

Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы

А. В. Маслов^{1,2}, О. Ю. Мельничук¹, Г. А. Мизенс¹, Ю. В. Титов³, М. В. Червяковская¹

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mails: amas2004@mail.ru, o.u.melnichuk@mail.ru, mizens@igg.uran.ru, masha_vuf_91@mail.ru

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

³Филиал ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг" "КогалымНИПИнефть" в г. Тюмени, 628481, г. Когалым, ул. Центральная, 19/17, e-mail: titovoil@k66.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г., принята к печати 12.03.2019 г.

Объект исследований. Рассмотрены особенности применения лито- и изотопно-геохимических данных для целей реконструкции состава пород питающих провинций. **Материалы и методы.** В качестве основных инструментов использованы анализ соотношений некоторых породообразующих оксидов, разнообразных отношений индикаторных элементов-примесей, а также исследование спектров распределения редкоземельных элементов. В качестве материала, иллюстрирующего особенности применения перечисленных выше и ряда других подходов, выступают данные о валовом химическом составе песчаников и глинистых пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала, а также сортымской свиты нижнего мела Большехетской впадины Западно-Сибирского осадочного мегабассейна. **Результаты.** Показано, что подавляющее большинство рассмотренных в данной работе парных и треугольных диаграмм позволяет сделать согласующиеся между собой и не противоречащие общим геологическим представлениям выводы о составе пород-источников слагающего их материала. Эти выводы подкрепляют представления, получаемые в результате минералого-петрографического исследования песчаников.

Ключевые слова: песчаники, глинистые породы, методы реконструкции состава пород-источников сноса, породообразующие оксиды, редкие и рассеянные элементы, рифей, венд, верхний девон, нижний мел, Южный Урал, Средний Урал, Западно-Сибирский осадочный мегабассейн, Большехетская впадина

Благодарность

Авторы искренне признательны Н.С. Глушковой, выполнившей иллюстрации к этой статье.

Исследования проведены в соответствии с темами АААА-А18-118053090044-1 и АААА-А18-118053090045-8 государственного задания ИГГ УрО РАН.

Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods

Andrey V. Maslov^{1,2}, Oleg Yu. Melnichuk¹, Gunar A. Mizens¹, Yury V. Titov³, Maria V. Chervyakovskaya¹

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mails: amas2004@mail.ru, o.u.melnichuk@mail.ru, mizens@igg.uran.ru, masha_vuf_91@mail.ru

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

³Branch of "LUKOIL-Engineering Ltd." "KogalymNIPIneft" in Tyumen, 19/17 Central'naya st., Kogalym 628481, Russia, e-mail: titovoil@k66.ru

Received 26.02.2019, accepted 12.03.2019

Research subject. In this paper, we consider specific features of the use of litho- and isotopic-geochemical data for the purposes of provenance reconstruction. **Methods and materials.** The reconstruction tools under consideration included the analysis of the ratio of major oxides and variable trace elements, as well as the study of the distribution of trace elements. The research potential of these methods was illustrated using the data on the bulk chemical composition of sandstones and mudstones from the Bir'yan Member of the Upper Riphean Zilmerdak Formation, Upper Vendian Basa

Для цитирования: 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. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62

For citation: Maslov A.V., Melnichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Litosfera*, 20(1), 40–62. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62

© А.В. Маслов, О.Ю. Мельничук, Г.А. Мизенс, Ю.В. Титов, М.В. Червяковская, 2020

Formation (Southern Urals), Upper Devonian Kodinka and Ust'kodinka formations (Middle Urals), Lower Cretaceous Sortym Formation (Western Siberian sedimentary megabasin, Bolshekhetskaya depression). *Results.* It was shown that the use of the vast majority of the described paired and triangular diagrams allows conclusions (consistent both with each other and conventional geological concepts) to be drawn about the composition of source rocks. These findings reinforce the insights gained from mineralogical and petrographic studies of sandstones.

Keywords: sandstones, mudstones, shales, provenance reconstruction methods, rock-forming oxides, trace elements, Riphean, Vendian, Upper Devonian, Lower Cretaceous, Southern Urals, Middle Urals, West Siberian sedimentary megabasin, Bolshekhetskaya depression

Acknowledgements

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

The studies were conducted in accordance with the themes No. AAAA-A18-118053090044-1 and No. AAAA-A18-118053090045-8 of the state assignment of the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

ВВЕДЕНИЕ

В первой статье этого обзора (Маслов и др., 2019a) рассмотрены традиционные и современные приемы и методы реконструкции петрофонда источников сноса на основе данных о минералогическо-петрографических особенностях песчаников. Настоящая работа посвящена лито- и изотопно-геохимическим подходам и методам, позволяющим с определенной степенью достоверности судить о присутствовавших на палеоводосборах комплексах пород по данным о содержаниях в песчаниках и глинистых породах основных породообразующих оксидов, а также распределении в них редких и рассеянных элементов. С учетом того очевидного факта, что "...состав осадков отличается от состава исходных пород в области сноса, поскольку обломочный материал (того или иного) района был просеян через "геологическое сито" и претерпел существенные изменения в результате селективной утери одних компонентов и обогащения другими..., абразии при транспортировке, а также изменения или растворения на стадии диагенеза..." (Петтиджон, 1981, с. 605), комплексное (при возможности) использование данных минералого-петрографических и литогеохимических исследований представляется весьма и весьма необходимым.

Для более наглядного представления материала на большинстве из приведенных в настоящей публикации диаграмм показано расположение фигуративных точек состава песчаников и глинистых пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Башкирского мегантиклинория (западный склон Южный Урал), кодинской и устькодинской свит верхнего девона восточного склона Среднего Урала, а также верхней (валанжинской) части сортымской свиты Большехетской впадины Западно-Сибирского осадочного мегабассейна (Маслов и др., 2019a, см. рис. 1). Краткие сведения о составе песчаников указанных стратиграфических единиц приведены в этой же работе.

ДИАГРАММЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ ОСНОВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ОКСИДОВ

Диаграммы, дающие возможность с той или иной степенью достоверности реконструировать состав пород в источниках сноса по соотношению в песчаниках и глинистых породах основных породообразующих оксидов, появились в начале 1980-х гг. (Bavinton, 1981; Taylor, McLennan, 1985; Roser, Korsch, 1988; Rollinson, 1994; Интерпретация..., 2001; Geochemistry..., 2003; и др.).

Так, в публикации (Bavinton, 1981), а затем и в известной монографии (Taylor, McLennan, 1985) мы видим треугольную диаграмму $(\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2/10 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ с полями составов, типичных для продуктов размыва гранитов, базальтов, ультраосновных и осадочных пород. Указанную диаграмму можно использовать как для песчаников (с максимальным успехом, естественно, петрогенных), так и глинистых пород (рис. 1). Очевидно, однако, что положение полей их фигуративных точек будет несколько различным. Так, точки мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых сланцев бирьянской подсвиты зильмердакской свиты смещены относительно точек чередующихся с ним субаркозовых и аркозовых песчаников в сторону вершины $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$. Они содержат заметно меньше оксида кремния. Перекрытия между этими двумя типами пород на рассматриваемой диаграмме практически не наблюдается. Поле кварц-полевошпатовых граувакковых песчаников кодинской и устькодинской свит верхнего девона, напротив, имеет существенное перекрытие с полем точек переслаивающихся с ними аргиллитов.

В монографии (Геосинклинальный литогенез..., 1987) для реконструкции состава пород-источников кластики для глинистых и тефроидных осад-

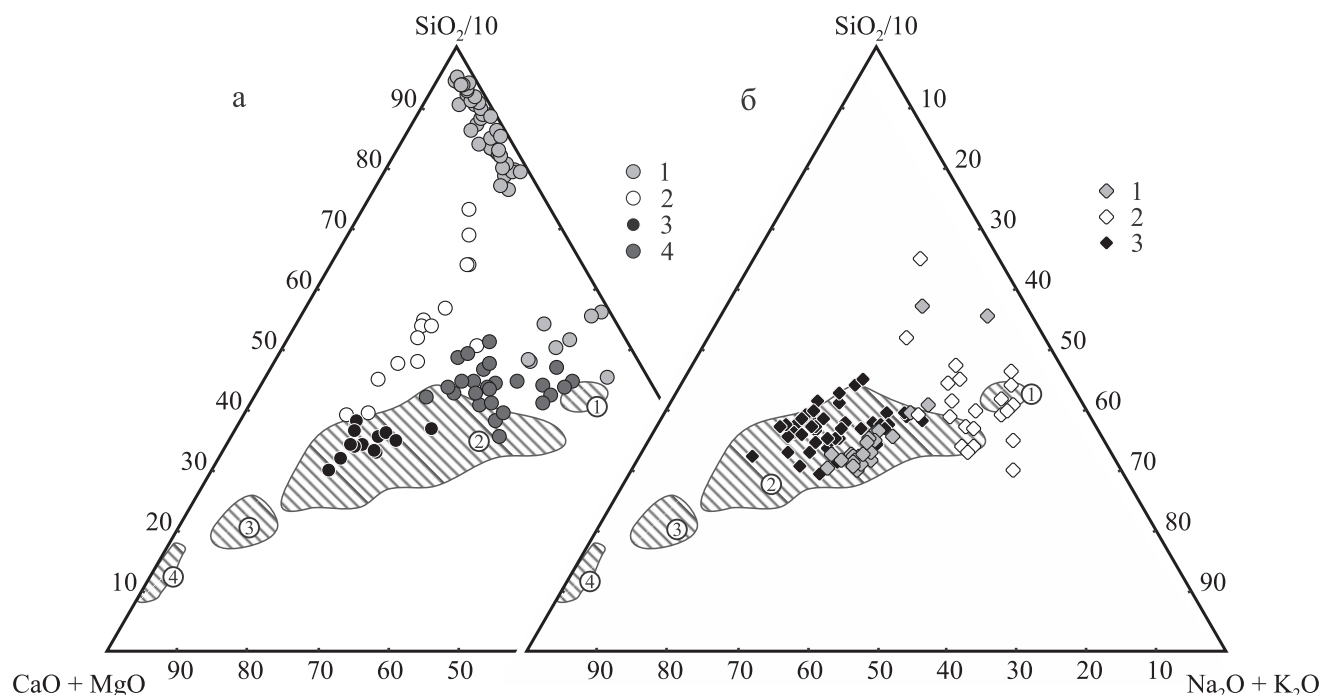


Рис. 1. Диаграмма $(\text{CaO} + \text{MgO})\text{--SiO}_2/10\text{--}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Bavinton, 1981).

а – точки состава песчаников: 1 – бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея Южного Урала, 2 – басинской свиты верхнего венда Южного Урала, 3 – кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала, 4 – верхней (валанжинской) части сортымской свиты нижнего мела Большехетской впадины Западно-Сибирского осадочного мегабассейна; б – точки состава глинистых пород тех же литостратиграфических единиц, кроме меловых отложений Западно-Сибирского бассейна.

Заштрихованы поля продуктов разрушения, цифры в кружках: 1 – гранитов, 2 – осадочных пород, 3 – базальтов, 4 – ультраосновных пород.

Fig. 1. Diagram $(\text{CaO} + \text{MgO})\text{--SiO}_2/10\text{--}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Bavinton, 1981).

а – points of sandstones: 1 – Bir'yan Subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation, the Southern Urals, 2 – Upper Vendian Baza Formation, the Southern Urals, 3 – Upper Devonian Kodinka and Ust'kodinka formations of the Middle Urals, 4 – the upper (Valanginian) part of the Lower Cretaceous Sortym Formation, the Bolshekhetskaya Depression of the West Siberian sedimentary megabasin; б – points of mudstones of the same lithostratigraphic units except Cretaceous sediments of the West Siberian.

Shaded fields of products of destruction figures in the circles: 1 – granites, 2 – sedimentary rocks, 3 – basalts, 4 – ultrabasic rocks.

ков Филиппинского моря использована диаграмма $10\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$, на которой показаны средние составы гранитоидов и четвертичных вулканитов Японских островов, четвертичных вулканитов Идзу-Мариинской островной дуги и базальтов фундамента Филиппинской и Паресе-Вела котловин (рис. 2). При ее построении следует обратить внимание на то, что это не обычная треугольная диаграмма, в которой каждая вершина отвечает 100-процентному содержанию того или иного компонента, а лишь часть такого треугольника. Подавляющее большинство точек состава, иллюстрирующих все рассматриваемые здесь нами диаграммы и графики, локализовано на данной диаграмме вблизи референтной точки гранитоидов, некоторое же количество точек песчаников басинской свиты верхнего венда Южного Урала тяготеет к вершине SiO_2 .

