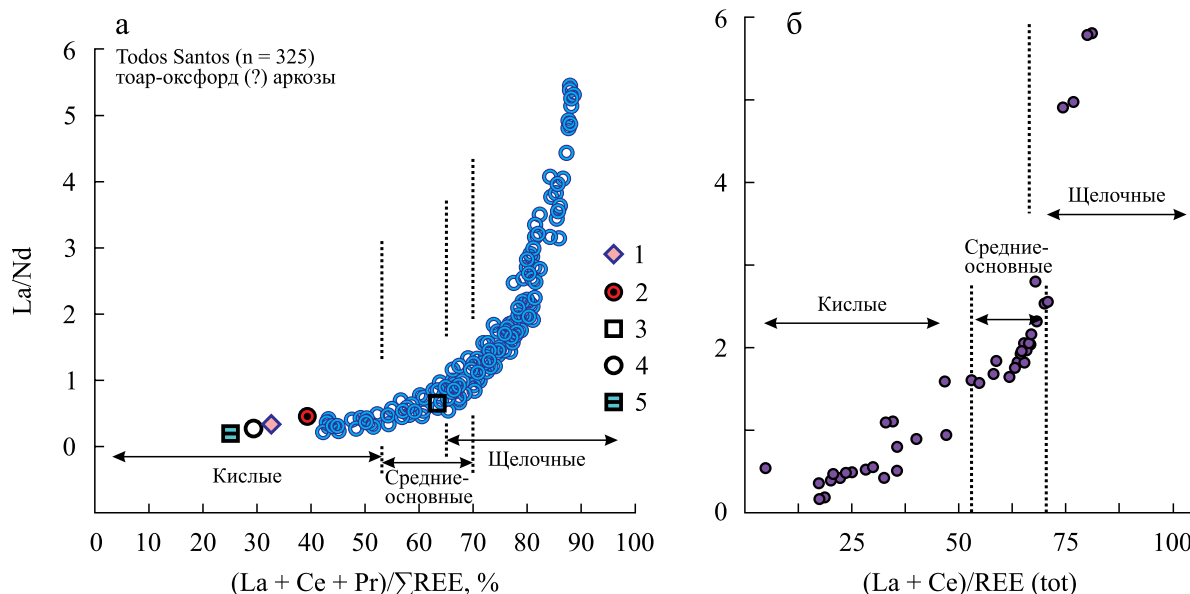


Рис. 10. Диаграмма $(La + Ce + Pr)/\Sigma REE$ (мас. %)– La/Nd (Fleischer, Altschuler, 1986) и положение на ней фигуративных точек состава обломочных апатитов из аркозовых песчаников формации Todos Santos (тоар-оксфорд, юго-восточная Мексика) (Abdullin et al., 2016) (а) и кварцитовидных песчаников карьерной свиты неопротерозоя Енисейского кряжа (Gillespie et al., 2018) (б).

1 – граниты S-типа с $SiO_2 > 70$ мас. % (Sha, Chappell, 1999; Chu et al., 2009); 2 – кислые мигматиты (Bea et al., 1994; Nutman, 2007); 3 – орто- и парагнейсы гранулитовой фации (Bingen et al., 1996; Bea, Montero, 1999; Nutman, 2007); 4 – метасадочные породы средних и высоких ступеней метаморфизма (Ayres, Harris, 1997; Bea, Montero, 1999; Nutman, 2007); 5 – эклогиты (Sassi et al., 2000; Hermann, 2002; Spandler et al., 2003; Guo et al., 2013).

Fig. 10. The $(La + Ce + Pr)/REE$ (wt %)– La/Nd (Fleischer, Altschuler, 1986) and the position on it of the data points of the detrital apatites from the arcose sandstones of the Todos Santos Formation (Toar-Oxford, Southeast Mexico) (Abdullin et al., 2016) (a) and from the quartzitic sandstones of the Neoproterozoic Kar'ernaya Formation of the Yenisei ridge (Gillespie et al., 2018) (b).

1 – S-type granites with $SiO_2 > 70$ wt % (Sha, Chappell, 1999; Chu et al., 2009); 2 – acid migmatites (Bea et al., 1994; Nutman, 2007); 3 – ortho- and paragneisses of granulitic facies (Bingen et al., 1996; Bea, Montero, 1999; Nutman, 2007); 4 – metasedimentary rocks of middle and high stages of metamorphism (Ayres, Harris, 1997; Bea, Montero, 1999; Nutman, 2007); 5 – eclogites (Sassi et al., 2000; Hermann, 2002; Spandler et al., 2003; Guo et al., 2013).

конструкцию состава материнских для них пород можно выполнить и с помощью диаграммы Th–U (Dill, 1994) (рис. 11). Такой выбор элементов частично обусловлен, как указывают авторы работы (Abdullin et al., 2016), различным поведением их в магматических и метаморфических процессах. В целом содержание Th меньше содержания U в апатитах, формировавшихся в высокофракционированных изверженных и метаморфических породах (особенно в метапелитах), что, возможно, связано с кристаллизацией монацита – основного концентратора Th (Belousova et al., 2001, 2002; Morton, Yaxley, 2007; Nutman, 2007; Cao et al., 2012).

В публикации (Belousova et al., 2002) на основе экспериментальных геохимических данных о составе апатита из различных типов интрузивных пород предложены такие дискриминантные диаграммы, как Y–Sr и ΣREE (мас. %)– $(Ce/Yb)_N$, которые, по мнению (Morton, Yaxley, 2007; Jafarzadeh et al., 2014), также могут быть использованы

при реконструкции состава пород питающих провинций (рис. 12, 13). На диаграммах с учетом данных, полученных в работах (Chu et al., 2009; Tang et al., 2012; Jafarzadeh et al., 2014), показаны дополнительно поля составов апатитов, кристаллизующихся в основных и средних, а также средних и кислых вулканических породах, за исключением риолитов. Как отмечено в (Abdullin et al., 2016), весьма вероятно, что апатиты, кристаллизовавшиеся в средних и кислых вулканических и интрузивных породах одной и той же магматической системы, содержат близкие концентрации Sr и Y (Piccoli, Candela, 2002; Chu et al., 2009). Тем не менее весьма высокие содержания Sr (более 1000–1500 г/т) могут встречаться и в апатитах из основных-средних и средних вулканитов (Jafarzadeh et al., 2014; и др.), что требует дополнительного изучения (Abdullin et al., 2016).

По мнению авторов работ (Belousova et al., 2002; Chu et al., 2009; Cao et al., 2012; и др.), содержания

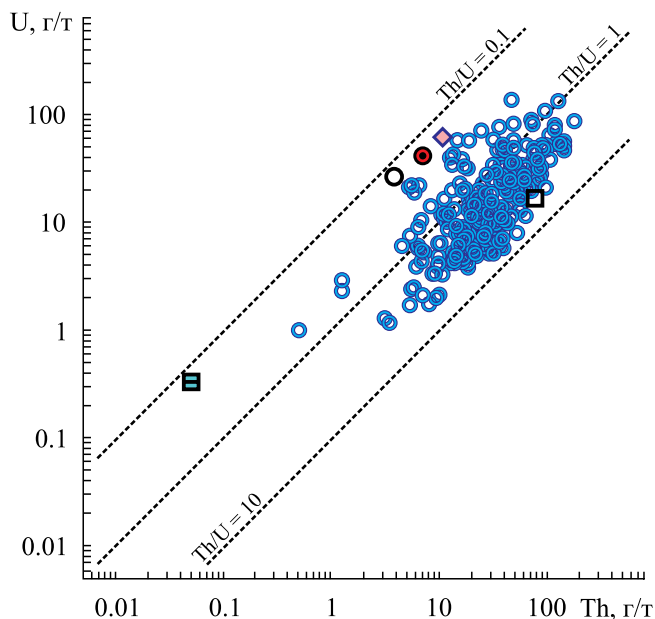


Рис. 11. Диаграмма Th–U (Dill, 1994) и положение на ней фигуративных точек состава обломочных апатитов из песчаников формации Todos Santos (юго-восточная Мексика) (Abdullin et al., 2016) и ряда референтных объектов.

Условные обозначения – см. рис. 10.

Fig. 11. The Th–U plot (Dill, 1994) and the position on it the data points of the detrital apatites from the sandstones of the Todos Santos Formation (South-eastern Mexico) (Abdullin et al., 2016) and a number of reference objects.

Legend – see Fig. 10.

Sr в апатитах снижаются, а концентрации Y растут в процессе магматического фракционирования. Высокие содержания Sr типичны для апатитов, кристаллизовавшихся в основных и ультраосновных породах, а также карбонатитах (Belousova et al., 2002; Chakhmouradian et al., 2002; Tang et al., 2012; Jafarzadeh et al., 2014). Некоторые апатиты также значительно обогащены как Sr (более 2000 г/т), так и Y (более 2500–3000 г/т), что не характерно для апатитов магматических пород (Belousova et al., 2002; и др.). Считается, что такие минералы кристаллизовались в сильно фракционированных кислых породах – гранитах и пегматитах (Sha, Chappell, 1999; Belousova et al., 2002; Cao et al., 2012; и др.), подвергшихся метаморфизму высоких давлений. Апатиты из мигматитов и пород средних и высоких ступеней метаморфизма (включая метаосадочные породы, а также ультраосновные и основные породы, испытавшие высокие давления) также располагаются в полях составов апатитов гранитоидов и кислых пегматитов вследствие свойственных им весьма низких величин $(Ce/Yb)_N$ (Tribuzio et al., 1996; Ayres, Harris, 1997; Sassi et al.,

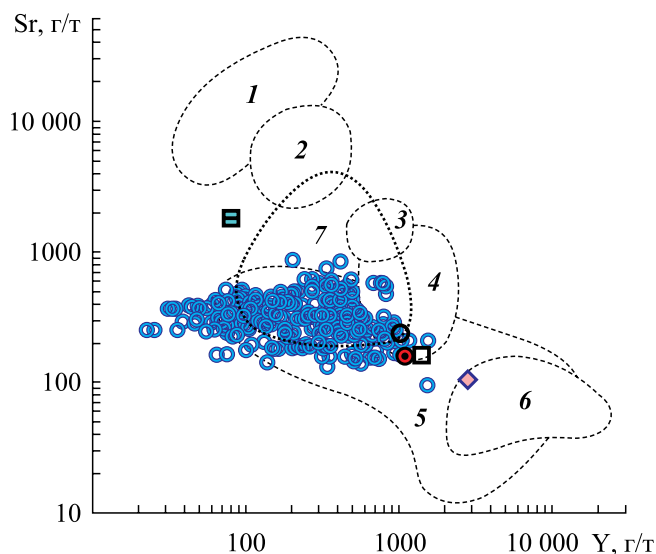


Рис. 12. Диаграмма Y–Sr (Belousova et al., 2002) с дополнениями и положение на ней точек состава обломочных апатитов из песчаников формации Todos Santos (юго-восточная Мексика) (Abdullin et al., 2016) и ряда референтных объектов.

Поля апатитов: 1 – из лерцолитов, 2 – из карбонатитов, 3 – из пироксенитов, 4 – из основных пород, 5 – из гранитоидов, 6 – из гранитных пегматитов, 7 – из основных-средних и средних-кислых вулканических пород, за исключением риолитов. Остальные условные обозначения – см. рис. 10.

Fig. 12. The Y–Sr plot (Belousova et al., 2002) with additions and the position on it of the data points of detrital apatites from the sandstones of the Todos Santos Formation (South-eastern Mexico) (Abdullin et al., 2016) and a number of reference objects.

Fields of apatites: 1 – from lherzolites, 2 – from carbonatites, 3 – from pyroxenites, 4 – from the mafic rocks, 5 – from granitoids, 6 – from granite pegmatites, 7 – from volcanic rocks, basic-medium and medium-acid composition, without rhyolites. Other symbols – see Fig. 10.

2000; Spear, Pyle, 2002; Morton, Yaxley, 2007; Zhang et al., 2008; Hammerli et al., 2014; и др.).

В статье (Gillespie et al., 2018) на большом и разнообразном фактическом материале показано, что зерна обломочного апатита в верхнедокембрийских породах Енисейского кряжа принадлежат двум основным популяциям (по U–Pb-изотопному возрасту) – 880–720 и ≈ 1800 млн лет. Первая отвечает, по мнению авторов, неопротерозойскому магматизму в пределах собственно Енисейского кряжа, вторая связана с процессами магматизма во время “сборки” Сибирского кратона. Примечательно, что количество апатитов неопротерозойского возраста, многие из которых имеют химический состав, сходный с составом апатитов из основных магматических пород, в песчаниках значительно больше количества цирконов того же воз-

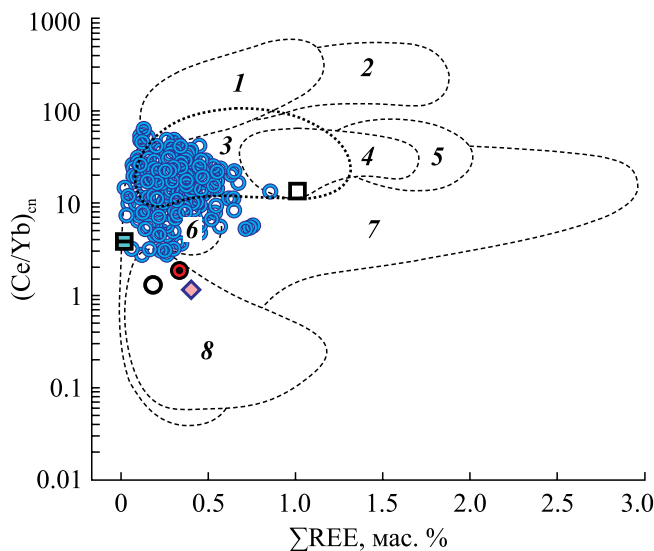


Рис. 13. Диаграмма ΣREE , мас. %– $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ (Belousova et al., 2002) с дополнениями и положение на ней точек состава обломочных апатитов из песчаников формации Todos Santos (юго-восточная Мексика) (Abdullin et al., 2016) и ряда референтных объектов.

Поля апатитов: 1 – из лерцолитов; 2 – из карбонатов; 3 – из вулканических пород, основных-средних и средних-кислых, за исключением риолитов; 4 – из пироксенитов; 5 – ларвикитов/щелочных сиенитов; 6 – из долеритов; 7 – из гранитоидов; 8 – из гранитных пегматитов. Остальные условные обозначения – см. рис. 10.

Fig. 13. The $\Sigma\text{REE}(\text{wt } \%) - (\text{Ce}/\text{Yb})_N$ diagram (Belousova et al., 2002) with additions and the position on it of the data points of detrital apatites from the sandstones of the Todos Santos Formation (Southeastern Mexico) (Abdullin et al., 2016) and a number of reference objects.

Fields of apatites: 1 – from lherzolites; 2 – from carbonates; 3 – from volcanic rocks, basic intermediate and intermediate-felsic rocks, with the exception of rhyolites; 4 – from pyroxenites; 5 – from larvicites/alkaline syenites; 6 – from dolerites; 7 – from granitoids; 8 – from granite pegmatites. Other symbols – see Fig. 10.

растного интервала. Все сказанное позволяет считать, что привлечение к исследованию состава пород в источниках сноса данных по обломочным апатитам, дающих возможность обнаруживать на палеоводосборах “мафические магматические источники”, значительно дополняет сведения, получаемые по обломочным цирконам.

ВЫВОДЫ

Приведенные выше материалы, как и экспоненциально растущее число публикаций на эту тему в зарубежной и отечественной литературе, показывают, что данные об U-Pb изотопном возрасте об-

ломочных цирконов, а также результаты исследования систематики в них ряда редких и рассеянных элементов представляют собой весьма важный инструмент для решения широкого круга задач современной геологии. В последние годы для решения этих проблем привлекается и исследование обломочных апатитов. Такой комплексный взаимодополняющий подход, несомненно, способен позволить по-иному, чем ранее, подойти к идентификации возраста и состава пород-источников обломочного материала, перейти к построению современных моделей эволюции питающих провинций. Обобщенные данные о геохимических и геохронологических методах исследования апатита и циркона, которые были описаны выше, приведены в табл. 2.

Однако на этом пути нас подстерегают существенные методические проблемы. Связано это, прежде всего, с тем, что большинство устойчивых к внешним воздействиям аксессуаров способно многократно вовлекаться в осадочный процесс. В значительном числе случаев тот или иной кристалл циркона, сформировавшегося 2.6 или 2.8 млрд лет назад, прежде чем попасть в осадок/осадочную породу с возрастом 1.7 или 1.4 или 0.9 млрд лет, из которой мы его извлекли и успешно датировали в лучшем аналитическом центре мира, мог быть многократно вовлечен в процессы литификации, метаморфизма и, возможно, даже анатексиса, не потеряв при этом “памяти” о дате своего рождения. И что мы скажем о таком зерне обломочного циркона, присутствующем, например, в аркозовых песчаниках нижней части зильмердакской свиты типового разреза верхнего рифея Башкирского мегантиклинория? Понятно, что он не попал туда непосредственно при размыве неоархейских блоков фундамента Восточно-Европейской платформы.