В статье (Roser, Korsch, 1988) проанализирован состав песчаников и аргиллитов нескольких комплексов граувакк Новой Зеландии, сложенных продуктами разрушения пород различных питающих провинций: 1) базальтов и андезитов, 2) андезитов, 3) кислых плутонических и вулканических пород, 4) зрелых кварцевых песчаников. Авторами показано, что составы граувакк в ряду от первой группы к четвертой характеризуются ростом значений $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и снижением величины $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO}$. При этом на парных диаграммах, построенных для различных оксидов или их отношений, вследствие вариаций валового химического состава пород при уменьшении размера зерен наблюдается существенное перекрытие полей разных групп. Однако этот эффект почти исчезает при применении дискриминантного анализа с использованием Al_2O_3 , TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, MgO , CaO , Na_2O и

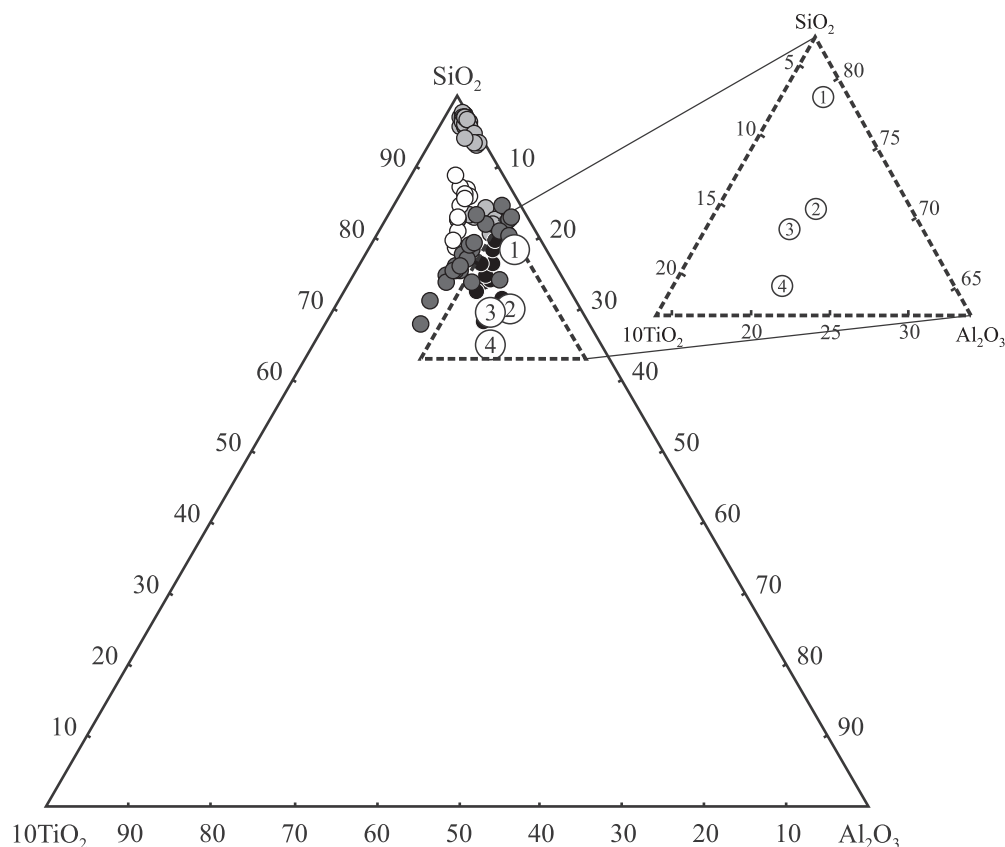


Рис. 2. Диаграмма $10\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$, использованная для реконструкции состава источников материала тонкозернистых обломочных/глинистых и тефроидных осадков Филиппинского моря (Геосинклинальный литогенез..., 1987), с нанесенными на нее точками состава песчаников верхнего докембрия и верхнего девона Южного и Среднего Урала, а также сортымской свиты нижнего мела Большехехетской впадины.

Цифры в кружках: 1 – гранитоиды Японских островов, 2 – четвертичные вулканиты Японских островов, 3 – четвертичные вулканиты Идзу-Марианской островной дуги, 4 – базальты фундамента котловин Филиппинской и Паресе-Вела. Остальные условные обозначения – см. рис. 1а. Штриховой линией показан оригинальный треугольник, приведенный в указанной выше работе.

Fig. 2. Diagram $10\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ used to reconstruct the composition of the provenances for fine-grained detrital/clay and tephroid sediments of the Philippine Sea (Geosinclinal'nyi litogenez, 1987), with data points of the Upper Precambrian and Upper Devonian sandstones, Southern and Middle Urals, as well as sandstones of the Lower Cretaceous Sortym Formation of the Bolshekhetskaya depression.

Figures in circles: 1 – granitoids of the Japanese islands, 2 – Quaternary volcanites of the Japanese islands, 3 – Quaternary Izu-Mariana island arc volcanics, 4 – basalts of the Philippine and Parese-Vela basin basement. Other symbols – see Fig. 1. The dashed line shows the original triangle given in the abovementioned work.

K_2O (рис. 3)¹. Проверка указанного подхода проведена Б. Розером и Р. Коршем на примере данных по составу вулканических, интрузивных и осадочных пород Новой Зеландии, островной дуги Лау, а также различных осадочных образований Австралии и периферии Тихого океана. Оказалось, что предложенный авторами алгоритм дает хорошие результаты при определении состава пород источни-

ков сноса и в целом не зависит от вариаций гранулометрического состава осадочных образований. Для образцов с существенным содержанием биогенных компонентов (CaCO_3 и SiO_2)² в цитированной работе предложены коэффициенты дискриминантных функций для TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, MgO , Na_2O и K_2O нормированных по Al_2O_3 , однако в данном

¹ $F1 = 30.638\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 12.541\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 7.329\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 12.031\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 35.402\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 6.382$; $F2 = 56.500\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 10.879\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 30.875\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 5.404\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 11.112\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 3.89$.

² В случае высоких (более 5 мас. %) содержаний в песчаниках или глинистых породах карбонатных компонентов можно прибегнуть к тем или иным “компенсационным мерам” (Маслов и др., 2012; Литогеохимия..., 2015), но не всегда это даст ожидаемые/корректные результаты.

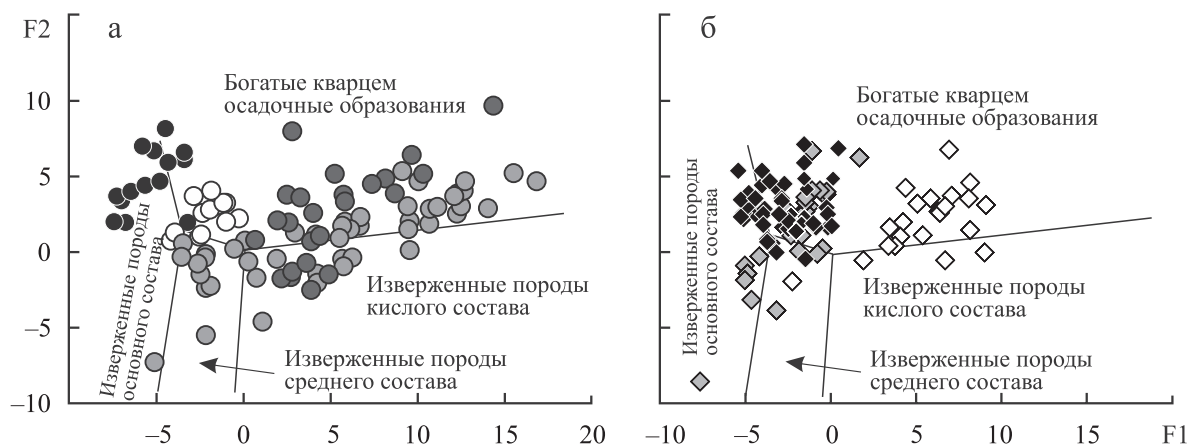


Рис. 3. Положение точек состава песчаников (а) и тонкозернистых обломочных пород (б) бирьянской под-свиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала, а также сортымской свиты Большехетской впадины на диаграмме F1–F2 (Roser, Korsch, 1988).

Условные обозначения – см. рис. 1.

Fig. 3. Position of data points of sandstones (a) and fine-grained rocks (б) of the Bir'yan subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation and the Upper Vendian Basa Formation, Southern Urals, and the Upper Devonian Kodinka and Ust'kodinka formations, Middle Urals, on the F1–F2 diagram (Roser, Korsch, 1988).

Legend – see Fig. 1.

случае эффект разделения различных по составу источников силикокластики не был выражен столь же хорошо, как в первом случае. В заключении к статье авторы указывают на определенные затруднения при использовании разработанного ими подхода при исследовании древних осадочных последовательностей, предполагая, что выходом из этого может быть привлечение независимых данных, например тех, что получены при исследовании состава обломков конгломератов или валового химического состава их матрикса.

В публикации (Hayashi et al., 1997) обоснована возможность использования для целей реконструкции состава пород в областях размыва такого параметра, как Al_2O_3/TiO_2 . Наиболее приемлем этот подход для граувакк.

ДИАГРАММЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ О СОДЕРЖАНИИ И СООТНОШЕНИИ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В конце 1980-х–начале 1990-х гг. было установлено, что эффективным методом реконструкции состава пород на палеоводосборах является также анализ присущих тонкозернистым обломочным образованиям/глинистым породам индикаторных отношений элементов-примесей (например, La, Th, Co, Sc, Cr, Ni, V, Zr и ряда др.), в основу которого легли представления о том, что: 1) содержания и отношения редких и рассеянных элементов в гли-

нистых породах существенно не меняются в процессах литогенеза и метаморфизма, 2) определенные типы магматических пород характеризуются определенными ассоциациями редких и рассеянных элементов. Это хорошо проиллюстрировано в (Интерпретация..., 2001), где показано, что для ультраосновных пород типичными являются Ni, Cr, Co, Mg, Fe, Mn, Pd, Pt, для основных – V, Cu, Sc, Sb, Ag, Zn, Nb, Y, для средних – Ti, P, Sr, As, Cd и для кислых – Sn, Pb, Zn, Be, Ba, Mo, U, W, F, Cl, Li, Rb, Th и Ta. В монографии (Юдович, Кетрис, 2011) указано, что характерными для ультраосновных пород являются Cr, Co и Ni, для основных Sc, V, Cr, Ni, Cu, Ti и Co, для кислых – Li, Rb, Be, REE, Cs, Sn, W, Re, Rb и Pb. Показателями присутствия в источниках сноса щелочных породы являются Zr, Nb, Ba и Hf. Такие элементы, как Zn, Cd, Bi и благородные металлы, могут выступать в качестве индикаторов петрофона лишь в случае близкого расположения источников сноса к области осадконакопления. Повышенные количества Mn в осадочных породах указывают на присутствие в них продуктов как основного, так и кислого вулканизма.

Данный подход наиболее приемлем при исследовании относительно мощных тонкообломочных осадочных последовательностей, не содержащих или почти не содержащих песчаников, гравелитов и конгломератов. Перечисленные элементы слабо растворимы в воде и вследствие этого, как предполагают многие специалисты, почти без потерь перемещаются из областей сноса в бассейны

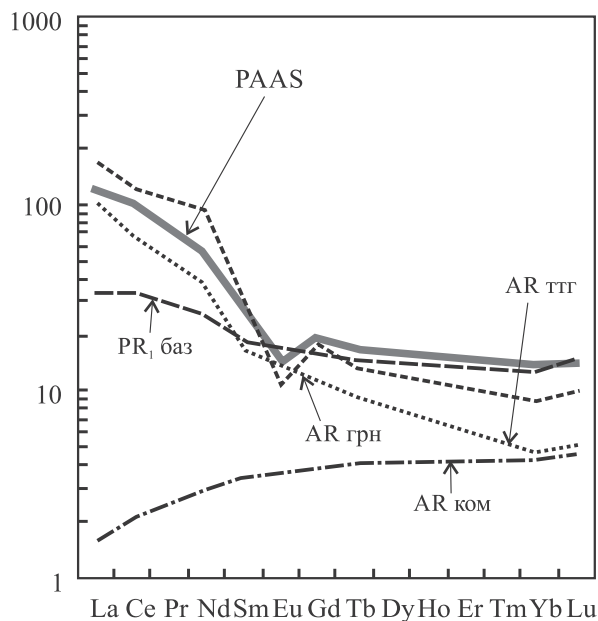


Рис. 4. Нормированные по хондриту (Taylor, McLennan, 1985) спектры распределения РЗЭ в архейских коматиитах (AR ком), средних гранитах (AR грн) и породах тоналит-гранодиорит-гранитных ассоциаций (AR ттг) того же возраста, а также раннепротерозойских базальтах (PR₁ баз) (все по (Condie, 1993)) и PAAS.

Fig. 4. Normalized to chondrite (Taylor, McLennan, 1985) REE spectra in Archean komatiites (AR ком), the average Archean granites (AR грн), and rocks of the Archean tonalite-trondjemite-granite associations (AR ттг), as well as Early Proterozoic basalts (PR₁ баз) (all by (Condie, 1993)) and PAAS.

осадконакопления (Nesbitt, 1979; Taylor, McLennan, 1985; McLennan, 1989; Condie, Wronkiewicz, 1990; Condie, 1993; Cullers, 1995, 2002; и др.).

На практике обычно используются не абсолютные содержания элементов указанных выше ассоциаций, а их отношения: так, для кислых магматических образований (граниты, гранодиориты) характерны на один-два порядка более высокие, нежели для пород основного состава, значения отношений Th/Sc, La/Sc, La/Co, Th/Co, Th/Cr и V/Ni (McLennan et al., 1993; Condie, 1993; Rollinson, 1994; Интерпретация..., 2001; Geochemistry..., 2003) и, наоборот, основные магматические породы имеют на один-два порядка более высокие значения Cr/Zr, Cr/V и ряда других индикаторных отношений (табл. 1).

Состав пород источников сноса и тип размывавшейся верхней континентальной коры в определенной степени контролируют и разнообразие нормированных по хондриту спектров распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в осадочных породах (McLennan et al., 1990). Например, магматические породы основного состава характеризуются низкими отношениями легких лантаноидов (ЛРЗЭ)



Рис. 5. Распределение средних значений Cr/Ni в тонкозернистых обломочных породах верхней перми (Южный Урал, широтное течение р. Урал) (Мизенс, Маслов, 2014).

В числителе – среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значения.

Fig. 5. Distribution of average Cr/Ni values in fine-grained rocks of the Upper Permian deposits (Southern Urals, latitudinal current of the Urals River) (Mizens, Maslov, 2014).

In numerator – average arithmetical, in denominator – min and max values.