Ранее (Маслов и др., 1998) мы уже отмечали, что проведенное многими специалистами изучение минерального состава терригенных образований верхнего докембрия Южного Урала позволило установить присутствие в породах большинства литостратиграфических подразделений этого интервала достаточно контрастных ассоциаций аксессуарных минералов при наличии “сквозных” разностей последних – циркона, турмалина, апатита и рутила. Подобный состав аксессуаров свидетельствует, как известно (Петтиджон и др., 1976), о неоднократном переотложении кластики до ее окончательного захоронения. Было показано, что в разрезе рифея наблюдается смена аксессуарно-минералогических ассоциаций и ряда характеристик отдельных минералов (так, для отложений нижнего рифея характерен темно-розовый и малиново-красный циркон, и появление таких кристаллов в песчаниках зигальгинской свиты среднего рифея на северо-востоке Башкирского поднятия интерпретируется как результат перемыва подстила-

Таблица 2. Сводная таблица наиболее распространенных геохимических и геохронологических методов исследования апатитов и цирконов, по (von Eynatten, Dunkl, 2012), с дополнениями авторов**Table 2.** A summary table of the most common geochemical and geochronological methods for the study of apatite and zircon, according to (von Eynatten, Dunkl, 2012), with the additions of the authors

Методы		Комментарий	Ссылки
Апатит			
Геохимия	Микроэлементы	Идентификация источников сноса	Morton, Yaxley, 2007; Chu et al., 2009; Jafarzadeh et al., 2014
	PЗЭ	Идентификация типа пород источников	Belousova et al., 2002; Hammerli et al., 2014; Abdullin et al., 2016
	Th-U	Идентификация источников сноса	Dill, 1994; Nutman, 2007; Cao et al., 2012
Высокотемпературные хронометры	U-Pb	T_c : $\approx 450-550^\circ\text{C}$	*Chew et al., 2011; Gillespie et al., 2018
Циркон			
Геохимия	PЗЭ, микроэлементы	Идентификация источников сноса	Belousova et al., 2002; Grimes et al., 2007; Романюк и др., 2018
	Lu-Hf-изотопная система	Идентификация источников сноса и параметров процессов кристаллизации	Belousova et al., 2002; Романюк и др., 2014; Туркина и др., 2014
	Изотопы Hf	Модельный возраст	*Knudsen et al., 2001
	U/Th	Идентификация метаморфических/магматических источников	Belousova et al., 2002; Hartmann, Santos, 2004
Высокотемпературные хронометры	U-Pb	T_c : магматическая кристаллизация Понимание глобальных и субглобальных процессов формирования континентальной коры	Кузнецов и др., 2017; Ивлева и др., 2018 Condie et al., 2005; Safonova et al., 2010

*См. в (von Eynatten, Dunkl, 2012).

*See in (von Eynatten, Dunkl, 2012).

ющих осадочных толщ нижнего рифея). Хорошая окатанность обломочных зерен циркона, турмалина, рутила, выделенных из песчаников навыйской (базальной) подсвиты айской свиты основания нижнего рифея, и присутствие следов истирания на их поверхности указывают на многократное переотложение перед окончательным захоронением. Хорошая окатанность кристаллов циркона, апатита и рутила свойственна и песчанникам зигальгинской свиты среднего рифея. В песчанниках машакской свиты (базального подразделения среднего рифея в центральной части Башкирского мегантиклинория) среди тяжелой фракции преобладают акцессорные минералы – продукты размыва кислых магматических пород: циркон, апатит, турмалин и слюда. Они также хорошо окатаны, что тоже может быть следствием, по представлениям Н.Д. Сергеевой (1989) и некоторых других исследователей, вовлеченности их в несколько циклов седиментации. Значительная окатанность акцессорных минералов в псаммитах зильмердакской свиты основания верхнего рифея также указывает на неоднократное переотложение их перед окончательным захоронением. Наблюдается большое сходство между терригенно-минералогической ассоциацией инзерского уровня верхнего рифея

и комплексом акцессориев в породах лемезинской подсвиты зильмердакской свиты. По мнению Н.Д. Сергеевой, породы ашинской серии верхнего венда сформированы преимущественно за счет размыва осадочных комплексов верхнего рифея, что следует из сходства состава и типоморфных признаков акцессорных минералов ашинской серии, с одной стороны, и укской, инзерской и зильмердакской свит каратауской серии верхнего рифея, с другой.

Выполненный нами анализ особенностей распределения U-Pb-изотопных возрастов обломочных цирконов в породах рифтогенных ассоциаций уралид различных сегментов Уральского складчатого пояса показал, что для Южного, Среднего и Северного Урала главными поставщиками кластики для них являлись, по всей видимости, комплексы древних доменов Восточно-Европейской платформы (т. е. источники в основном удаленные) и магматические образования доуралид – локальные источники (Маслов и др., 2018). Рифтогенные ассоциации уралид Приполярного и Полярного Урала сформированы преимущественно за счет размыва местных/локальных источников (позднерифейско-вендских островодужных и орогенных магматических комплексов Протоуралид-Тиманид). Суще-

ственную роль в породах базальных уровней урала играют обломочные цирконы рифейского возраста, источниками которых могли быть комплексы пород Свеко-Норвежского орогена и кадомид Скифско-Туранской плиты, внутриплитные магматические образования и метаморфические комплексы, а также блоки пород, аккрегированных к окраине Восточно-Европейской платформы в позднем докембрии–кембрии и вновь отторгнутых и удаленных от нее в ходе ордовикского рифтогенеза и спрединга. В целом же базальные комплексы урала сформированы как за счет далеких, так и местных/локальных источников обломочного материала, вклад которых в формирование обломочных образований, несмотря на появление качественно новой информации об U-Pb изотопном возрасте обломочных цирконов, их Lu-Hf систематике и особенностях распределения редких и рассеянных элементов, оценить в настоящее время не всегда представляется возможным (Маслов и др., 2018).

Таким образом, сами по себе данные о возрасте и составе тех или иных индикаторных минералов тяжелой фракции, несомненно, представляют интерес для исследователя, но только в комплексе с другими данными (в первую очередь собственно литологическими) они способны дать принципиально новую информацию, в том числе и о составе пород в областях размыва. Вывод насколько банальный, настолько и основополагающий. В соответствии с ним мы в первую очередь должны обращать внимание на данные о минералах тяжелой фракции, полученные для песчаников петрогенных, но вот доля таковых, как известно, имеет тенденцию к неуклонному снижению среди всех более молодых осадочных образованиях.

Благодарности

Авторы искренне признательны Н.С. Глушковой, выполнившей иллюстрацию к данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреичев В.Л., Соболева А.А., Герелс Дж. (2013) U-Pb-возраст детритовых цирконов из верхнедокембрийских терригенных отложений Северного Тимана. *Докл. АН*, **450**(5), 562-566. DOI: 10.7868/S0869565213170167
- Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (гранаты, турмалины, хромшпинелиды, рутилы, хлоритоиды, пироксены и амфиболы). *Литосфера*, **20**(2), 149-167.
- Ершова В.Б., Прокопьев А.В., Худолей А.К., Шнейдер Г.В., Андерсен Т., Куллеруд К., Макарьев А.А., Маслов А.В., Колчанов Д.А. (2015) Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования обломочных цирконов из метатерригенных пород фундамента Северо-Карского бассейна. *Докл. АН*, **464**(4), 444-447. DOI: 10.7868/S0869565215280142
- Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Ершова В.Б., Хубанов В.Б., Худолей А.К., Сычев С.Н., Вдовина Н.И., Маслов А.В. (2018) U-Pb LA-ICP-MS-возраст обломочных цирконов из отложений нижнего рифея и верхнего венда Лужско-Ладожской моноклинали. *Докл. АН*, **480**(4), 439-443. DOI: 10.7868/S0869565218160120
- Кириллова Г.Л. (2014) Реконструкция питающих провинций Восточно-Азиатской континентальной окраины в позднем мезозое по данным изотопной U-Pb геохронологии обломочных цирконов. *Докл. АН*, **456**(4), 448-450. DOI: 10.7868/S086956521416021X
- Ковач В.П., Рязанцев А.В., Третьяков А.А., Дегтярев К.Е., Толмачева Е.В., Ван К.Л., Котов А.Б., Чун С.Л., Джан Б.М. (2014) U-Pb-возрасты детритовых цирконов из неопротерозойских россыпей Ерементау-Ниязского массива как отражение этапов докембрийской тектоно-магматической эволюции Северного Казахстана. *Докл. АН*, **455**(3), 300-304. DOI: 10.7868/S0869565214090205
- Костева Н.Н., Кузнецов Н.Б., Тебенков А.М., Романюк Т.В. (2014) Первые результаты изотопного U-Pb датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из нижнего палеозоя Шпицбергена. *Докл. АН*, **455**(3), 305-312. DOI: 10.7868/S0869565214090199
- Кузнецов Н.Б., Алексеев А.С., Белоусова Е.А., Романюк Т.В., Реймерс А.Н., Цельмович В.А. (2014) Тестирование моделей поздневендской эволюции северо-восточной периферии Восточно-Европейской платформы на основе первых результатов изотопного U/Pb-датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из верхневендских песчаников Юго-Восточного Беломорья. *Докл. АН*, **458**(3), 313-317. DOI: 10.7868/S086956521427022X
- Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Крупенин М.Т., Романюк Т.В., Маслов А.В. (2017) Результаты геохронологического и изотопно-геохимического изучения циркона из туфов сыльвикской серии (западный склон Среднего Урала): к происхождению пепловых прослоев в вендских толщах Восточно-Европейской платформы. *Докл. АН*, **473**(3), 341-345. DOI: 10.7868/S0869565217090183
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шацилло А.В., Голованова И.В., Данукалов К.Н., Меерт Дж. (2012) Возраст детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала – подтверждение пространственной сопряженности уральского края Балтики и квинслендского края Австралии в структуре Родинии ("Australia upside down conception"). *Литосфера*, (4), 59-77.
- Кузьмин В.К. (2014) Возраст осадконакопления и метаморфизма терригенных пород Срединно-Камчатского и Ганальского поднятий по результатам SHRIMP U-Pb-датирования циркона. *Докл. АН*, **454**(6), 689-694. DOI: 10.7868/S0869565214060206
- Маслов А.В., Вовна Г.М., Киселев В.И., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л. (2011) Первые результаты U-Pb датирования обломочных цирконов из отложений серебрянской серии (верхний протерозой, Средний Урал). *Докл. АН*, **439**(3), 359-364.
- Маслов А.В., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т. (2012) U-Pb-систематика обломочных цирконов из отложений серебрянской серии Среднего Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 180-196.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Крупенин М.Т. (1998) Осадоч-