к тяжелым (ТРЗЭ) (ЛРЗЭ/ТРЗЭ < 4–5) и не имеют выраженной отрицательной Eu аномалии (Eu/Eu* > 0.85–0.90), тогда как кислым породам свойственны высокие отношения ЛРЗЭ/ТРЗЭ (> 8) и отчетливая отрицательная (< 0.85) Eu аномалия (Taylor, McLennan, 1985; McLennan, Taylor, 1991) (рис. 4). Считается также, что значения (La/Yb)_N ≥ 20 указывают на преобладание на палеоводосборах гранитоидов (Wronkiewicz, Condie, 1990). По данным (Condie, 1993), для среднего состава архейской коры характерны следующие значения отношений: (La/Yb)_N = 15.68, (Gd/Yb)_N = 2.04 и Eu/Eu* = 0.83, а

Таблица 1. Значения ряда индикаторных отношений элементов-примесей в некоторых референтных объектах (содержания элементов в них заимствованы из (Condie, 1993))**Table 1.** The values of indicator values of impurity elements in some reference objects (the content of elements is borrowed from (Condie, 1993))

Средние породы и ассоциации	Th/Sc	La/Sc	La/Co	Th/Co	Th/Cr	V/Ni	Cr/Zr	Cr/V	Cr/Ni
ТТГ-ассоциация									
архей	0.57	0.43	3.00	0.40	0.18	2.85	0.14	0.59	1.69
протерозоя	0.83	2.17	2.17	0.83	0.29	4.67	0.23	0.50	2.33
фанерозоя	0.71	1.79	1.79	0.71	0.30	5.33	0.24	0.41	2.20
Граниты									
архейские	3.75	12.50	14.29	4.29	0.94	1.25	0.10	1.07	1.33
протерозойские	3.60	9.60	8.73	3.27	1.00	1.33	0.08	0.90	1.20
фанерозойские	3.60	8.00	13.33	6.00	2.25	2.57	0.03	0.44	1.14
Кислые вулканические породы									
позднего архея	0.125	1.25	2.00	0.20	0.10	2.67	0.09	0.50	1.33
позднего протерозоя	0.50	2.06	5.83	1.42	0.94	5.00	0.04	0.30	1.50
палеозоя	0.90	2.80	5.60	1.80	1.50	4.17	0.03	0.24	1.00
мезозоя и кайнозоя	0.78	2.15	4.67	1.70	2.04	3.75	0.02	0.17	0.63
Андезиты									
позднего архея	0.18	0.90	0.38	0.07	0.02	1.75	1.11	1.01	1.77
позднего протерозоя	0.19	0.85	0.49	0.11	0.07	3.40	0.33	0.29	1.00
палеозоя	0.22	0.90	0.90	0.22	0.10	3.50	0.26	0.30	1.05
мезозоя и кайнозоя	0.22	1.11	0.91	0.18	0.08	3.33	0.30	0.34	1.14
Известково-щелочные базальты									
раннего архея	0.03	0.20	0.13	0.02	0.002	1.26	5.56	1.90	2.40
раннего протерозоя	0.06	0.28	0.28	0.06	0.01	2.63	1.37	0.72	1.90
позднего протерозоя	0.08	0.39	0.31	0.06	0.02	3.28	1.19	0.56	1.83
палеозоя	0.07	0.32	0.32	0.07	0.02	3.86	1.07	0.54	2.10
мезозоя и кайнозоя	0.07	0.33	0.31	0.07	0.02	3.82	1.15	0.58	2.21
Архейские коматииты	0.01	0.02	0.005	0.003	0.0001	0.09	77.14	16.88	1.59
Раннеархейские граувакки	0.43	1.79	0.89	0.21	0.02	0.56	2.06	3.00	1.67
Раннепротерозойские граувакки	0.53	2.13	1.28	0.32	0.06	1.63	0.89	1.25	2.04
Граувакки мезозоя и кайнозоя	0.61	2.00	1.87	0.57	0.12	4.33	0.48	0.54	2.33
Кратонные сланцы									
архейские	0.40	1.46	0.99	0.27	0.02	0.70	3.36	3.29	2.29
протерозойские	0.84	2.24	2.11	0.79	0.12	1.92	0.59	1.15	2.21
фанерозойские	0.84	2.43	1.94	0.68	0.13	2.17	0.52	0.89	1.93
РААС	0.91	2.38	1.65	0.63	0.13	2.73	0.52	0.73	2.00
Кратонные песчаники									
архейские	2.43	1.03	1.71	0.59	0.04	0.48	1.17	9.27	4.43
протерозойские	1.75	4.21	3.61	1.50	0.18	2.64	0.27	0.83	2.18
фанерозойские	2.00	5.15	4.12	1.60	0.13	1.88	0.29	2.00	3.75

для раннепротерозойской, соответственно, – 11.50, 1.78 и 0.72. Несколько иные оценки тех же параметров для архейской верхней коры можно найти в публикации (Taylor, McLennan, 1995).

По данным исследования докембрийских пелитов Каапвальского кратона (Condie, Wronkiewicz, 1990), отношение Cr/Th представляет собой, по всей видимости, значительно более чувствительный

индикатор состава источников сноса, чем Eu/Eu*, (La/Yb)_N или Th/U. Следует, однако, иметь в виду, что содержания Cr в осадочных породах могут варьировать под влиянием процессов выветривания и переотложения, и только при наличии положительной корреляции между такими величинами, как Cr/Th и Sc/Th, отношение Cr/Th действительно является индикатором состава источников сноса.

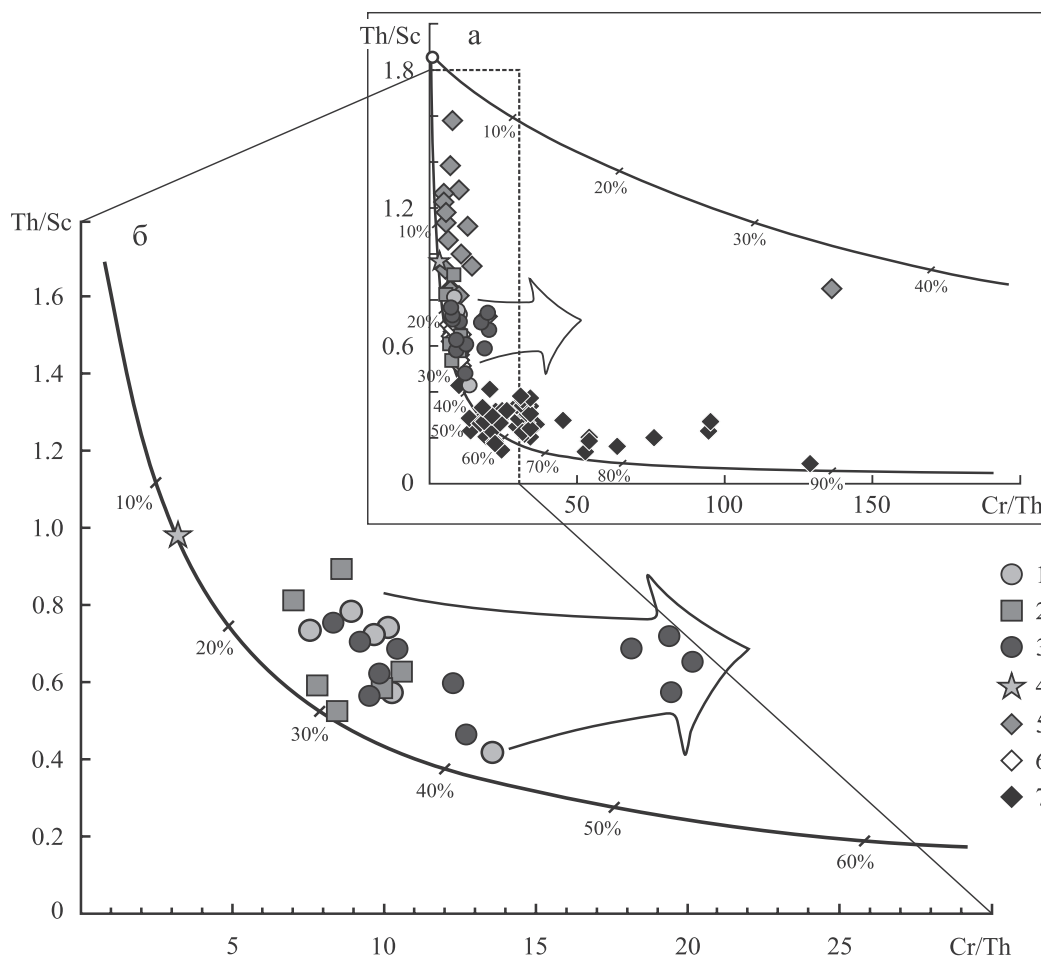


Рис. 6. Диаграмма Cr/Th–Th/Sc (Condé, Wronkiewicz, 1990) для тонкозернистых обломочных образований с точками состава пелитов Лигурии и Корсики, по (Bracciali et al., 2007), а также мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых сланцев бир'янской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея, аргиллитов басинской свиты верхнего венда Южного Урала и глинистых пород верхнего девона (кодинская и усть-кодинская свиты) Среднего Урала.

1–3 – тектонические комплексы: 1 – Корсики, 2 – внутренней части Лигурии, 3 – внешней части Лигурии; 4 – состав верхней континентальной коры, по (Plank, Langmuir, 1998). Остальные условные обозначения – см. рис. 16. Стрелкой показано изменение/сдвиг состава некоторых образцов внешней части Лигурии в сторону составов с большей долей ультрамафитового обломочного материала. Гиперболы – теоретические линии смешения кислого и ультраосновного материала (доля последнего указана в процентах).

Fig. 6. Cr/Th–Th/Sc diagram (Condé, Wronkiewicz, 1990) for fine-grained deposits with data points of the pelites of Liguria and Corsica, according to (Bracciali et al., 2007), as well as fine-grained clayey siltstones and shales of the Bir'yany subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation, mudstones of the Upper Vendian Basa Formations, Southern Urals, and the Upper Devonian clay rocks (Kodinka and Ust'kodinka formations), the Middle Urals.

Tectonic complexes: 1 – Corsica units; 2 – Internal Ligurian units; 3 – External Ligurian units; 4 – composition of the upper continental crust (PLUC) according to (Plank, Langmuir, 1998). Other symbols – see Fig. 16. The arrow indicates the shifting of some External Ligurian units samples toward the ultramafic-felsic mixing line, suggesting a contribution from ultramafic detrital material. Hyperbolas are theoretical lines of mixing acidic and ultrabasic material (proportion of the latter is indicated in percent).

В качестве примеров диаграмм, основанных на перечисленных выше индикаторных отношениях редких и рассеянных элементов, а также РЗЭ, отметим следующие. На присутствие в областях сноса пород ультраосновного состава указывает величина отношения Cr/Ni: в тонкозернистых обломочных осадках она равна 1.4–1.5 (рис. 5). При значениях Cr/Ni > 2.0 можно сделать вывод о существенной трансформа-

ции тонкой терригенной взвеси ультраосновного состава на путях переноса (Garver et al., 1996). По данным (Bracciali et al., 2007), наличие в осадочных породах продуктов размыва ультраосновных образований можно реконструировать как с помощью парной диаграммы Cr/Th–Th/Sc (Condé, Wronkiewicz, 1990) (рис. 6), так и с помощью треугольной диаграммы Ni–V–10Th (для глинистых пород) (рис. 7).

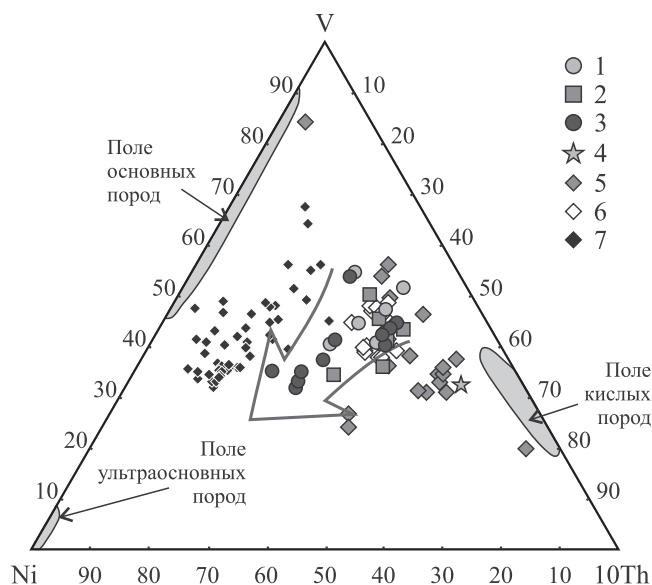


Рис. 7. Диаграмма Ni–V–10Th для тонкозернистых обломочных образований с нанесенными на нее точками состава пелитов Лигурии и Корсики, по (Bracciali et al., 2007), мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых сланцев бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея, аргиллитов басинской свиты верхнего венда Южного Урала, а также глинистых пород верхнего девона (кодинская и устькодинская свиты) Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 1 и 6. Стрелкой показано изменение/сдвиг состава некоторых образцов внешней части Лигурии в сторону составов с большей долей ультрамафитового обломочного материала.

Fig. 7. Ni–V–10Th plot for fine-grained terrigenous deposits with data points of the pelites of Liguria and Corsica, according to (Bracciali et al., 2007), fine-grained clayey siltstones and shales of the Biryann Subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation, the mudstones of the Upper Vendian Basa Formation, the Southern Urals, as well as the Upper Devonian (Kodinka and Ust'kodinka formations), the Middle Urals.

Legend – see Fig. 1 and 6. The arrow indicates the shifting of some External Ligurian unit samples toward the Ni corner suggests an ultramafic component in the detritus from the External Ligurian units.

Расшифровка состава пород источников сноса для петрогенных (прошедших только один цикл седиментации) осадочных образований может быть выполнена с использованием диаграммы Nb/Y–Zr/TiO₂ (рис. 8), предложенной в работе (Winchester, Floyd, 1977) для классификации “свежих” и метаморфизованных вулканических пород. Перед построением данной диаграммы по имеющимся в распоряжении исследователя аналитическим материалам необходимо удостовериться, что он имеет дело именно с “first cycle” (петрогенными) породами. Сделать это можно на основании критериев, предложенных Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис

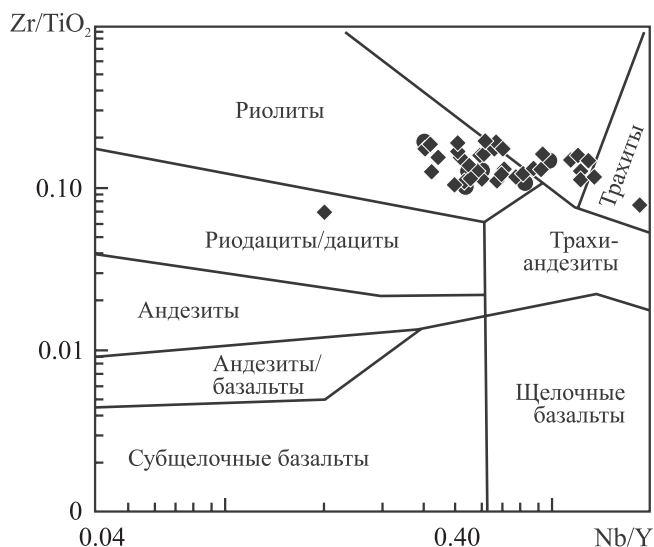


Рис. 8. Диаграмма Nb/Y–Zr/TiO₂ (Winchester, Floyd, 1977) и положение на ней точек состава аргиллитов кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 16.

Fig. 8. The Nb/Y–Zr/TiO₂ diagram (Winchester, Floyd, 1977) and the position on it data points of the mudstones of the Upper Devonian Kodinka and Ust'kodinka formations, Middle Urals.

Legend – see Fig. 16.