- ные последовательности рифея типовой местности (ретроспективный обзор седиментологических, палеогеографических, литолого-минералогических и петрогеохимических исследований. Уфа: Принт, 225 с.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В. (2019) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 1. Минералого-петрографические подходы и методы. *Литосфера*, **19**(6), 834-860.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В., Червяковская М.В. (2020) Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы. *Литосфера*, **20**(1), 40-62.
- Маслов А.В., Мизенс Г.А., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л. (2016) Обломочные цирконы из песчаников нижнего триаса Бельской впадины Предуральяского прогиба: LA-ICP-MS U-Pb изотопные возраста и распределение редких и рассеянных элементов. *Литосфера*, (1), 7-28.
- Маслов А.В., Петров Г.А., Ронкин Ю.Л. (2018) Ранние этапы эволюции уральца: U-Pb систематика обломочных цирконов из пород рифтогенных ассоциаций. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **26**(2), 3-20.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Гердес А., Маслов А.В. (2015) Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования обломочных цирконов из метапесчаников Ишеримского антиклинория (Северный Урал). *Докл. АН*, **464**(5), 589-593. DOI: 10.7868/S086956521529023X
- Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. (1976) Пески и песчаники. М.: Мир, 534 с.
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. (2018) Палеотектонические и палеогеографические обстановки накопления нижнерифейской айской свиты Башкирского поднятия (Южный Урал) на основе изучения детритовых цирконов методом "TerraneChrono®". *Геодинамика и тектонофизика*, **9**(1), 1-37. DOI: 10.5800/GT-2018-9-1-0335
- Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. (2014) Геохимическая и Lu/Hf-изотопная (LA-ICP-MS) систематика детритных цирконов из песчаников базальных уровней стратотипа рифея. *Докл. АН*, **459**(3), 340-344. DOI: 10.7868/S0869565214330214
- Романюк Т.В., Маслов А.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С. (2013) Первые результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования детритных цирконов из верхнерифейских песчаников Башкирского антиклинория (Южный Урал). *Докл. АН*, **452**(6), 642-645. DOI: 10.7868/S0869565213310174
- Сергеева Н.Д. (1989) Минералогическая корреляция верхнедокембрийских образований Южного Урала. Автореф. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГГ УрО АН СССР, 23 с.
- Туркина О.М., Лепехина Е.Н., Бережная Н.Г., Капитонов И.Н. (2014) U-Pb-возраст и изотопная Lu-Hf-систематика детритовых цирконов из парагнейсов Булунского блока (Шарыжалгайский выступ фундамента Сибирской платформы). *Докл. АН*, **458**(5), 582-589. DOI: 10.7868/S0869565214290271
- Школьник С.И., Летникова Е.Ф., Беличенко В.Г., Прошенкин А.И., Джен Х. (Geng H.), Вещева С.В., Левин А.В. (2014) U-Pb датирование методом LA-ICP-MS детритовых цирконов из метатерригенных отложений венд-кембрийского чехла Тувино-Монгольского микроконтинента (Тункинские гольцы, Восточный Саян). *Докл. АН*, **454**(4), 452-455. DOI: 10.7868/S0869565214040227
- Abdullin F., Solé J., Solari L., Shchepetilnikova V., Menezes-Rocha J.J., Pavlinova N., Rodríguez-Trejo A. (2016) Single-grain apatite geochemistry of Permian-Triassic granitoids and Mesozoic and Eocene sandstones from Chiapas, southeast Mexico: implications for sediment provenance. *Int. Geol. Rev.*, **58**(9), 1132-1157. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1150212>
- Ahrens L.H., Cherry R.D., Erlank A.J. (1967) Observation on the Th-U relationship in zircons from granitic rocks and from kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**(12), 2379-2387. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90009-9)
- Andersen T. (2005) Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem. Geol.*, **216**(3-4), 249-270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.11.013>
- Andersen T., Griffin W.L., Jackson S.E., Knudsen T.-L. (2004) Mid-Proterozoic magmatic arc evolution at the southwest margin of the Baltic Shield. *Lithos*, **73**(3-4), 289-318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.011>
- Andersen T., Griffin W.L., Pearson N.J. (2002) Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: the Hf isotope evidence. *J. Petrol.*, **43**, 1725-1747. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.9.1725>
- Andersen T., Saeed A., Gabrielsen R.H., Olaussen S. (2011) Provenance characteristics of the Brumunddal sandstone in the Oslo Rift derived from U-Pb, Lu-Hf and trace element analyses of detrital zircons by laser ablation ICP-MS. *Norw. J. Geol.*, **91**(1-2), 1-18.
- Ayres M., Harris N. (1997) REE fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: Constraints from Himalayan leucogranites. *Chem. Geol.*, **139**(1-4), 249-269. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00038-7)
- Barr S.M., Davis D.W., Kamo S., White C.E. (2003) Significance of U-Pb detrital zircon ages in quartzite from peri-Gondwanan terranes, New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Precamb. Res.*, **126**(1-2), 123-145. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00192-X)
- Bea F., Montero P. (1999) Behaviour of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th, and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(7-8), 1133-1153. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00292-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00292-0)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2006) Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: examples from eastern Australian granitoids. *J. Petrol.*, **47**(2), 329-353. DOI: [10.1093/petrology/egi077](https://doi.org/10.1093/petrology/egi077)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**(5), 602-622. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Belousova E.A., Griffin W.L., Pearson N.J. (1998) Trace element composition and cathodoluminescence