(2000), а также применив диаграмму Zr/Sc–Th/Sc (McLennan et al., 1993) (рис. 9). В соответствии с первым подходом “first cycle” породы должны характеризоваться положительной корреляцией между значениями титанового (TM = TiO₂/Al₂O₃) и железного [ЖМ = (FeO + Fe₂O₃ + MnO)/(Al₂O₃ + TiO₂)] модулей и отрицательной – между общей щелочностью [(HKM = (Na₂O + K₂O)/Al₂O₃) и гидролизатым (ГМ = (Al₂O₃ + TiO₂ + Fe₂O₃ + FeO + MnO)/SiO₂)] модулем. Второй подход основан на анализе соотношений в терригенных породах Zr/Sc и Th/Sc (McLennan, 1989; McLennan et al., 1993): повышенные значения Zr/Sc указывают на накопление вследствие многократного переотложения циркона (основной носитель Zr), тогда как параметр Th/Sc является обобщенным показателем процессов химической дифференциации магматических пород. Показателем “second cycle” (литогенной природы осадочных пород) может быть обогащение их монацитом. Индикатором этого процесса являются высокие значения отношения (Gd/Yb)_N и некоторые специфические особенности нормированных по хондриту спектров распределения РЗЭ (McLennan et al., 1993). В последней работе приведена также обобщенная геохимическая и изотопная (Nd) характеристика основных типов питающих провинций (табл. 2).

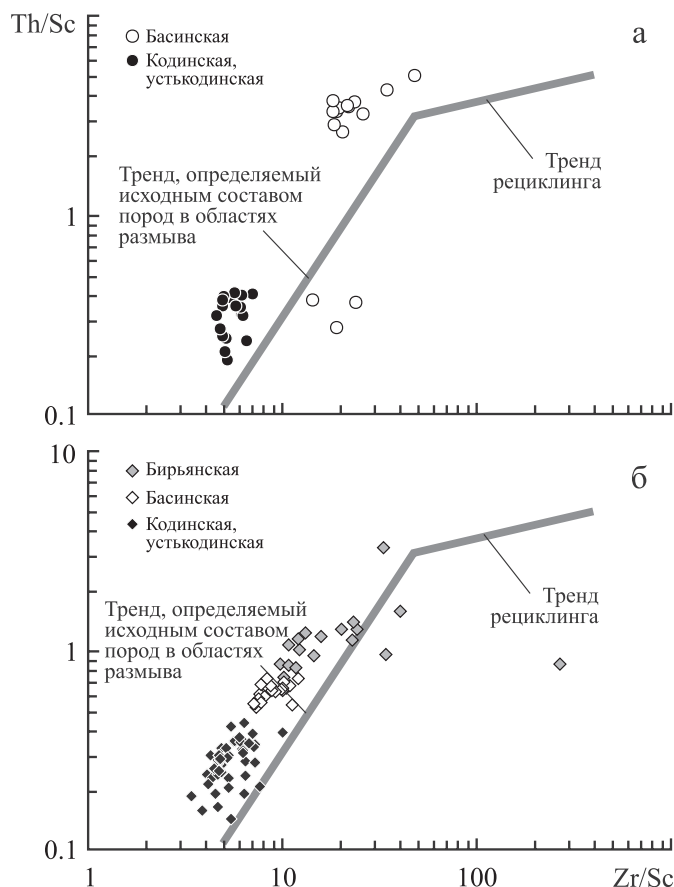


Рис. 9. Диаграмма Zr/Sc – Th/Sc (McLennan et al., 1993) с нанесенными на нее фигуративными точками песчанников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия Южного Урала и верхнего девона Среднего Урала.

Fig. 9. The Zr/Sc – Th/Sc diagram (McLennan et al., 1993) with data points of sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian deposits of the Southern Urals and the Upper Devonian deposits of the Middle Urals.

Для разграничения обломочного материала, формирующегося за счет эрозии пород архейских тоналит-гранодиорит-гранитных (ТТГ) ассоциаций и постархейских гранитоидов, может быть использована также диаграмма Yb_N – $(La/Yb)_N$ (Martin, 1986) (рис. 10). Архейские ТТГ ассоциации характеризуются высокими значениями $(La/Yb)_N$ (от 5 до более 150) и низкими содержаниями Yb ($0.3 < Yb_N < 8.5$). Постархейские гранитоиды, напротив, обладают низкими величинами $(La/Yb)_N$ (≤ 20) и высокими концентрациями Yb ($4.5 < Yb_N < 20$). Очевидно, что использовать указанную диаграмму лучше применительно к ранне- и позднекембрийским осадочным породам, так как в фанерозое в областях сноса доминируют уже в основном многократно рециклированные осадочные образования (Кузнецов, 2011 и др.).

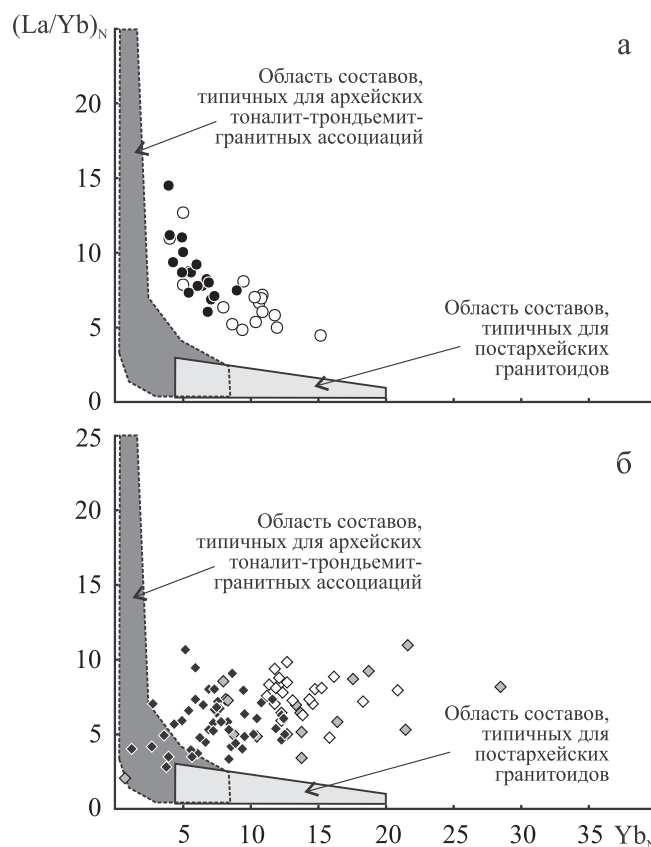


Рис. 10. Диаграмма Yb_N – $(La/Yb)_N$ (Martin, 1986) с нанесенными на нее точками состава песчанников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия Южного Урала и верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

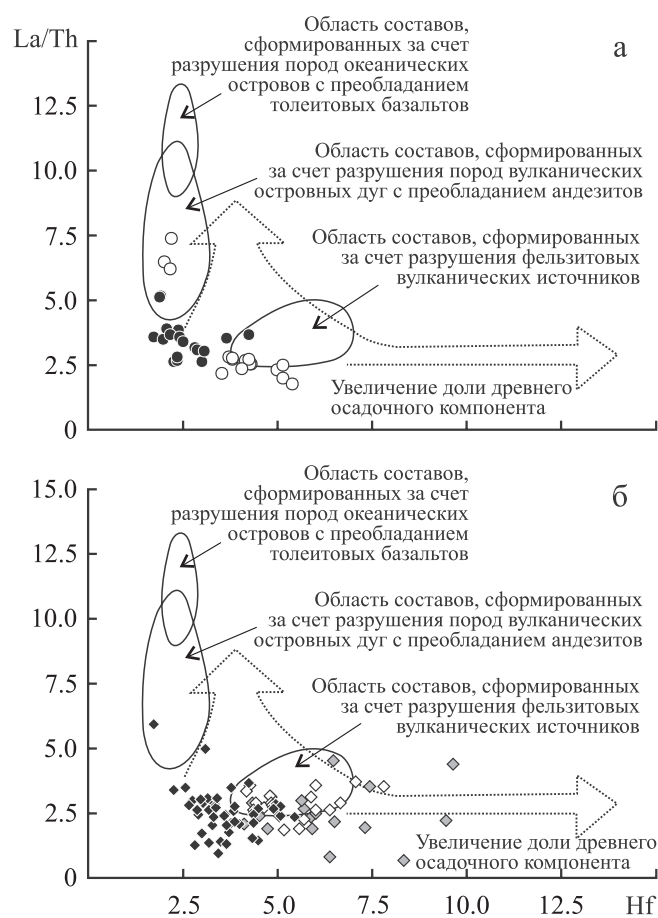
Fig. 10. The Yb_N – $(La/Yb)_N$ plot (Martin, 1986) with data points of sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian deposits of the Southern Urals and the Upper Devonian deposits of the Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

В публикации (Floyd, Leveridge, 1987) реконструкция различных типов питающих провинций выполнена с использованием диаграммы Hf – La/Th (рис. 11). Благодаря удачно выбранным параметрам на ней достаточно хорошо различаются поля составов осадочных образований, сформированных за счет разрушения пород океанических островов, сложенных толеитовыми базальтами ($Hf < 4.0$, $La/Th > 10.0$), андезитами ($Hf < 4.0$, $5 < La/Th < 12$) и кислыми вулканитами ($3 < Hf < 7$, $2 < La/Th < 5$), а также области, представляющие собой результат смешения кластики из указанных типов. Существенный рост содержания Hf при относительно небольшой величине La/Th предполагает, что в размыв были вовлечены более древние осадочные образования (в этом случае в осадочных породах происходит накопление циркона – основного носителя Hf).

Таблица 2. Геохимические и Nd-изотопные характеристики основных типов питающих провинций (McLennan et al., 1993)**Table 2.** Geochemical and Nd-isotope references of main types of provenances (McLennan et al., 1993)

Тип провинции	ϵ_{Nd}	Eu/Eu*	Th/Sc	Th/U	Другие
Древняя верхняя континентальная кора	≤ -10	$\approx 0.60-0.70$	≈ 1.0	>3.8 (глинистые породы)	Зрелый химический состав (высокие величины Si/Al и CIA); высокие концентрации крупноионных литофильных элементов, однородный состав
Рециклированные осадочные породы	≤ -10	$\approx 0.60-0.70$	≥ 1.0	—	Признаки концентрирования тяжелых минералов (например, Zr и Hf в случае циркона, РЗЭ в случае монацита)
Молодые недифференцированные островные дуги	$\geq +5.0$	≈ 1.0	<1.0	<3.0	Незрелый химический состав (низкие значения Si/Al и CIA); низкие концентрации крупноионных литофильных элементов, переменный состав
Молодые дифференцированные островные дуги	$\geq +5.0$	$\approx 0.5-0.9$	Различные	Различные	Зрелый химический состав (высокие величины Si/Al и CIA); высокие концентрации крупноионных литофильных элементов, переменный состав
Экзотические источники сноса	Химические и/или изотопные характеристики зависят от природы пород питающей провинции. Например, весьма высокие концентрации Mg, Cr, Ni, V и Cr/V могут являться свидетельством размыва пород офиолитовой ассоциации				

**Рис. 11.** Диаграмма Hf–La/Th (Floyd, Leveridge, 1987) с нанесенными на нее точками состава песчаников (а) и тонкозернистых обломочных пород (б) верхнего докембрия Южного Урала и верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

Fig. 11. The Hf–La/Th diagram (Floyd, Leveridge, 1987) with the data points of sandstones (а) and fine-grained rocks (б) of the Upper Precambrian of the Southern Urals and the Upper Devonian of the Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

Присущие осадочным образованиям содержания Ni, Cr, La и Th также в определенной мере позволяют разграничивать архейские и постархейские тонкозернистые обломочные породы. На диаграмме Th–La (Taylor, McLennan, 1985) первые в основном характеризуются содержаниями Th и La соответственно от 6 до 10 и от 1.5 до 10 г/т (рис. 12). Вторые на диаграмме Ni–Cr локализованы в области относительно небольших содержаний никеля и хрома (рис. 13).

По данным (McLennan, 1989; McLennan et al., 1993), основанным на исследовании турбидитовых отложений разного возраста, существенные различия между архейскими и постархейскими осадочными образованиями наблюдаются по величине

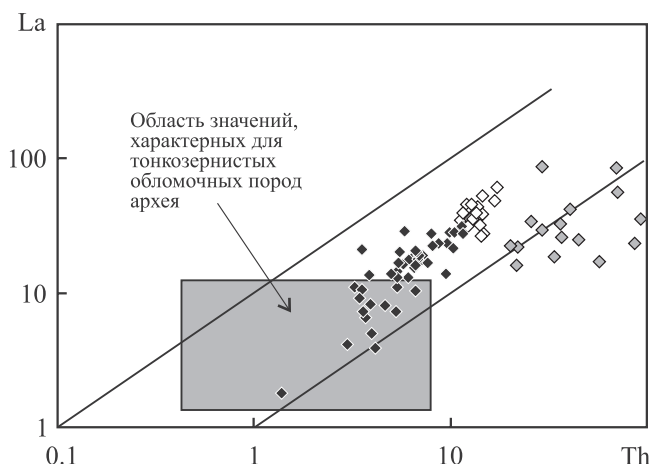


Рис. 12. Диаграмма Th–La (Taylor, McLennan, 1985) с нанесенными на нее фигуративными точками мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, а также кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 96.

Fig. 12. The Th–La plot (Taylor, McLennan, 1985) with data points of fine-grained clayey siltstones and shales of the Biryan Subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation and the Upper Vendian Basa Formation, the Southern Urals, as well as the Upper Devonian Codinka and Ust'kodinka formations, the Middle Urals.

Legend – see Fig. 96.

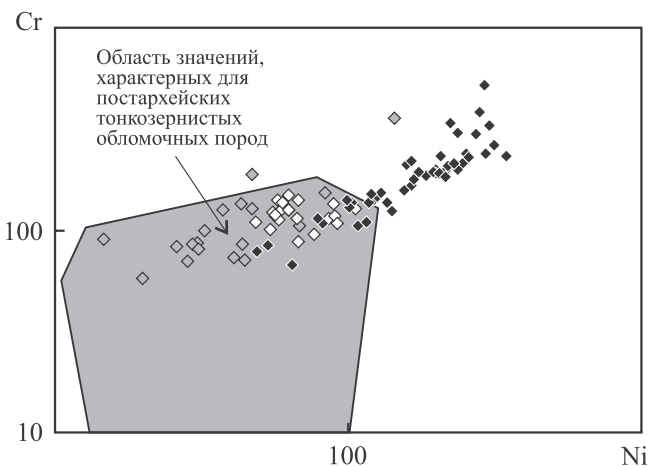


Рис. 13. Диаграмма Ni–Cr (Taylor, McLennan, 1985) с нанесенными на нее фигуративными точками мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых пород бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, а также кодинской и устькодинской свит верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 96.