- cence properties of southern African kimberlitic zircons. *Mineral. Mag.*, **62**(3), 355-366. DOI: <https://doi.org/10.1180/002646198547747>
- Belousova E.A., Kostitsyn Y.A., Griffin W.L., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. (2010) The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, **119**(3-4), 457-466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.024>
- Belousova E.A., Walters S., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2001) Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland. *Aust. J. Earth Sci.*, **48**(4), 603-619. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00879.x>
- Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Postnikov A.V., Popova L.P., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Glushchenko V.V. (2009) Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigr. Geol. Correl.*, **17**(6), 561-573. DOI: <https://doi.org/10.1134/S086959380906001X>
- Bingen B., Birkeland A., Nordgulen O., Sigmond E.M.O. (2001) Correlation of supracrustal sequences and origin of terranes in the Sveconorwegian orogen of SW Scandinavia: SIMS data on zircon in clastic metasediments. *Precamb. Res.*, **108**(3-4), 293-318. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00133-4)
- Bingen B., Demaiffe D., Hertogen J. (1996) Redistribution of rare earth elements, thorium, and uranium over accessory minerals in the course of amphibolite to granulite facies metamorphism: The role of apatite and monazite in orthogneisses from southwestern Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**(8), 1341-1354. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00006-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00006-3)
- Bogdanova S.V., Belousova E.A., De Waele B., Postnikov A.V. (2013) Zircon from Mesoproterozoic enderbites of Volgo-Uralia: U-Pb age, REE, Hf and O-isotope compositions. *Mineral. Mag.*, **77**(5), 727. DOI: <http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2013.077.5.2>
- Bogdanova S.V., De Waele B., Bibikova E.V., Belousova E.A., Postnikov A.V., Fedotova A.A., Popova L.P. (2010) Volgo-Uralia: the first U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic evidence of preserved Paleoproterozoic crust. *Amer. J. Sci.*, **310**(10), 1345-1383. DOI: [10.2475/10.2010.06](https://doi.org/10.2475/10.2010.06)
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. (2012) Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from Central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Res. Geol.*, **62**(1), 63-83. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2011.00180.x>
- Cavosie A.J., Valley J.W., Wilde S.A. (2006) Correlated microanalysis of zircon: Trace element, $\delta^{18}\text{O}$, and U-Th-Pb isotopic constraints on the igneous origin of complex >3900 Ma detrital grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 5601-5616. DOI: [10.1016/j.gca.2006.08.011](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.011)
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. (2002) Strontium-apatite: New occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *Can. Mineral.*, **40**(1), 121-136.
- Chu M.-F., Wang K.-L., Griffin W.L., Chung S.-L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Iizuka Y. (2009) Apatite composition: tracing petrogenetic processes in Transhimalayan Granitoids. *J. Petrol.*, **50**(10), 1829-1855. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egp054>
- Condie K.C., Beyer E., Belousova E., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2005) U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: the search for juvenile Precambrian continental crust. *Precamb. Res.*, **139**(1-2), 42-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.04.006>
- Davis D.W. (2002) U-Pb geochronology of Archaean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi sub-provinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics. *Precamb. Res.*, **115**(1-4), 97-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00007-4)
- De Haas G.J.L.M., Andersen T., Vestin J. (1999) Detrital zircon geochronology: new evidence for an old model for accretion of the Southwest Baltic Shield. *J. Geol.*, **107**(5), 569-586. DOI: [10.1086/314370](https://doi.org/10.1086/314370)
- Dickinson W.R., Lawton T.F., Gehrels G.E. (2009) Recycling detrital zircons: A case study from the Cretaceous Bisbee Group of southern Arizona. *J. Geol.*, **37**(6), 503-506. DOI: <https://doi.org/10.1130/G25646A.1>
- Dill H.G. (1994) Can REE patterns and U-Th variations be used as a tool to determine the origin of apatite in clastic rocks? *Sediment. Geol.*, **92**(3-4), 175-196. DOI: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90105-8)
- Fedo C.M., Sircombe K.N., Rainbird R.H. (2003) Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**(1), 277-303. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530277>
- Fleischer M., Altschuler Z.S. (1986) The lanthanides and yttrium in minerals of the apatite group – an analysis of the available data. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, (10), 467-480.
- Gaucher C., Finney S.C., Poire D.G., Valencia V.A., Grove M., Blanco G., Pamoukaghlian K., Peral L.G. (2008) Detrital zircon ages of Neoproterozoic sedimentary successions in Uruguay and Argentina: Insights into the geological evolution of the Rio de la Plata Craton. *Precamb. Res.*, **167**(1-2), 150-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.006>
- Gillespie J., Glorie S., Khudoley A., Collins A.S. (2018) Detrital apatite U-Pb and trace element analysis as a provenance tool: Insights from the Yenisey Ridge (Siberia). *Lithos*, **314-315**, 140-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.05.026>
- Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. (2004) Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons. *Precamb. Res.*, **131**(3-4), 231-282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Griffin W.L., Belousova E.A., Walters S.G., O'Reilly S.Y. (2006) Archean and Proterozoic crustal evolution in the Eastern Succession of the Mt Isa district, Australia: U-Pb and Hf-isotope studies of detrital zircons. *Aust. J. Earth Sci.*, **53**(1), 125-149. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120090500434591>
- Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E., Jackson S.E., van Achterberg E., O'Reilly S.Y., Shee S.R. (2000) The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(1), 133-147. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00343-9)
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghøj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *J. Geol.*, **35**(7), 643-646. DOI: <https://doi.org/10.1130/G23603A.1>
- Guo S., Ye K., Wu T.F., Chen Y., Yang Y.H., Zhang L.M., Liu J. B., Mao Q., Ma Y.G. (2013) A potential method to

- confirm the previous existence of lawsonite in eclogite: The mass imbalance of Sr and LREEs in multistage epidote (Ganghe, Dabie UHP terrane). *J. Metamor. Geol.*, **31**(4), 415-435. DOI: <https://doi.org/10.1111/jmg.12027>.
- Hammerli J., Kemp A.I.S., Spandler C. (2014) Neodymium isotope equilibration during crustal metamorphism revealed by in situ microanalysis of REE-rich accessory minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **392**, 133-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.018>.
- Hartmann L.A., Leite J.A.D., Silva L.C., Remus M.V.D., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Santos J.O.S., Vasconcellos M.A.Z. (2000) Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Austr. J. Earth Sci.*, **47**(5), 829-844. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00815.x>.
- Hartmann L.A., Santos J.O.S. (2004) Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones. *J. Geol.*, **32**(1), 73-76. DOI: <https://doi.org/10.1130/G20007.1>.
- Hermann J., 2002, Allanite: Thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chem. Geol.*, **192**(3-4), 289-306. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00222-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00222-X).
- Hoskin P.W.O., Ireland T.R. (2000) Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *J. Geol.*, **28**(7), 627-630. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28%3C627:REECOZ%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C627:REECOZ%3E2.0.CO;2).
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.* (Eds J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin), **53**(1), 27-62. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530027>.
- Jafarzadeh M., Harami R.M., Friis H., Amini A., Mahboubi A., Lenaz D. (2014) Provenance of the Oligocene-Miocene Zivah formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses. *J. Afr. Earth Sci.*, **89**, 56-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.10.005>.
- Kinney P.D., Maas R. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. (2003) *Rev. Mineral. Geochem.* (Eds J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin), **53**(1), 327-341. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530327>.
- Lahtinen R., Huhma H., Kousa J. (2002) Contrasting source components of the Paleoproterozoic Svecofennian metasediments: Detrital zircon U-Pb, Sm-Nd and geochemical data. *Precamb. Res.*, **116**(1-2), 81-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00018-9).
- Lauri L.S., Andersen T., Holtta P., Huhma H., Graham S. (2011) Evolution of the Archaean Karelian province in the Fennoscandian Shield in the light of U-Pb zircon ages and Sm-Nd and Lu-Hf Isotope systematics. *J. Geol. Soc., London*, **168**, 201-218. DOI: <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-159>.
- Morton A.C. (2012) Value of heavy minerals in sediments and sedimentary rocks for provenance, transport history and stratigraphic correlation. *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks* (Ed. P. Sylvester). *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, **42**, 133-165.
- Morton A.C., Hallsworth C.R. (1999) Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment. Geol.*, **124**(1-4), 3-29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3).
- Morton A., Yaxley G. (2007) Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **420**, 319-344. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(19\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(19)).
- Nutman A.P. (2007) Apatite recrystallisation during prograde metamorphism, Cooma, southeast Australia. Implications for using an apatite-graphite association as a biotracer in ancient metasedimentary rocks. *Aust. J. Earth Sci.*, **54**(8), 1023-1032. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120090701488321>.
- Patchett P.J. (1983) Importance of the Lu-Hf isotopic system in studies of planetary chronology and chemical evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 81-91. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90092-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90092-3).
- Patchett P.J., Kouvo O., Hedge C.E., Tatsumoto M. (1981) Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 279-297. <https://doi.org/10.1007/BF00398923>.
- Patchett P.J., Tatsumoto M. (1980) A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **75**(3), 263-267. <https://doi.org/10.1007/BF01166766>.
- Pettijohn F.J. (1941) Persistence of heavy minerals and geological age. *J. Geol.*, **49**, 610-625.
- Piccoli P.M., Candela P.A. (2002) Apatite in igneous systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 255-292. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.6>.
- Rainbird R.H., Davis W.J. (2007) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of the late Paleoproterozoic Dubawnt Supergroup: Linking sedimentation with tectonic reworking of the western Churchill Province, Canada. *GSA Bull.*, **119**(3-4), 314-328. DOI: <https://doi.org/10.1130/B25989.1>.
- Safonova I., Maruyama S., Hirata T., Kon Y., Rino S. (2010) LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from Russia largest rivers: Implications for major granitoid events in Eurasia and global episodes of supercontinent formation. *J. Geodynam.*, **50**(3-4), 134-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.02.008>.
- Sambridge M.S., Compston W. (1994) Mixture modelling of multicomponent data sets with application to ion-probe zircon ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **128**(3-4), 373-390. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90157-0).
- Sassi R., Harte B., Carswell D.A., Yujing H. (2000) Trace element distribution in Central Dabie eclogites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**(3), 298-315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100000133>.
- Sha L.K., Chappell B.W. (1999) Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(22), 3861-3881. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00210-0).
- Sircombe K.N. (2000) Quantitative comparison of geochronological data using multivariate analysis: a provenance study example from Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(9), 1593-1619. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00388-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00388-9).
- Sircombe K.N., Hazelton M.L. (2004) Comparison of detrital zircon age distributions by kernel functional estimation. *Sediment. Geol.*, **171**(1-4), 91-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.012>.
- Spandler C., Hermann J., Arculus R., Mavrogenes J. (2003) Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies;