Fig. 13. The Ni–Cr plot (Taylor, McLennan, 1985) with data points of fine-grained clayey siltstones and shales of the Biryan Subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation and the Upper Vendian Basa formation, the Southern Urals, as well as the Upper Devonian Codinka and Ust'kodinka formations, the Middle Urals.

Legend – see Fig. 96.

нам $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ и Eu/Eu^* (рис. 14). Первые характеризуются значениями $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ от 1.0 до 3.5 и иногда более, для вторых этот параметр, как правило, не выходит за пределы 1.0–2.0. Значения Eu/Eu^* в постархейских турбидитах находятся в интервале 0.6–1.2, а в архейских эта величина несколько выше (0.7–1.4).

Одной из наиболее широко используемых для разграничения продуктов эрозии кислых и основных магматических пород является диаграмма La/Sc – Th/Co (Cullers, 2002) (рис. 15). Поле составов осадочных отложений (это преимущественно глинистые породы), образованных за счет эрозии кислых магматических пород, описывается на ней значениями La/Sc и Th/Co в пределах 0.6–8 и 0.2–10. Поле составов, сформированных в результате эрозии пород основного состава, характеризуется значениями La/Sc и Th/Co 0.01–0.2 и 0.01–0.08 соответственно. В названной публикации также показано, что отношения Th/Cr , La/Co , $(\text{La}/\text{Lu})_N$ и Eu/Eu^* остаются относительно постоянными и при изменении соотношений в глинистых сланцах силикокластических и карбонатных компонентов.

Для установления состава пород в источниках сноса во многих публикациях используется также диаграмма Sc – Th/Sc (рис. 16) (см., например, (Fedot et al., 1997; Bhat, Ghosh, 2001)). К сожалению, нам не удалось найти ссылку на впервые применивших ее для указанной цели авторов.

В статье (Cullers, Podkovyrov, 2002) приведена диаграмма Eu/Eu^* – Th/Sc , на которой “гранитные источники” тяготеют к левой верхней области ($\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.6$, $\text{Th}/\text{Sc} > 1.0$ – 1.1), а “базальтовые” – к правой нижней ($\text{Eu}/\text{Eu}^* > 0.9$, $\text{Th}/\text{Sc} < 0.2$) (рис. 17). Между ними на данной диаграмме авторами также показан “гранодиорит-тоналитовый источник” и отмечено, что исследованные мезопротерозойские терригенные породы уйской серии Юдомо-Майского региона не попадают на линию тренда “граниты–базальты”, а следовательно, вклад базальтового источника в их состав был относительно небольшим.

В этой же публикации приведена треугольная диаграмма Th – La – Sc (рис. 18), на которой поле составов, свойственных продуктам разрушения гранитоидов, тяготеет к вершине La, фигура-

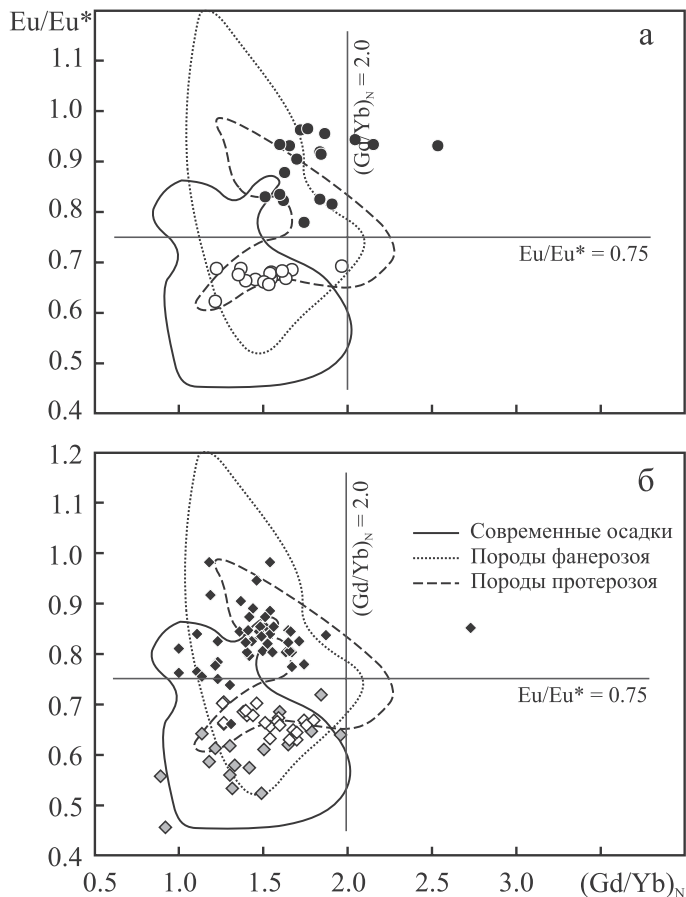


Рис. 14. Диаграмма $(Gd/Yb)_N$ – Eu/Eu^* (McLennan, 1989) с нанесенными на нее фигуративными точками песчаников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия и верхнего девона Южного и Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

Fig. 14. The $(Gd/Yb)_N$ – Eu/Eu^* diagram (McLennan, 1989) with data points of sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian and the Upper Devonian deposits of the Southern and Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

тивные точки терригенных образований, сформированных преимущественно за счет разрушения основных пород, локализованы у вершины Sc, а референтная точка гранодиоритов расположена примерно посередине между указанными вершинами треугольника, будучи несколько смещенной к стороне La–Sc. Эту диаграмму без ссылок на авторов мы можем также видеть и в более ранних публикациях, например в монографии (Taylor, McLennan, 1985).

В принципе, основываясь на приведенных в работах (Интерпретация..., 2001; Dobson et al., 2001; Geochemistry..., 2003; Маслов, 2005) ориентировочных величинах различных отношений элементов-примесей в основных типах магматических

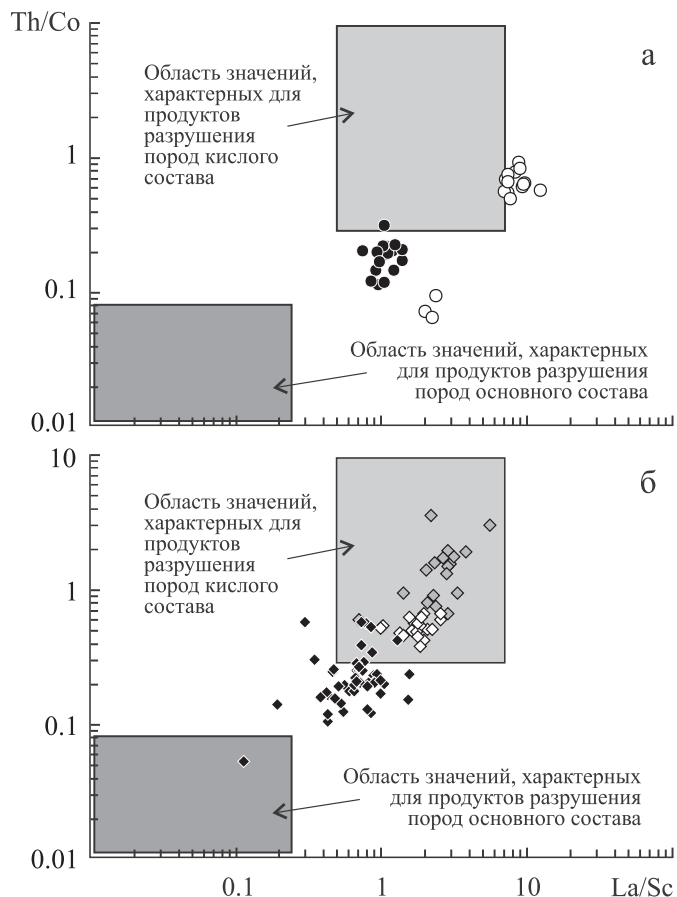


Рис. 15. Диаграмма La/Sc – Th/Co (Cullers, 2002) с нанесенными на нее точками состава песчаников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия Южного Урала и верхнего девона Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

Fig. 15. The La/Sc – Th/Co diagram (Cullers, 2002) with data points of sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian deposits of the Southern Urals and the Upper Devonian deposits of the Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

пород, можно использовать и другие парные диаграммы, например La/Sm – Sc/Th , Co/Hf – Ce/Cr . Важно только иметь в виду, что содержания некоторых малых элементов могут меняться в процессах мобилизации и транспортировки из областей сноса в конечные водоемы стока. Самый же простой способ реконструкции и сравнения состава пород в источниках сноса для осадочных образований – это сопоставление присущих им спектров распределения редких и рассеянных элементов с их распределением в эталонных/референтных объектах, например PAAS (Taylor, McLennan, 1985) (рис. 19), NASC или среднем архейском/протерозойском/фанерозойском кратонном песчанике (Condie, 1993). А так как таких референтных

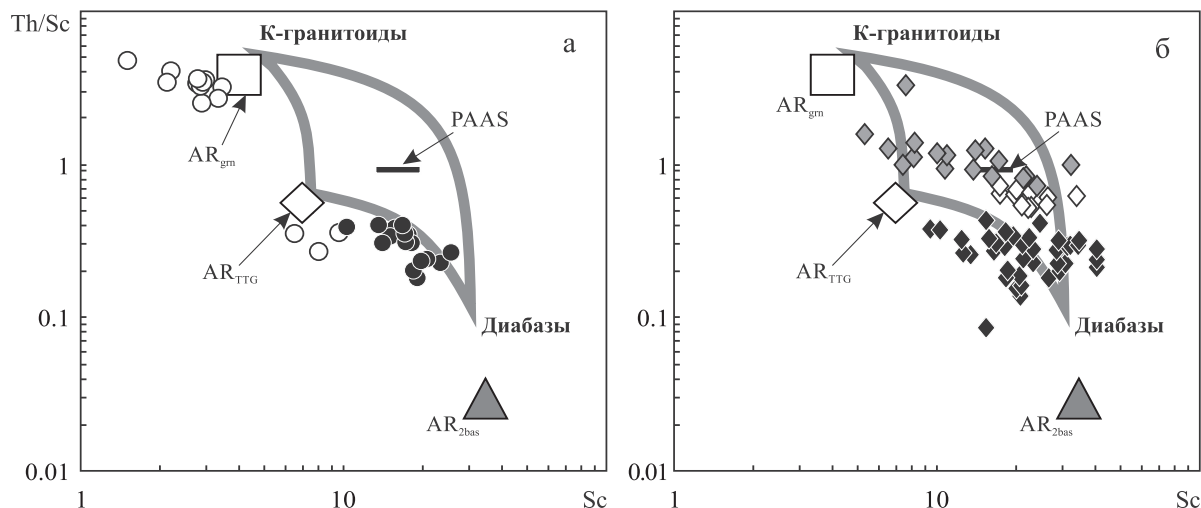


Рис. 16. Диаграмма Sc–Th/Sc с нанесенными на нее точками состава песчаников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия и верхнего девона Южного и Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

Fig. 16. The Sc–Th/Sc diagram with data points of the sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian and the Upper Devonian deposits of the Southern and Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

объектов много³, то выполнение подобных упражнений может иметь и самостоятельную ценность. Другой подход такого типа – сопоставление валовых химических составов петрогенных песчаников с составом предполагаемых по общегеологическим реконструкциям пород-источников обломочного материала. Для Южного Урала такие исследования с определенным успехом были выполнены А.М. Фазлиахметовым (2011а, б; и др.).

Sm–Nd СИСТЕМАТИКА ПЕСЧАНИКОВ И ГЛИНИСТЫХ ПОРОД

Весьма интересную информацию для расширения взаимодействия процессов седиментации и магматизма дает анализ Sm–Nd систематики глинистых пород и песчаников. Известно, что отношения Sm/Nd в глинистых сланцах довольно постоянны

³ Это, например, Северо-Американский палеозойский сланец/North American Palaeozoic shales, NASC (Haskin, Haskin, 1966; Gromet et al., 1984), Европейский сланец/European shales, ES (Haskin et al., 1966), Средняя почва/Average Soil, AS (Shacklette, Boerngen, 1984; Negrel et al., 2015), Составная проба глинистых пород Русской платформы/Russian Platform Shale composite, RPSC (Мигдисов и др., 1994), Средний речной взвешенный сток/Average river suspended load, AR-SL (Goldstein, Jacobsen, 1988), Средний Лесс/Average Loess, AL (Gallet et al., 1998; Jahn et al., 2001), Средний тонкозернистый аллювиальный осадок Северо-Восточной Австралии/Mud from Queensland, MUQ (Kamber et al., 2005), Средний взвешенный материал мировых рек/Average Suspended Sediment in World Rivers, SSWR (Viers et al., 2009) и др.

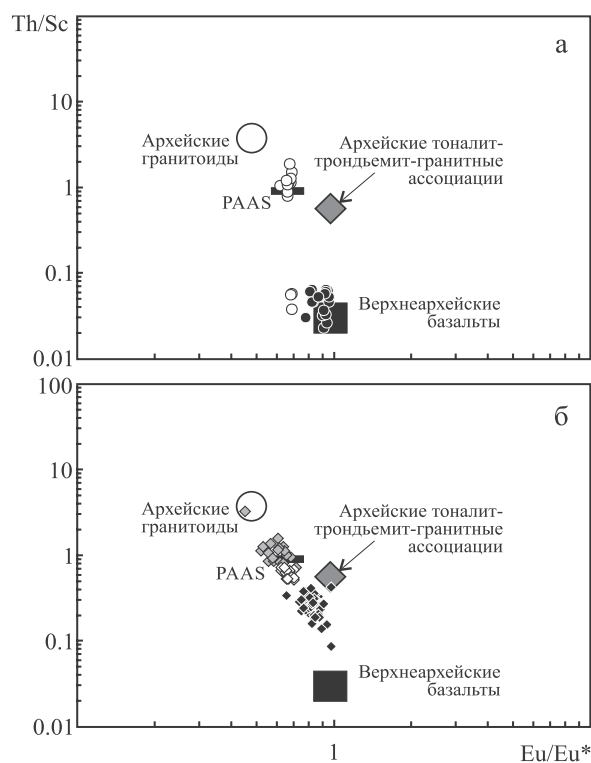


Рис. 17. Диаграмма Eu/Eu*–Th/Sc (Cullers, Podkovyrov, 2002) с нанесенными на нее точками состава песчаников (а) и глинистых пород (б) верхнего докембрия и верхнего девона Южного и Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 9.

Fig. 17. The Eu/Eu*–Th/Sc diagram (Cullers, Podkovyrov, 2002) with data points of the sandstones (a) and clay rocks (б) of the Upper Precambrian and the Upper Devonian deposits of the Southern and Middle Urals.

Legend – see Fig. 9.

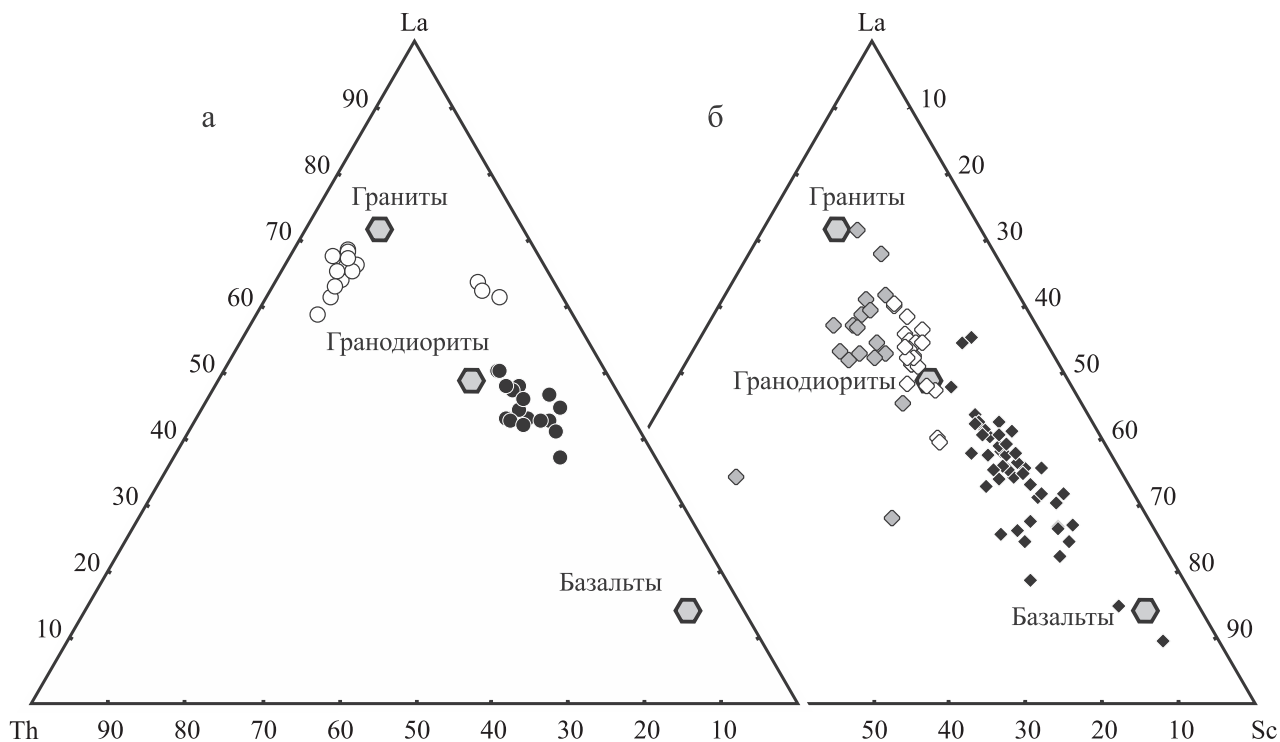


Рис. 18. Диаграмма Th–La–Sc (Cullers, Podkovyrov, 2002) и положение на ней точек состава песчаников (а), мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых пород (б) бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея и басинской свиты верхнего венда Южного Урала, а также пород верхнего девона (кодинская и устькодинская свиты) Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 1.

Fig. 18. The Th–La–Sc diagram (Cullers, Podkovyrov, 2002) and the position on it the data points of sandstones (а), fine-grained clayey siltstones and shales (б) of the Biryana subformation of the Upper Riphean, Zilmerdak Formation and the Upper Vendian Basa Formation, the Southern Urals, and also the Upper Devonian mudstones (Kodinka and Ust'kodinka formations), the Middle Urals.

Legend – see Fig. 1.

и сходны с отношениями в магматических и метаморфических породах, из которых они произошли. В ходе выветривания, переноса, переотложения и диагенеза они не меняются. Модельные Sm–Nd датировки осадочных пород, вычисленные относительно CHUR (CHondritic Uniform Reservoir) или DM (Depleted Mautle), отражают возраст пород, из которых они образовались и могут быть использованы для идентификации источников сноса. Эти датировки можно также интерпретировать как время, прошедшее с момента, когда Nd отделился от CHUR/DM. Добавление нового мантийного материала к осадку во время его накопления увеличивает отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и уменьшает модельный возраст. Присутствие нового (ювенильного, мантийного) Nd в осадочной породе сдвигает $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ в сторону больших значений (Michard et al., 1985; Li, McCulloch, 1996; Подковыров и др., 2002; Семихатов и др., 2002). Так, силикокластические докембрийские отложения Австралии характеризуются ростом величин $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ от -12 до 0 , что рассма-

тривается как следствие интенсивного выветривания ранне-среднепротерозойских платобазальтов, формирование которых предположительно связано с процессами рифтогенеза при распаде Родинии (Barovich, Foden, 2000; Li et al., 2003). Этой же причиной, по-видимому, обусловлен и рост значений $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ снизу вверх по разрезу в протерозойских последовательностях Южного Китая (Li, McCulloch, 1996; Halverson et al., 2010; и др.).

Глинистые породы большинства стратиграфических уровней верхнего докембрия западного склона Южного Урала характеризуются величинами $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ от -16.4 до -5.2 (относительно CHUR) (Маслов и др., 2019). Исходя из распределения значений указанного параметра в целом в разрезе Башкирского мегантиклинория (рис. 20), можно сделать вывод, что осадочные породы нижнего рифея, зигазино-комаровской и авзянской свит среднего рифея, трех верхних подсвит зильмердакской свиты, а также инзерской и бакеевской свит верхнего рифея сложены преимущественно продукта-

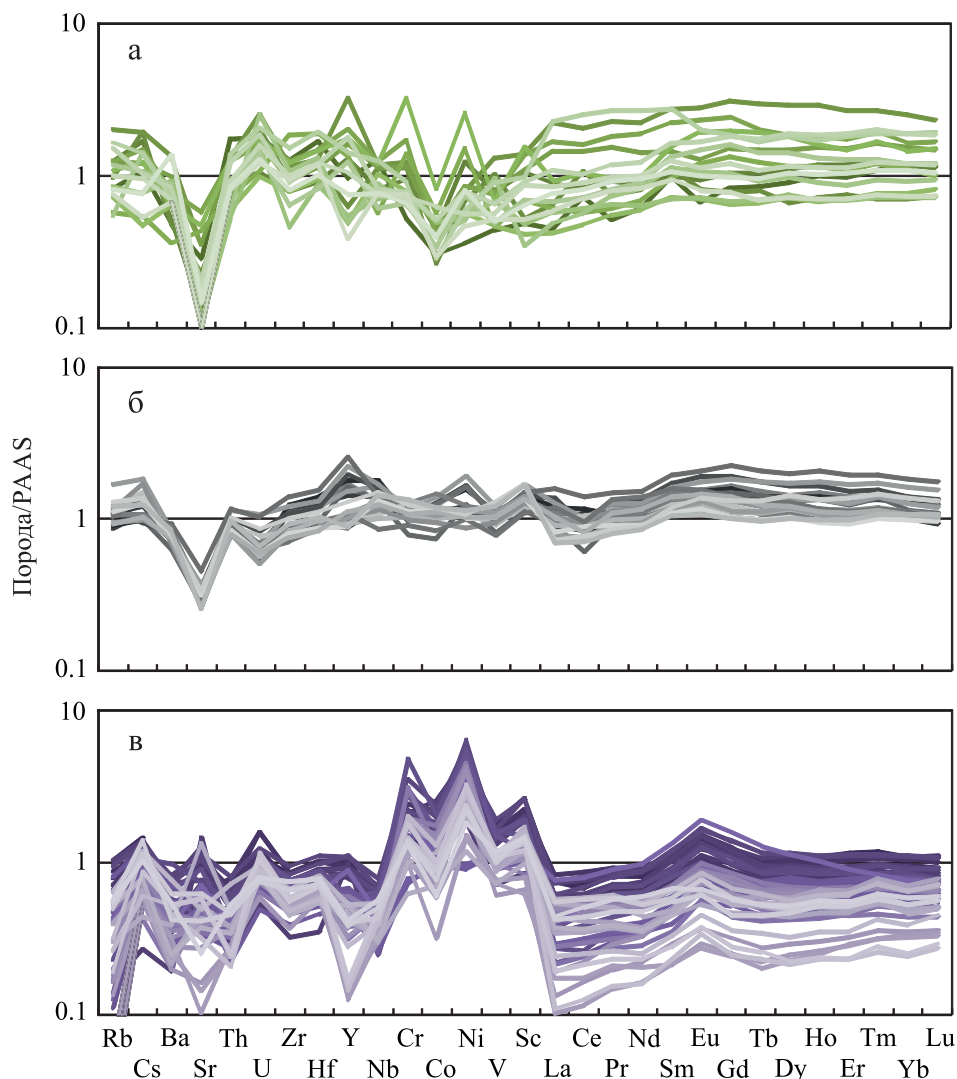


Рис. 19. Пример нормирования содержаний редких и рассеянных элементов в глинистых сланцах и мелкозернистых глинистых алевролитах бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея (а) и аргиллитах басинской свиты верхнего венда (б) Южного Урала, а также в аргиллитах верхнего девона (в) Среднего Урала по содержаниям этих же элементов в РААС.

Fig. 19. PAAS-normalized spectra of rare and trace elements in the fine-grained rocks of the Biryan Subformation of the Upper Riphean Zilmerdak Formation (a), mudstones of the Upper Vendian Basa Formation (б), the Southern Urals, as well as the mudstones of the Upper Devonian deposits (в), Middle Urals.

ми размыва пород кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы.

Для глинистых пород машакской свиты среднего рифея, а также миньярской и укской свит верхнего рифея минимальные величины $\varepsilon_{Nd}(T)$ равны -1.8 , -3.9 и -8.2 . При этом свойственные глинистым сланцам машакской свиты значения $\varepsilon_{Nd}(T)$ практически не имеют перекрытий с их величинами в подстилающих и перекрывающих отложениях. Это указывает, по всей видимости, на поступление в осадок в машакское время значительных объемов свежего мантийного материала и тем самым верифицирует представления о формиро-

вании этих отложений во время одноименного плюмового эпизода, приуроченного к финальным стадиям распада Колумбии/Нуны. Для глинистых пород миньярской и укской свит подобный вывод не столь очевиден, однако накопление глинистых пород этих свит шло на фоне финальных стадий распада Родинии и, возможно, какой-то вклад продуктов размыва рифтогенных магматических ассоциаций в их состав был.

Глинистые породы и мелкозернистые глинистые алевролиты бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея резко отличаются по значениям $\varepsilon_{Nd}(T)$ от подстилающих и пере-

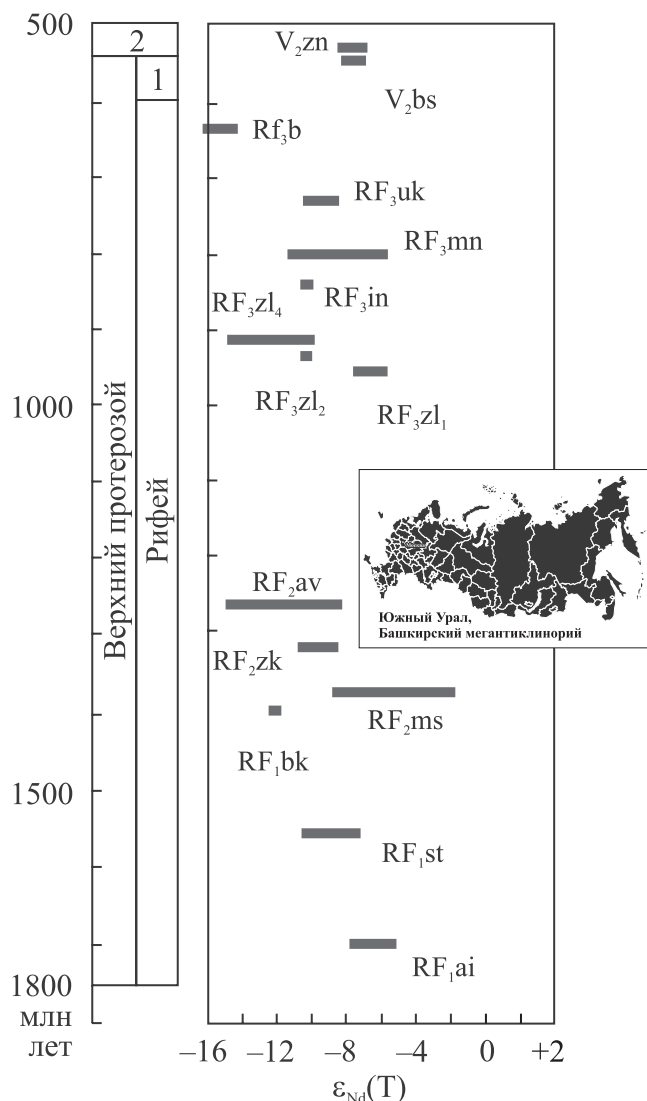


Рис. 20. Вариации значений $\epsilon_{Nd}(T)$ в глинистых породах верхнего докембрия западного склона Южного Урала (Маслов и др., 2019б).

Свиты и подсвиты: RF_{1ai} – айская; RF_{1st} – саткинская; RF_{1bk} – бакальская; RF_{2ms} – машакская; RF_{2zk} – зигазино-комаровская; RF_{2av} – авзянская; RF_{3zl1} – бирьянская; RF_{3zl2} – нугушская; RF_{3zl4} – бедерышинская; RF_{3in} – инзерская; RF_{3mn} – миньярская; RF_{3uk} – укская; RF_{3(?)b} – бакеевская; V_{2bs} – басинская; V_{2zn} – зиганская. 1 – венд; 2 – фанерозой. Обзорная карта России заимствована с сайта <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>.