- implications for deep subduction-zone processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**(2), 205-222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0495-5>
- Spear F.S., Pyle J.M. (2002) Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 293-335. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.7>
- Tang M., Wang X.L., Xu X.S., Zhu C., Cheng T., Yu Y. (2012) Neoproterozoic subducted materials in the generation of Mesozoic Luzong volcanic rocks: Evidence from apatite geochemistry and Hf-Nd isotopic decoupling. *Gondw. Res.*, **21**(1), 266-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.05.009>
- Tribuzio R., Messiga B., Vannucci R., Bottazzi P. (1996) Rare earth element redistribution during high-pressure-low-temperature metamorphism in ophiolitic Fe-gabbros (Liguria, northwestern Italy): Implications for light REE mobility in subduction zones. *J. Geol.*, **24**(8), 711-714. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024%3C0711:REERDH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024%3C0711:REERDH%3E2.3.CO;2)
- Vavra G., Schmid R., Gebauer D. (1999) Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**(4), 380-404. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050492>
- Vermesch P. (2004) How many grains are needed for a provenance study? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **224**(3-4), 351-441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.037>
- von Eynatten H., Dunkl I. (2012) Assessing the sediment factory: the role of single grain analysis. *Earth-Sci. Rev.*, **115**, 97-120.
- Wiedenbeck M., Allen P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. NewsL.*, **19**(1), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Williams I.S. (2001) Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Aust. J. Earth Sci.*, **48**(4), 557-580. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00883.x>
- Zhang Z.-M., Shen K., Sun W.-D., Liu Y.-S., Liou J.G., Shi C., Wang J.-L. (2008) Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**(13), 3200-3228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.014>
- tary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem. Geol.*, **216**(3-4), 249-270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.11.013>
- Andersen T., Griffin W.L., Jackson S.E., Knudsen T.-L. (2004) Mid-Proterozoic magmatic arc evolution at the southwest margin of the Baltic Shield. *Lithos*, **73**(3-4), 289-318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.011>
- Andersen T., Griffin W.L., Pearson N.J. (2002) Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: the Hf isotope evidence. *J. Petrol.*, **43**, 1725-1747. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.9.1725>
- Andersen T., Saeed A., Gabrielsen R.H., Olausen S. (2011) Provenance characteristics of the Brumunddal sandstone in the Oslo Rift derived from U-Pb, Lu-Hf and trace element analyses of detrital zircons by laser ablation IC-MPS. *Norw. J. Geol.*, **91**(1-2), 1-18.
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Gerels Dzh. (2013) U-Pb age of detrital zircons from the Upper Precambrian terrigenous section of North Timan. *Dokl. Earth Sci.*, **450**(2), 592-596 DOI: [10.1134/S1028334X13060093](https://doi.org/10.1134/S1028334X13060093)
- Ayres M., Harris N. (1997) REE fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: Constraints from Himalayan leucogranites. *Chem. Geol.*, **139**(1-4), 249-269. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00038-7)
- Badida L.V., Maslov A.V., Mizens G.A. (2020) Provenance reconstructions. Modern methods of detrital minerals' research (garnets, tourmalines, chrome spinellides, rutiles, chlorites, pyroxenes and amphiboles). *Litosfera*, **20**(2), 149-167. (In Russian)
- Barr S.M., Davis D.W., Kamo S., White C.E. (2003) Significance of U-Pb detrital zircon ages in quartzite from peri-Gondwanan terranes, New Brunswick and Nova Scotia, Canada. *Precamb. Res.*, **126**(1-2), 123-145. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00192-X)
- Bea F., Montero P. (1999) Behaviour of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th, and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(7-8), 1133-1153. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00292-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00292-0)
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. (2002) Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**(5), 602-622. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2006) Zircon crystal morphology, trace element signatures and Hf isotope composition as a tool for petrogenetic modeling: examples from eastern Australian granitoids. *J. Petrol.*, **47**(2), 329-353. DOI: [10.1093/petrology/egi077](https://doi.org/10.1093/petrology/egi077)
- Belousova E.A., Griffin W.L., Pearson N.J. (1998) Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons. *Mineral. Mag.*, **62**(3), 355-366. DOI: <https://doi.org/10.1180/002646198547747>
- Belousova E.A., Kostitsyn Y.A., Griffin W.L., Begg G.C., O'Reilly S.Y., Pearson N.J. (2010) The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data. *Lithos*, **119**(3-4), 457-466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.07.024>
- Belousova E.A., Walters S., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2001) Trace-element signatures of apatites in granitoids from the Mt Isa Inlier, northwestern Queensland. *Aust. J. Earth Sci.*, **48**(4), 603-619. DOI: <https://doi.org/10.1046/>

REFERENCES

- Abdullin F., Solé J., Solari L., Shchepetilnikova V., Meneeses-Rocha J.J., Pavlinova N., Rodríguez-Trejo A. (2016) Single-grain apatite geochemistry of Permian-Triassic granitoids and Mesozoic and Eocene sandstones from Chiapas, southeast Mexico: implications for sediment provenance. *Int. Geol. Rev.*, **58**(9), 1132-1157. DOI: <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1150212>
- Ahrens L.H., Cherry R.D., Erlank A.J. (1967) Observation on the Th-U relationship in zircons from granitic rocks and from kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **31**(12), 2379-2387. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(67\)90009-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(67)90009-9)
- Andersen T. (2005) Detrital zircons as tracers of sedimen-