Fig. 20. Variations of $\epsilon_{Nd}(T)$ values in the Upper Precambrian clay rocks of the western slope of the Southern Urals (Maslov et al., 2019b).

Formations and subformations: RF_{1ai} – Ai; RF_{1st} – Satka; RF_{1bk} – Bakal; RF_{2ms} – Mashak; RF_{2zk} – Zigazino-Komarovo; RF_{2av} – Avzyan; RF_{3zl1} – Biryann; RF_{3zl2} – Nugush; RF_{3zl4} – Bederysh; RF_{3in} – Inzer; RF_{3mn} – Minyar; RF_{3uk} – Uk; RF_{3(?)b} – Bakeevo; V_{2bs} – Basa; V_{2zn} – Zigan. 1 – Vendian; 2 – Phanerozoic. The overview map of Russia is taken from <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>.

крывающих пород (соответственно $-7.6 \dots -5.6$ против $-14.9 \dots -8.1$ и $-10.5 \dots -9.9$). Так же, как и в случае машакской свиты, это дает основание считать, что особенности Sm-Nd систематики тонкозернистых обломочных пород этого уровня стратотипа рифея, по всей видимости, отражают поступление в бассейн осадконакопления ювенильного мантийного материала, связанного с начальными стадиями распада Родинии.

Свойственные глинистым породам басинской и зиганской свит ашинской серии величины $\epsilon_{Nd}(T)$ ($-8.3 \dots -6.8$ и $-8.5 \dots -6.8$), по сравнению с аргиллитами нижележащей бакеевской свиты, указывают либо на еще один эпизод поступления в бассейн ювенильного материала, либо на кардинальную смену источников кластики, чему не противоречат и данные о возрастах обломочных цирконов в песчаниках басинской и куккараукской свит (Кузнецов и др., 2012; и др.).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На диаграмме $(CaO + MgO) - SiO_2/10 - (Na_2O + K_2O)$ подавляющее большинство фигуративных точек песчаников и глинистых пород басинской, кодинской и устькодинской, а также сортымской свит тяготеет к областям, типичным для продуктов размыва кислых магматических пород и осадочных образований (см. рис. 1). Точки состава песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты локализованы вблизи вершины $SiO_2/10$, что можно рассматривать, по всей видимости, как следствие присутствия в их составе существенной доли литогенного материала (многократно рециклированного кварца). Примерно такой же вывод был сделан в работе (Маслов и др., 2019а) на основе положения точек состава бирьянских песчаников на диаграммах В.Д. Шутова и В.Н. Шванова. К сходному заключению приводит и анализ распределения полей состава всех четырех песчаниковых ассоциаций на диаграмме $10TiO_2 - SiO_2 - Al_2O_3$ (см. рис. 2).

Диаграмма F1–F2 (см. рис. 3) позволяет несколько детализировать эти представления и демонстрирует в ряде случаев различное распределение точек песчаников и глинистых пород одной и той же свиты. Так, точки песчаников и аргиллитов кодинской и устькодинской свит попадают в области составов, характерных для продуктов разрушения основных изверженных пород и пород осадочных с тем или иным количеством кварца. Отметим, что этому выводу не соответствует распределение точек аргиллитов названных свит на диаграмме $Nb/Y - Zr/TiO_2$ (см. рис. 8), где они локализованы в областях состава риолитов и трахитов. Точки песчаников и аргиллитов басинской свиты в основном сосредоточены в области составов, образованных за счет разрушения преимущественно осадочных образований, хотя отчетливо тяготеют к разным ее

частям. Песчаники бирьянской подсвиты зильмердакской свиты и сортымской свиты имеют на диаграмме F1–F2 сходное распределение: те и другие в основном сложены литогенным материалом и продуктами разрушения кислых магматических пород (вывод, о котором мы уже говорили выше).

Распределение точек состава песчаников бирьянской подсвиты, басинской, кодинской и устькодинской свит на диаграмме Cr/Th–Th/Sc (см. рис. 6) хорошо согласуется с полученными при использовании других диаграмм представлениями о том, что для первых из них источниками обломочного материала выступали геохимически более зрелые субстраты, чем для последних. Песчаники басинской свиты, исходя из присущих им величин Cr/Th и Th/Sc, примерно на 70% сложены продуктами размыва кислых магматических пород; обломочный материал из ультраосновных пород в них в существенных количествах отсутствует. Это же хорошо видно и на диаграмме Ni–V–10Th (см. рис. 7).

По соотношению Zr/Sc и Th/Sc (см. рис. 9) песчаники басинской свиты могут рассматриваться как породы с существенной долей литогенного материала, тогда как точки песчаников кодинской и устькодинской свит на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc локализованы вблизи тренда, определяемого составом пород в областях размыва. Тут надо напомнить, что на классификационной диаграмме В.Д. Шутова они, хотя и принадлежат в целом к грауваккам, но являются кварцевыми граувакками (первые), а вторые – кварц-полевошпатовыми разностями. Тонкозернистые обломочные породы бирьянской подсвиты, как и глинистые породы басинской, кодинской и устькодинской свит, напротив, сложены преимущественно петрогенным материалом, что позволяет использовать их литогеохимические характеристики для реконструкции состава пород в областях размыва и различного рода генетических реконструкций.

Значения Yb_N и $(La/Yb)_N$, рассчитанные нами для песчаников и глинистых пород басинской, кодинской и устькодинской свит, а также бирьянской подсвиты зильмердакской свиты (см. рис. 10), заметно отличаются от тех, что присущи, по представлениям (Martin, 1986), для предполагаемых продуктов разрушения (в первом седиментационном цикле) как пород архейских ТТГ-ассоциаций, так и постархейских гранитоидов. Можно предполагать, что в случае верхневендских и верхнедевонских граувакк это связано с иным составом субстрата, за счет которого они формировались, а тонкозернистые обломочные породы бирьянской подсвиты зильмердакской свиты содержат, как уже было отмечено выше, заметную долю литогенного материала.

Менее заметно различие субстратов на диаграмме Hf–La/Th (см. рис. 11), где большинство точек как песчаников, так и глинистых пород тяго-

теет к области относительно зрелых в геохимическом плане образований. Несколько выше зрелость мелкозернистых глинистых алевролитов и глинистых сланцев бирьянского уровня стратотипа рифея, несколько меньше она у аргиллитов кодинской и устькодинской свит, что хорошо отвечает общегеологическим данным.

На диаграммах Th–La и Ni–Cr (см. рис. 12, 13) наблюдается тяготение части фигуративных точек глинистых пород кодинской и устькодинской свит к областям значений, характерных для тонкозернистых обломочных пород архея, но обусловлено это только сходством предполагаемого состава пород на палеоводоразделах позднего девона с составом основных источников обломочного материала в архее (преимущественно основные магматические образования (Холодов, 1989; Кузнецов, 2011; и др.)).

Различие субстратов, поставлявших в область осадконакопления обломочный материал во время формирования отложений басинской свиты Южного Урала и верхнедевонских отложений Среднего Урала, хорошо проявлена и на диаграмме $(Gd/Yb)_N$ –Eu/Eu* (см. рис. 14). При примерном равенстве значений $(Gd/Yb)_N$ характерные для первых величины Eu/Eu* указывают на размыв геохимически более зрелых субстратов, чем это было в случае песчаников кодинской и устькодинской свит. Такой же вывод следует и из распределения на указанной диаграмме фигуративных точек состава глинистых пород и мелкозернистых глинистых алевролитов верхнего докембрия Южного Урала и верхнего девона Среднего Урала. Подтверждает сказанное и локализация точек состава тонкозернистых обломочных пород названных выше свит и бирьянской подсвиты зильмердакской свиты на широко используемых диаграммах La/Sc–Th/Co (см. рис. 15), Eu/Eu*–Th/Sc и Th–La–Sc (см. рис. 18).

Наконец, при сопоставлении нормированных по РААС спектров распределения редких и рассеянных элементов в тонкозернистых обломочных породах бирьянской подсвиты зильмердакской свиты, аргиллитах басинской свиты и глинистых породах верхнего девона можно видеть, что последние заметно сильнее обогащены такими элементами, как Cr, Co, Ni, V и Sc, считающимися характерными для магматических пород основного и ультраосновного состава (Интерпретация..., 2001).

Таким образом, подавляющее большинство рассмотренных нами парных и треугольных диаграмм позволяет сделать достаточно согласующиеся между собой и не противоречащие общим геологическим представлениям выводы о составе пород-источников слагающего их обломочного материала. Эти выводы в существенной степени подкрепляют представления, полученные нами в результате минералого-петрографического исследования песчаников.

Следует отметить, что, подводя итог рассмотрению сведений о химическом составе песчаников, Ф.Дж. Петтиджон с соавторами (1976, с. 64) высказали простое, но очень важное соображение: “Валовый химический состав песчаников отражает иногда дивергентное, а иногда усиливающееся влияние минералогической сортировки и дифференциации на структурную, а также меняющееся в широких пределах воздействие области питания, обстановки осадконакопления и процессов диагенеза”. В русском переводе третьего издания монографии “Осадочные породы” (Петтиджон, 1981, с. 266) также указано, что “состав песчаника можно выразить через его валовый химический состав. Анализ валового химического состава очень полезен ... Для того чтобы полностью понять геохимические процессы и эволюцию различных типов осадков ... требуются химические анализы”. Последний вывод, как показано выше, справедлив в отношении как песчаников, так и пород глинистых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Геосинклинальный литогенез на границе континент-океан (1987). М.: Наука, 177 с.
- Интерпретация геохимических данных. (2001) (Отв. ред. Е.В. Скляр). М.: Интернет Инжиниринг, 288 с.
- Кузнецов В.Г. (2011) Литология. Основы общей (теоретической) литологии. Учебное пособие для вузов. М.: Науч. мир, 360 с.
- Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В., Шацилло А.В., Орлов С.Ю., Голованова И.В., Данукалов К.Н., Ипатьева И.С. (2012) Первые результаты массового U-Pb-изотопного датирования (LA-ICP-MS) детритных цирконов из ашинской серии Южного Урала – палеогеографический и палеотектонический аспекты. *Докл. АН*, **447**(1), 73-79.
- Литогеохимия терригенных ассоциаций южных впадин Предуральяского прогиба. (2015) Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 308 с.
- Маслов А.В. (2005) Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 289 с.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В. (2019a) Реконструкция состава пород питающих провинций. Минералого-петрографические подходы и методы. *Литосфера*, **19**(6), 813-839. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-834-860
- Маслов А.В., Мизенс Г.А., Крупенин М.Т. (2012) Литохимические особенности песчаников Предуральяского прогиба. *Вестник Пермского университета. Геология*, (3), 33-46.
- Маслов А.В., Червяковская М.В., Гареев Э.З., Ковалев С.Г., Подковыров В.Н. (2019b) Верхний докембрий Южного Урала: эволюция источников сноса по данным исследования обломочных цирконов и Sm-Nd систематики глинистых пород. Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика. *Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия*. СПб.: ИГГД РАН, “Свое издательство”, 140-141.
- Мигдисов А.А., Балашов Ю.А., Шарков И.В., Шерстеников О.Г., Ронов А.Б. (1994) Распространенность редкоземельных элементов в главных литологических типах пород осадочного чехла Русской платформы. *Геохимия*, (6), 789-803.
- Мизенс Г.А., Маслов А.В. (2014) Глинистые породы молассовой формации южноуральского сегмента Предуральяского прогиба: литогеохимия, состав пород источников сноса и палеотектонические реконструкции. *Геохимия*, (11), 1025-1042. DOI: 0.7868/S0016752514110053
- Петтиджон Ф.Дж. (1981) Осадочные породы. М.: Недра, 751 с.
- Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. (1976) Пески и песчаники. М.: Мир, 536 с.
- Подковыров В.Н., Ковач В.П., Котова Л.Н. (2002) Глинистые отложения сибирского гипостратотипа рифея и венда: химический состав, Sm-Nd систематика источников и этапы формирования. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 397-418.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Горохов И.М., Константинова Г.В., Мельников Н.Н., Подковыров В.Н., Кутявин Э.П. (2002) Низкое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в гренвилевском и пост-гренвилевском палеоокеане: определяющие факторы. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **10**(1), 3-46.
- Фазлиахметов А.М. (2011a) Состав, строение и условия формирования вулканогенно-осадочных отложений улутауской свиты (Южный Урал). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 162 с.
- Фазлиахметов А.М. (2011b) Состав вулканогенно-обломочных пород улутауской свиты Южного Урала и особенности его формирования. *Концептуальные проблемы литологических исследований в России. Материалы 6-го Всероссийского литологического совещания*. Казань: КФУ, 375.
- Холодов В.Н. (1989) Соотношение осадконакопления и магматизма в докембрии. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 3-26.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Barovich K.M., Foden J. (2000) A Neoproterozoic flood basalt province in southern-central Australia: geochemical and Nd isotope evidence from basin fill. *Prec. Res.*, **100**(1-3), 213-234. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(99\)00075-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(99)00075-3)
- Bavinton O.A. (1981) The nature of sulfidic metasediments at Kambalda and their broad relationships with associated ultramafic rocks and nickel ores. *Econ. Geol.*, **76**(6), 1606-1628. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.76.6.1606>
- Bhat M.I., Ghosh S.K. (2001) Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur group pelites, western Himalayas: implications for their provenance and weathering. *Prec. Res.*, **108**, 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00139-X)
- Bracciali L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. (2007) Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives*