- j.1440-0952.2001.00879.x
- Bibikova E.V., Bogdanova S.V., Postnikov A.V., Popova L.P., Kirnozova T.I., Fugzan M.M., Glushchenko V.V. (2009) Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids. *Stratigr. Geol. Correl.*, **17**(6), 561-573. DOI: <https://doi.org/10.1134/S086959380906001X>
- Bingen B., Birkeland A., Nordgulen O., Sigmond E.M.O. (2001) Correlation of supracrustal sequences and origin of terranes in the Sveconorwegian orogen of SW Scandinavia: SIMS data on zircon in clastic metasediments. *Precamb. Res.*, **108**(3-4), 293-318. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00133-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00133-4)
- Bingen B., Demaiffe D., Hertogen J. (1996) Redistribution of rare earth elements, thorium, and uranium over accessory minerals in the course of amphibolite to granulite facies metamorphism: The role of apatite and monazite in orthogneisses from southwestern Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**(8), 1341-1354. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00006-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00006-3)
- Bogdanova S.V., Belousova E.A., De Waele B., Postnikov A.V. (2013) Zircon from Mesoarchean enderbites of Volgo-Uralia: U-Pb age, REE, Hf and O isotope compositions. *Mineral. Mag.*, **77**(5), 727. DOI: <http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2013.077.5.2>
- Bogdanova S.V., De Waele B., Bibikova E.V., Belousova E.A., Postnikov A.V., Fedotova A.A., Popova L.P. (2010) Volgo-Uralia: the first U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic evidence of preserved Paleoarchean crust. *Amer. J. Sci.*, **310**(10), 1345-1383. DOI: [10.2475/10.2010.06](https://doi.org/10.2475/10.2010.06)
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. (2012) Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from Central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Res. Geol.*, **62**(1), 63-83. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2011.00180.x>
- Cavosie A.J., Valley J.W., Wilde S.A. (2006) Correlated microanalysis of zircon: Trace element, $d^{18}O$, and U-Th-Pb isotopic constraints on the igneous origin of complex >3900 Ma detrital grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 5601-5616. DOI: [10.1016/j.gca.2006.08.011](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.08.011)
- Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. (2002) Strontium-apatite: New occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals. *Can. Mineral.*, **40**(1), 121-136.
- Chu M.-F., Wang K.-L., Griffin W.L., Chung S.-L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Iizuka Y. (2009) Apatite composition: tracing petrogenetic processes in Transhimalayan Granitoids. *J. Petrol.*, **50**(10), 1829-1855. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egp054>
- Condie K.C., Beyer E., Belousova E., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. (2005) U-Pb isotopic ages and Hf isotopic composition of single zircons: the search for juvenile Precambrian continental crust. *Precamb. Res.*, **139**(1-2), 42-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.04.006>
- Davis D.W. (2002) U-Pb geochronology of Archaean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics. *Precamb. Res.*, **115**(1-4), 97-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00007-4)
- De Haas G.J.L.M., Andersen T., Vestin J. (1999) Detrital zircon geochronology: new evidence for an old model for accretion of the Southwest Baltic Shield. *J. Geol.*, **107**(5), 569-586. DOI: [10.1086/314370](https://doi.org/10.1086/314370)
- Dickinson W.R., Lawton T.F., Gehrels G.E. (2009) Recycling detrital zircons: A case study from the Cretaceous Bisbee Group of southern Arizona. *J. Geol.*, **37**(6), 503-506. DOI: <https://doi.org/10.1130/G25646A.1>
- Dill H.G. (1994) Can REE patterns and U-Th variations be used as a tool to determine the origin of apatite in clastic rocks? *Sediment. Geol.*, **92**(3-4), 175-196. DOI: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90105-8)
- Ershova V.B., Prokop'ev A.V., Khudolei A.K., Shneider G.V., Andersen T., Kullerud K., Makar'ev A.A., Maslov A.V., Kolchanov D.A. (2015) Results of U-Pb (La-ICP MS) dating of detrital zircons from metaterrigenous rocks of the basement of the North Kara basin. *Dokl. Earth Sci.*, **464**(2), 997-1000 DOI: [10.1134/S1028334X15100013](https://doi.org/10.1134/S1028334X15100013)
- Fedo C.M., Sircombe K.N., Rainbird R.H. (2003) Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**(1), 277-303. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530277>
- Fleischer M., Altschuler Z.S. (1986) The lanthanides and yttrium in minerals of the apatite group – an analysis of the available data. *Neues Jahrbuch fuer Mineralogie, Monatshefte*, (10), 467-480.
- Gaucher C., Finey S.C., Poire D.G., Valencia V.A., Grove M., Blanco G., Pamoukaghlian K., Peral L.G. (2008) Detrital zircon ages of Neoproterozoic sedimentary successions in Uruguay and Argentina: Insights into the geological evolution of the Rio de la Plata Craton. *Precamb. Res.*, **167**(1-2), 150-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.006>
- Gillespie J., Glorie S., Khudoley A., Collins A.S. (2018) Detrital apatite U-Pb and trace element analysis as a provenance tool: Insights from the Yenisey Ridge (Siberia). *Lithos*, **314-315**, 140-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.05.026>
- Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. (2004) Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precamb. Res.*, **131**(3-4), 231-282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Griffin W.L., Belousova E.A., Walters S.G., O'Reilly S.Y. (2006) Archean and Proterozoic crustal evolution in the Eastern Succession of the Mt Isa district, Australia: U-Pb and Hf-isotope studies of detrital zircons. *Aust. J. Earth Sci.*, **53**(1), 125-149. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120090500434591>
- Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E., Jackson S.E., van Achterberg E., O'Reilly S.Y., Shee S.R. (2000) The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(1), 133-147. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00343-9)
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghøj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *J. Geol.*, **35**(7), 643-646. DOI: <https://doi.org/10.1130/G23603A.1>
- Guo S., Ye K., Wu T.F., Chen Y., Yang Y.H., Zhang L.M., Liu J. B., Mao Q., Ma Y.G. (2013) A potential method to confirm the previous existence of lawsonite in eclogite: The mass imbalance of Sr and LREEs in multistage epidote (Ganghe, Dabie UHP terrane). *J. Metamor. Geol.*, **31**(4), 415-435. DOI: <https://doi.org/10.1111/jmg.12027>
- Hammerli J., Kemp A.I.S., Spandler C. (2014) Neodymi-

- um isotope equilibration during crustal metamorphism revealed by in situ microanalysis of REE-rich accessory minerals. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **392**, 133-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.018>
- Hartmann L.A., Leite J.A.D., Silva L.C., Remus M.V.D., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Santos J.O.S., Vasconcellos M.A.Z. (2000) Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Austr. J. Earth Sci.*, **47**(5), 829-844. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2000.00815.x>
- Hartmann L.A., Santos J.O.S. (2004) Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones. *J. Geol.*, **32**(1), 73-76. DOI: <https://doi.org/10.1130/G20007.1>
- Hermann J. (2002) Allantite: Thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chem. Geol.*, **192**(3-4), 289-306. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00222-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00222-X)
- Hoskin P.W.O., Ireland T.R. (2000) Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *J. Geol.*, **28**(7), 627-630. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28%3C627:REECOZ%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28%3C627:REECOZ%3E2.0.CO;2)
- Hoskin P.W.O., Schaltegger U. (2003) The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.* (Eds J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin), **53**(1), 27-62. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Ivleva A.S., Podkovyrov V.N., Ershova V.B., Khubanov V.B., Khudolei A.K., Sychev S.N., Vdovina N.I., Maslov A.V. (2018) U-Pb LA-ICP-MS Age of Detrital Zircons from the Lower Riphean and Upper Vendian Deposits of the Luga-Ladoga Monocline. *Dokl. Earth Sci.*, **480**(2), 695-699 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X1806003X>
- Jafarzadeh M., Harami R.M., Friis H., Amini A., Mahboubi A., Lenaz D. (2014) Provenance of the Oligocene-Miocene Zivah formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses. *J. Afr. Earth Sci.*, **89**, 56-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.10.005>
- Kinney P.D., Maas R. (2003) Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. *Rev. Mineral. Geochem.* (Eds J.M. Hanchar, P.W.O. Hoskin), **53**(1), 327-341. DOI: <https://doi.org/10.2113/0530327>
- Kirillova G.L. (2014) Reconstruction of Late Mesozoic provenances for the East Asian continental margin based on U-Pb detrital zircon geochronology. *Dokl. Earth Sci.*, **456**(2), 646-658. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14060130>
- Kosteva N.N., Kuznetsov N.B., Teben'kov A.M., Romanyuk T.V. (2014) First results of the U-Pb isotopic (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from the Lower Paleozoic of Spitsbergen. *Dokl. Earth Sci.*, **455**(1), 259-265. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X1403026X>
- Kovach V.P., Ryazantsev A.V., Tret'yakov A.A., Degtyarev K.E., Tolmacheva E.V., Van K.L., Kotov A.B., Chun S.L., Dzhan B.M. (2014) U-Pb age of detrital zircons from neoproterozoic placers of the Erementau-Niyaz massif as a reflection of stages of Precambrian tectono-magmatic evolution of northern Kazakhstan. *Dokl. Earth Sci.*, **455**(1), 254-258 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14030271>
- Kuz'min V.K. (2014) The age of sedimentation and metamorphism for terrigenous rocks of the Middle Kamchatka and Ganalskii Rises from the SHRIMP U-Pb dating on zircons. *Dokl. Earth Sci.*, **454**(2), 149-153 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14020226>
- Kuznetsov N.B., Alekseev A.S., Belousova E.A., Romanyuk T.V., Reimers A.N., Tsel'movich V.A. (2014) Testing the models of Late Vendian evolution of the Northeastern Periphery of the East European Craton based on the first U/Pb dating of detrital zircons from Upper Vendian sandstones of Southeastern White Sea Region. *Dokl. Earth Sci.*, **458**(1), 1073-1076 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14090311>
- Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Krupenin M.T., Romanyuk T.V., Maslov A.V. (2017) The results of geochronological and isotope-geochemical study of zircons from tuff of the Sylvisa Group (western slope of the Middle Urals): The origin of ash layers in Vendian rocks of the East European Platform. *Dokl. Earth Sci.*, **473**(1), 359-362 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X17030254>
- Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., Shatsillo A.V., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Meert Dzh. (2012) Detrital zircons age of the Asha Group (Southern Urals) – confirmation of the contingency for Baltica Ural part and Australia Queensland part in Rodinia framework ("Australia upside down conception"). *Litosfera*, (4), 59-77. (In Russian)
- Lahtinen R., Huhma H., Kousa J. (2002) Contrasting source components of the Paleoproterozoic Svecofennian metasediments: Detrital zircon U-Pb, Sm-Nd and geochemical data. *Precamb. Res.*, **116**(1-2), 81-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00018-9)
- Lauri L.S., Andersen T., Holtta P., Huhma H., Graham S. (2011) Evolution of the Archaean Karelian province in the Fennoscandian Shield in the light of U-Pb zircon ages and Sm-Nd and Lu-Hf Isotope systematics. *J. Geol. Soc., London*, **168**, 201-218. DOI: <https://doi.org/10.1144/0016-76492009-159>
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Krupenin M.T. (1998) Osadochnye posledovatel'nosti rifeya tipovoi mestnosti (retrospektivnyi obzor sedimentologicheskikh, paleogeograficheskikh, litologo-mineralogicheskikh i petrogeokhimicheskikh issledovaniy) [Riphean sedimentary sequences of a typical locality (retrospective review of sedimentological, paleogeographic, lithological-mineralogical, and petrogeochemical studies)]. Ufa, Print Publ., 225 p. (In Russian)
- Maslov A.V., Mel'nichuk O.Yu., Mizens G.A., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Mineralogical-petrographic approaches and methods. *Litosfera*, **20**(1) 40-62. (In Russian)
- Maslov A.V., Mel'nichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V. (2019) Provenance reconstructions. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Litosfera*, **19**(6), 834-860. (In Russian)
- Maslov A.V., Mizens G.A., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L. (2016) Clastic zircons from sandstones of the Lower Triassic of the Belskaya Depression of the Ural Trough: LA-ICP-MS U-Pb isotopic ages and distribution of rare and trace elements. *Litosfera*, (1), 7-28. (In Russian)
- Maslov A.V., Petrov G.A., Ronkin Yu.L. (2018) The early stages of the evolution of uralsids: U-Pb systematics of detrital zircons from rocks of riftogenic associations. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **26**(2), 3-20. (In Russian)
- Maslov A.V., Vovna G.M., Kiselev V.I., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L. (2011) First U-Pb dates for detrital zircons