- tives from Petrography and Geochemistry* (Eds J. Arribas, S. Critelli, M.J. Johnsson). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **420**, 73-93. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(06\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(06))
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**(1-4), 1-37. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A. (1990) The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**(3-4), 256-267. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90046-Z)
- Cullers R.L. (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, **191**(4), 305-327. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
- Cullers R.L. (1995) The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chem. Geol.*, **123**(1-4), 107-131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00050-V](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00050-V)
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. (2002) The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uig group, southeastern Russia. *Prec. Res.*, **117**(3-4), 157-183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00079-7)
- Dobson D.M., Dickens G.R., Rea D.K. (2001) Terrigenous sediment on Ceara Rise: a Cenozoic record of South American orogeny and erosion. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **165**(3-4), 215-229. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00161-9)
- Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W. (1997) Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition. *Prec. Res.*, **86**, 201-223. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00049-1)
- Floyd P.A., Leveridge B.E. (1987) Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *J. Geol. Soc. (London)*, **144**(4), 531-542. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Gallet S., Jahn B.-M., Lanoe B.V.V., Dia A., Rossello E. (1998) Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **156**(3-4), 157-172. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00218-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00218-5)
- Garver J.I., Royce P.R., Smick T.A. (1996) Chromium and nickel in shale of the Taconic foreland: a case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *J. Sed. Res.*, **66**(1), 100-106. DOI: <https://doi.org/10.1306/D42682C5-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments. (2003) (Ed. D.R. Lentz) Geological Association of Canada, GeoText 4, 184 p.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988) Rare earth elements in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **89**(1), 35-47. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90031-3)
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. (1984) The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**(12), 2469-2482. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen M.T., Barovich K.M. (2010) Neoproterozoic chemostratigraphy. *Prec. Res.*, **182**(4), 337-350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.04.007>
- Haskin L.A., Wildeman T.R., Frey F.A., Collins K.A., Keedy C.R., Haskin M.A. (1966) Rare earths in sediments. *J. Geophys. Res.*, **71**(24), 6091-6105. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ071i024p06091>
- Haskin M.A., Haskin L.A. (1966) Rare earths in European shales: a redetermination. *Science*, **154**(3748), 507-509. DOI: [10.1126/science.154.3748.507](https://doi.org/10.1126/science.154.3748.507)
- Hayashi K.-I., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H. (1997) Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from north-eastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(19), 4115-4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7)
- Jahn B.-M., Gallet S., Han J.M. (2001) Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chem. Geol.*, **178**(1-4), 71-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00430-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00430-7)
- Kamber B.S., Greig A., Collerson R.D. (2005) A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(4), 1041-1058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.08.020>
- Li X., McCulloch M.T. (1996) Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: evidence for a Proterozoic continental collision in south-east China. *Prec. Res.*, **76**(1-2), 67-76. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00024-0)
- Li Z.X., Li X.H., Kinny P.D., Wang J., Zhang S., Zhou H. (2003) Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Prec. Res.*, **122**(1-4), 85-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00208-5)
- Martin H. (1986) Effect of steeper Archean geothermal gradients on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, **14**(9), 753-756. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2)
- McLennan S.M. (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements* (Eds B.R. Lipin, G.A. McKay). *Rev. Mineral. Geochem.*, **21**(1), 169-200.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes controlling the composition of clastic sediments* (Eds M.J. Johnsson, A. Basu). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **284**, 21-40. DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>
- McLennan S.M., Taylor S.R. (1991) Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *J. Geol.*, **99**(1), 1-21. DOI: <https://www.jstor.org/stable/30068762>
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(7), 2015-2050. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q)
- Michard A., Gurriet P., Soudant M., Albarede F. (1985) Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. in-

- ternal aspects of crust evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**(2), 601-610. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90051-1)
- Negrel P., Sadeghi M., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., GEMAS Project Team. (2015) Geochemical fingerprinting and source discrimination of agricultural soils at continental scale. *Chem. Geol.*, **396**(9), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.004>
- Nesbitt H.W. (1979) Mobility and fractionation of rare elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, **279**, 206-210. DOI: [10.1038/279206a0](https://doi.org/10.1038/279206a0)
- Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, **145**(3-4), 325-394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Rollinson H.R. (1994) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 352 p.
- Roser B.P., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**(1-2), 119-139. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Shacklette H.T., Boerngen J.G. (1984) Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States: an account of the concentrations of 50 chemical elements of soils and other regoliths. U.S. Geol. Sur. Prof. Pap., **1270**, 105 p.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1995) The chemical evolution of the continental crust. *Rev. Geoph.*, **33**(2), 241-265. DOI: <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 312 p.
- Viers J., Dupre B., Gaillardet J. (2009) Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Sci. Total Environ.*, **407**(2), 853-868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.053>
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, **20**, 325-343. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wronkiewicz D.J., Condie K.C. (1990) Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal Supergroups, South Africa: cratonic evolution during the early Proterozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(2), 343-354. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90323-D](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90323-D)
- Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. (2007) Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry* (Eds J. Arribas, S. Critelli, M.J. Johnsson). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **420**, 73-93. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(06\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(06))
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**(1-4), 1-37. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A. (1990) The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **97**(3-4), 256-267. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90046-Z)
- Cullers R.L. (1995) The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chem. Geol.*, **123**(1-4), 107-131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00050-V](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00050-V)
- Cullers R.L. (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, **191**(4), 305-327. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. (2002) The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uig group, southeastern Russia. *Prec. Res.*, **117**(3-4), 157-183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00079-7)
- Dobson D.M., Dickens G.R., Rea D.K. (2001) Terrigenous sediment on Ceara Rise: a Cenozoic record of South American orogeny and erosion. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **165**(3-4), 215-229. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00161-9)
- Fazliakhmetov A.M. (2011a) Composition, structure and conditions of formation of volcanogenic-sedimentary deposits of the Ulutau Formation (South Urals). PhD thesis (Geology, Mineralogy). Ufa, IG, UfaSC of RAS, 162 p. (In Russian)
- Fazliakhmetov A.M. (2011b) Composition and deposition specific features of the Ulutau Formation volcanogenic-sedimentary rocks. *Kontseptual'nye problemy litologicheskikh issledovaniy v Rossii*. Materialy 6-go Vserossiiskogo litologicheskogo soveshchaniya [Conceptual problems of lithology in Russia. Proc. of 6th All-Russian lithological meeting]. Kazan', KFU, 375 p. (In Russian)
- Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W. (1997) Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpentine Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition. *Prec. Res.*, **86**, 201-223. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00049-1)
- Floyd P.A., Leveridge B.E. (1987) Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *J. Geol. Soc. (London)*, **144**(4), 531-542. DOI: <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Gallet S., Jahn B.-m., Lanoe B.V.V., Dia A., Rossello E. (1998) Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **156**(3-4), 157-172. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00218-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00218-5)
- Garver J.I., Royce P.R., Smick T.A. (1996) Chromi-

REFERENCES

- um and nickel in shale of the Taconic foreland: a case study for the provenance of fine-grained sediments with an ultramafic source. *J. Sed. Res.*, **66**(1), 100-106. DOI: <https://doi.org/10.1306/D42682C5-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments. (2003) (Ed. D.R. Lentz) Geological Association of Canada, GeoText 4, 184 p.
- Geosinklinal'nyi litogenez na granitse kontinent-ocean [Geosynclinal lithogenesis on the continent/ocean board]. (1987) Moscow, Nauka Publ., 177 p. (In Russian)
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988) Rare earth elements in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **89**(1), 35-47. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90031-3)
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. (1984) The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**(12), 2469-2482. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9)
- Halverson G.P., Wade B.P., Hurtgen M.T., Barovich K.M. (2010) Neoproterozoic chemostratigraphy. *Prec. Res.*, **182**(4), 337-350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.04.007>
- Haskin L.A., Wildeman T.R., Frey F.A., Collins K.A., Keedy C.R., Haskin M.A. (1966) Rare earths in sediments. *J. Geophys. Res.*, **71**(24), 6091-6105. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ071i024p06091>
- Haskin M.A., Haskin L.A. (1966) Rare earths in European shales: a redetermination. *Science*, **154**(3748), 507-509. DOI: [10.1126/science.154.3748.507](https://doi.org/10.1126/science.154.3748.507)
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh [Geochemical data interpretation]. (2001) (Ed. E.V. Sklyarov) Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russian)
- Hayashi K.-I., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H. (1997) Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from north-eastern Labrador, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**(19), 4115-4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7)
- Jahn B.-m., Gallet S., Han J.M. (2001) Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chem. Geol.*, **178**(1-4), 71-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00430-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00430-7)
- Kamber B.S., Greig A., Collerson R.D. (2005) A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(4), 1041-1058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.08.020>
- Kholodov V.N. (1989) Sootnoshenie osadkonakopleniya i magmatizma v dokembrii [The ratio of sedimentation and magmatism in Precambrian]. *Litol. Polezn. Iskop.*, (3), 3-26. (In Russian)
- Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V., Shatsillo A.V., Orlov S.YU., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Ipat'eva I.S. (2012) The first results of mass U-Pb isotope dating (LA-ICP-MS) for detrital zircons from the Asha Group, South Urals: paleogeography and paleotectonics. *Dokl. Earth Sci.*, **447**(1), 1240-1246. DOI: [10.1134/S1028334X12110025](https://doi.org/10.1134/S1028334X12110025)
- Kuznetsov V.G. (2011) *Litologiya. Osnovy obshchei (teoreticheskoi) litologii* [Lithology. Theory basics]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 360 p. (In Russian)
- Li X., McCulloch M.T. (1996) Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozoic sediments from the southern margin of the Yangtze Block: evidence for a Proterozoic continental collision in south-east China. *Prec. Res.*, **76**(1-2), 67-76. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00024-0)
- Li Z.X., Li X.H., Kinny P.D., Wang J., Zhang S., Zhou H. (2003) Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Prec. Res.*, **122**(1-4), 85-109. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00208-5)
- Lithogeochemistry of terrigenous associations of the southern depressions of the Pre-Uralian foredeep. (2015) Ekaterinburg, IGG, UB RAS, 308 p. (In Russian)
- Martin H. (1986) Effect of steeper Archean geothermal gradients on geochemistry of subduction-zone magmas. *Geology*, **14**(9), 753-756. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<753:EOSAGG>2.0.CO;2)
- Maslov A.V. (2005) *Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretatsii poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: research and interpretation technique of the received data]. Ekaterinburg, USMU, 289 p. (In Russian)
- Maslov A.V., Chervyakovskaya M.V., Gareev E.Z., Kovalev S.G., Podkovyrov V.N. (20196) Upper Precambrian of the Southern Urals: evolution of provenance areas according to the study of clastic zircons and Sm-Nd systematics of clay rocks. *Etapy formirovaniya i razvitiya proterozoyskoi zemnoi kory: stratigrafiya, metamorfizm, magmatizm, geodinamika*. Materialy VI Rossiiskoi konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya [Stages of the formation and development of the Proterozoic crust: stratigraphy, metamorphism, magmatism, geodynamics. Proceedings of the VI Russian Conference on Precambrian Geology and Geodynamics]. St. Petersburg, IPGG RAS, "Own publishing house", 140-141. (In Russian)
- Maslov A.V., Mel'nichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V. (2019a) Provenance reconstructions. Mineralogical and petrographic approaches and methods. *Litosfera*, **19**(6), 813-839. (In Russian)
- Maslov A.V., Mizens G.A., Krupenin M.T. (2012) Specific lithochemical features of the Pre-Urals foredeep sandstones. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, (3), 33-46. (In Russian)
- McLennan S.M. (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements* (Eds B.R. Lipin, G.A. McKay). *Rev. Mineral. Geochem.*, **21**(1), 169-200.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes controlling the composition of clastic sediments* (Eds M.J. Johnsson, A. Basu). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **284**, 21-40. DOI: <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>
- McLennan S.M., Taylor S.R. (1991) Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *J. Geol.*, **99**(1), 1-21. DOI: <https://www.jstor.org/stable/30068762>
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(7), 2015-2050. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q)

- Michard A., Gurriet P., Soudant M., Albarede F. (1985) Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crust evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**(2), 601-610. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90051-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90051-1)
- Migdisov A.A., Balashov Yu.A. Sharkov I.V., Sherstennikov O.G., Ronov A.B. (1994) The incidence of REE in the main lithotypes of Russian Platform mantle. *Geokhimiya*, (6), 789-803. (In Russian)
- Mizens G.A., Maslov A.V. (2014) Pelitic rocks from the molasse formation of the Southern Ural segment of the Uralian Foredeep: lithogeochemistry, provenance composition, and paleotectonic reconstructions. *Geochem. Intern.*, **52**(11), 962-978. DOI: [10.1134/S0016702914110056](https://doi.org/10.1134/S0016702914110056)
- Negrel P., Sadeghi M., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., GEMAS Project Team. (2015) Geochemical fingerprinting and source discrimination of agricultural soils at continental scale. *Chem. Geol.*, **396**(9), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.004>
- Nesbitt H.W. (1979) Mobility and fractionation of rare elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, **279**, 206-210. DOI: [10.1038/279206a0](https://doi.org/10.1038/279206a0)
- Pettidzhon F.J. (1981) *Osadochnye porody* [Sedimentary rocks]. Moscow, Nedra Publ., 751 p. (In Russian)
- Pettidzhon F.J., Potter P., Siver R. (1976) *Peski i peschani-ki* [Sand and sandstones]. Moscow, Mir Publ., 536 p. (In Russian)
- Plank T., Langmuir C.H. (1998) The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem. Geol.*, **145**(3-4), 325-394. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00150-2)
- Podkovyrov V.N., Kovach V.P., Kotova L.N. (2002) Muddy deposits of the Riphean and Vendian Siberian hypostratotype: chemical composition, provenance Sm-Nd systematic and depositional stages. *Litol. Polezn. Iskop.* (4), 397-418. (In Russian)
- Rollinson H.R. (1994) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex, London Group UK Ltd., 352 p.
- Roser B.P., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**(1-2), 119-139. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Semikhatov M.A., Kuznetsov A.B., Gorokhov I.M., Konstantinova G.V., Mel'nikov N.N., Podkovyrov V.N., Kutyavin E.P. (2002). Low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in the Grenville and post-Grenville palaeocean: determining factors. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **10**(1), 3-46. (In Russian)
- Shacklette H.T., Boerngen J.G. (1984) Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States: an account of the concentrations of 50 chemical elements of soils and other regoliths. *U.S. Geol. Sur. Prof. Pap.*, **1270**, 105 p.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1995) The chemical evolution of the continental crust. *Rev. Geoph.*, **33**(2), 241-265. DOI: <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell, 312 p.
- Viers J., Dupre B., Gaillardet J. (2009) Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Sci. Total Environ.*, **407**(2), 853-868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.053>
- Winchester J.A., Floyd P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chem. Geol.*, **20**, 325-343. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2)
- Wronkiewicz D.J., Condie K.C. (1990) Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal Supergroups, South Africa: cratonic evolution during the early Proterozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**(2), 343-354. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90323-D](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90323-D)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) *Osnovy litokhimi-i* [Lithochemistry basics]. St.Peterburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2011) Geochemical indicators of lithogenesis (lithologic geochemistry). *Syktyvkar, Geoprint*, 742 p. (In Russian)