- from deposits of Serebryanka Group (Upper Proterozoic, Middle Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **439**(1), 933-938. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X11070257>
- Maslov A.V., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T. (2012) Detrital zircons U-Pb-systematics from Serebryanka series sediments (Middle Urals). *Litologiya i Polez. Iskopaemye*, (2), 180-196. (In Russian)
- Morton A.C. (2012) Value of heavy minerals in sediments and sedimentary rocks for provenance, transport history and stratigraphic correlation. *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks*. (Ed. P. Sylvester). Mineralogical Association of Canada Short Course Series, **42**, 133-165.
- Morton A.C., Hallsworth C.R. (1999) Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. *Sediment. Geol.*, **124**(1-4), 3-29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3)
- Morton A., Yaxley G. (2007) Detrital apatite geochemistry and its application in provenance studies. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **420**, 319-344. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(19\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(19))
- Nutman A.P. (2007) Apatite recrystallisation during prograde metamorphism, Cooma, southeast Australia. Implications for using an apatite-graphite association as a biotracer in ancient metasedimentary rocks. *Aust. J. Earth Sci.*, **54**(8), 1023-1032. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120090701488321>
- Patchett P.J. (1983) Importance of the Lu-Hf isotopic system in studies of planetary chronology and chemical evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 81-91. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90092-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90092-3)
- Patchett P.J., Kouvo O., Hedge C.E., Tatsumoto M. (1981) Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **78**, 279-297. <https://doi.org/10.1007/BF00398923>
- Patchett P.J., Tatsumoto M. (1980) A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **75**(3), 263-267. <https://doi.org/10.1007/BF01166766>
- Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Gerdes A., Maslov A.V. (2015) First results of U-Pb dating of detrital zircons from metasandstones of the Isherim anticlinorium (North Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **464**(2), 1010-1014 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X15100165>
- Pettijohn F.J. (1941) Persistence of heavy minerals and geological age. *J. Geol.*, **49**, 610-625.
- Pettijohn F.J., Potter P., Siver R. (1976) *Peski i peschaniki* [Sands and Sandstones]. Moscow, Mir Publ., 534 p. (In Russian)
- Piccoli P.M., Candela P.A. (2002) Apatite in igneous systems. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 255-292. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.6>
- Rainbird R.H., Davis W.J. (2007) U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of the late Paleoproterozoic Dubawnt Supergroup: Linking sedimentation with tectonic reworking of the western Churchill Province, Canada. *GSA Bull.*, **119**(3-4), 314-328. DOI: <https://doi.org/10.1130/B25989.1>
- Romanyuk T.V., Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N. (2018) Paleotectonic and paleogeographic environments of the Lower Riphean A1 Formation (Bashkirian Uplift, Southern Urals) by the "TerraneChrono®" technique of detrital zircons study. *Geodinamika i tektonofizika*, **9**(1), 1-37. DOI: 10.5800/GT-2018-9-1-0335 (In Russian)
- Romanyuk T.V., Kuznetsov N.B., Maslov A.V., Belousova E.A., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N. (2014) Geochemical and Lu/Hf isotopic (LA-ICP-MS) signature of detrital zircons from sandstones of the basal levels of the Riphean stratotype. *Dokl. Earth Sci.*, **459**(1), 1356-1360 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14110257>
- Romanyuk T.V., Maslov A.V., Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Gorozhanin V.M., Gorozhanina E.N., Seregina E.S. (2013) First data on LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of Upper Riphean sandstones of the Bashkir Anticlinorium (South Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **452**(2), 997-1000 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X13100164>
- Safonova I., Maruyama S., Hirata T., Kon Y., Rino S. (2010) LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from Russia largest rivers: Implications for major granitoid events in Eurasia and global episodes of supercontinent formation. *J. Geodynamics*, **50**(3-4), 134-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.02.008>
- Sambridge M.S., Compston W. (1994) Mixture modelling of multicomponent data sets with application to ion-probe zircon ages. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **128**(3-4), 373-390. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90157-0)
- Sassi R., Harte B., Carswell D.A., Yujing H. (2000) Trace element distribution in Central Dabie eclogites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**(3), 298-315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100000133>
- Sergeeva N.D. (1989) Mineralogicheskaya korrelyatsiya verkhnedokembriiskikh obrazovaniy Yuzhnogo Urala. Dis. ... kand. geol.-min. nauk [Mineralogical correlation of the Upper Precambrian formations of the Southern Urals. Cand. geol. and min. sci.diss.]. Sverdlovsk, IGG UB AN USSR, 23 p. (In Russian)
- Sha L.K., Chappell B.W. (1999) Apatite chemical composition, determined by electron microprobe and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(22), 3861-3881. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00210-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00210-0)
- Shkol'nik S.I., Letnikova E.F., Belichenko V.G., Proshenkin A.I., Geng H., Veshcheva S.V., Levin A.V. (2014) LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons from metaterigenous deposits of the Vendian-Cambrian cover of the Tuva-Mongolian microcontinent (Tunka Bald Mountains, East Sayan). *Dokl. Earth Sci.*, **454**(2), 154-157. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14020056>
- Sircombe K.N. (2000) Quantitative comparison of geochronological data using multivariate analysis: a provenance study example from Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**(9), 1593-1619. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00388-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00388-9)
- Sircombe K.N., Hazelton M.L. (2004) Comparison of detrital zircon age distributions by kernel functional estimation. *Sediment. Geol.*, **171**(1-4), 91-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.012>
- Spandler C., Hermann J., Arculus R., Mavrogenes J. (2003) Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies; implications for deep subduction-zone processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**(2), 205-222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0495-5>
- Spear F.S., Pyle J.M. (2002) Apatite, monazite, and xenotime

- in metamorphic rocks. *Rev. Mineral. Geochem.*, **48**(1), 293-335. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.7>
- Tang M., Wang X.L., Xu X.S., Zhu C., Cheng T., Yu Y. (2012) Neoproterozoic subducted materials in the generation of Mesozoic Luzong volcanic rocks: Evidence from apatite geochemistry and Hf-Nd isotopic decoupling. *Gondw. Res.*, **21**(1), 266-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.05.009>
- Tribuzio R., Messiga B., Vannucci R., Bottazzi, P. (1996) Rare earth element redistribution during high-pressure–low-temperature metamorphism in ophiolitic Fe-gabbros (Liguria, northwestern Italy): Implications for light REE mobility in subduction zones. *J. Geol.*, **24**(8), 711-714. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024%3C0711:REERDH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024%3C0711:REERDH%3E2.3.CO;2)
- Turkina O.M., Lepekhina E.N., Berezhnaya N.G., Kapitonov I.N. (2014) U-Pb age and Lu-Hf isotope systematics of detrital zircons from paragneiss of the Bulun block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian Craton Basement). *Dokl. Earth Sci.*, **458**(2), 1265-1272. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1028334X14100225>
- Vavra G., Schmid R., Gebauer D. (1999) Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**(4), 380-404. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050492>
- Vermeesch P. (2004) How many grains are needed for a provenance study? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **224**(3-4), 351-441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.037>
- von Eynatten H., Dunkl I. (2012) Assessing the sediment factory: the role of single grain analysis. *Earth-Sci. Rev.*, **115**, 97-120.
- Wiedenbeck M., Allen P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Newsl.*, **19**(1), 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>
- Williams I.S. (2001) Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Aust. J. Earth Sci.*, **48**(4), 557-580. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00883.x>
- Zhang Z.-M., Shen K., Sun W.-D., Liu Y.-S., Liou J.G., Shi C., Wang J.-L. (2008) Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**(13), 3200-3228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.04.014>