

<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0337>

SYN-RIFT SANDSTONES: THE FEATURES OF BULK CHEMICAL COMPOSITIONS, AND POSITIONS ON PALEOGEODYNAMIC DISCRIMINANT DIAGRAMS

A. V. Maslov^{1,2}, V. N. Podkovyrov³, E. Z. Gareev², N. D. Sergeeva²

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Geology, Ufa Scientific Centre of RAS, Ufa, Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology of RAS, St. Petersburg, Russia

Abstract: From the early 1980s, the data on the bulk chemical composition of sandstones and mudstones are actively involved for interpretation of the paleogeodynamic settings for sedimentary sequences. Discriminant diagrams such as $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ [Maynard *et al.*, 1982], $(Fe_2O_3^*+MgO)-K_2O/Na_2O$ and others [Bhatia, 1983], SiO_2-K_2O/Na_2O [Roser, Korsch, 1986], $(K_2O+Na_2O)-SiO_2/20-(TiO_2+Fe_2O_3+MgO)$ [Kroonenberg, 1994] etc., are now widely used in regional investigations to classify terrigenous rocks from several paleogeodynamic settings (passive and active continental margins, oceanic and continental volcanic arcs etc.) with a certain 'percentage of consistency'. The first diagrams DF1–DF2 for syn-rift compositions were published in the early 2010s [Verma, Armstrong-Altrin, 2013]. This article analyzes the bulk chemical compositions of syn-rift sandstones from intracratonic rifts and rifts formed during the break-up of the Columbia and Gondwana supercontinents, rifts within volcanic arcs and related to the collapse of collision orogens (for example, Permian sandstones of the Malužiná formation, Western Carpathians, Slovakia). Our database includes the Neoproterozoic Uinta Mountain Group (USA), the Cretaceous Omdurman formation of the Kharطوم Basin (Sudan), the siliciclastic deposits of the Kalahari Basin (East African rift zone), the sandstones of the Vin-dhyan Supergroup (India), the Neoproterozoic Ui Group of the Uchur-Maya region (Southeast Siberia), the Meso-Neoproterozoic Banxi Group (Southern China), the Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup (USA), the Oronto and Bayfield Groups of the Midcontinent (USA), as well as the sandstones of the Upper Precambrian Ai and Mashak formations, and the metasedimentary rocks of the Arsha Group (Southern Urals). The article examines: (1) the position of the syn-rift sandstone compositions (fields) on the $\log(SiO_2/Al_2O_3)-\log(Na_2O/K_2O)$ classification diagram and the F1–F2 diagram, which gives the possible composition of the catchment areas rocks; (2) the position of the syn-rift sandstone compositions, as well as the average values of various indicator ratios and discriminant functions, in the $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$, F3–F4, SiO_2-K_2O/Na_2O and DF1–DF2 diagrams. The analysis of the results shows that the fields of the syn-rift sandstones are characterized by a wide dispersion of $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (0.4...3.5) and $\log(Na_2O/K_2O)$ values (~0.2...6.0 and more). A number of the values do not fit into the typical areas on the classification diagram of F.J. Pettijohn *et al.*, which suggests that the syn-rift sandstones vary considerably in composition that is controlled by a significant number of factors. The diagram of J. Maynard *et al.* is not suitable for assigning certain sandstone associations to the 'syn-rift sandstones' category. In the diagrams of M. Bhatia and K. Crook, as well as those of B. Roser and R. Korsch, the fields and mean points of the syn-rift sandstones are mainly located in the area of passive continental margins; thus, these diagrams can not be used to classify the syn-rift sandstone associations. Contrariwise, on the high-silica DF1–DF2 diagram [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], ~80 % of the objects from our database are localized in

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: E.V. Sklyarov

Received: September 27, 2017

Revised: November 20, 2017

Accepted: December 4, 2017

For citation: Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sergeeva N.D., 2018. Syn-rift sandstones: the features of bulk chemical compositions, and positions on paleogeodynamic discriminant diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 59–80. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0337.

Для цитирования: Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Сергеева Н.Д. Синрифтовые песчаники: особенности валового химического состава и положение на дискриминантных палеогеодинамических диаграммах // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 59–80. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0337.

the field of syn-rift compositions and show a good correlation with the 'percentage of consistency' evaluated by the authors for the samples from similar settings (79–85 %). Thus, according to the data presented in the article, the DF1–DF2 diagram is the most rational and acceptable discriminant diagram for assigning certain sandstone associations to the 'syn-rift infilling' category.

Key words: syn-rift sandstones; bulk chemical composition; discriminant paleogeodynamic diagrams

СИНРИФТОВЫЕ ПЕСЧАНИКИ: ОСОБЕННОСТИ ВАЛОВОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПОЛОЖЕНИЕ НА ДИСКРИМИНАНТНЫХ ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДИАГРАММАХ

А. В. Маслов^{1, 2}, В. Н. Подковыров³, Э. З. Гареев², Н. Д. Сергеева²

¹ Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² Институт геологии УНЦ РАН, Уфа, Россия

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Для интерпретации палеогеодинамических обстановок формирования терригенных толщ с начала 1980-х годов активно привлекаются данные о валовом химическом составе песчаников и глинистых образований. Опубликован ряд дискриминантных диаграмм, широко вошедших в практику региональных исследований (например, $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ [Maynard et al., 1982], $(Fe_2O_3^*+MgO)-K_2O/Na_2O$ и другие [Bhatia, 1983], SiO_2-K_2O/Na_2O [Roser, Korsch, 1986], $(K_2O+Na_2O)-SiO_2/2O-(TiO_2+Fe_2O_3+MgO)$ [Kroonenberg, 1994] и др. Они дают возможность с той или иной «долей соответствия» отнести терригенные породы к образованиям нескольких палеогеодинамических обстановок: пассивных и активных континентальных окраин, океанических и континентальных вулканических дуг. В 2000-х годах предложены диаграммы DF1–DF2 [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], на которых впервые появилась область составов, свойственных рифтогенным обстановкам. В статье проанализированы материалы по валовому химическому составу песчаников ряда интракратонных рифтов, рифтов, сформированных при распаде суперконтинентов Колумбия и Гондвана, а также рифтов, приуроченных к вулканическим дугам и связанных с коллапсом коллизионных орогенов (например, пермские песчаники формации Malužipá, Западные Карпаты). К их числу относятся псаммиты неопротерозойской серии Uinta Mountain (США), песчаники меловой формации Omdurman Хартумского бассейна (Судан), силикокластические образования бассейна Калахари (Восточно-Африканская рифтовая зона), отложения надсерии Vindhyan (Индия), уйской серии неопротерозоя Учуро-Майского региона (Юго-Восточная Сибирь), мезо-неопротерозойской серии Wanxi (Южный Китай), мезопротерозойской надсерии Белт-Перселл (США), серий Oronto и Baufield рифтовой области Мидконтинента (США), а также псаммиты айской и машакской свит и метаосадочные образования аршинской серии верхнего докембрия Южного Урала. Рассмотрено: 1) положение полей составов песчаников на классификационной диаграмме $\log(SiO_2/Al_2O_3)-\log(Na_2O/K_2O)$ и диаграмме F1–F2, дающей представление о возможном составе комплексов пород – источников обломочного материала; 2) положение полей составов песчаников, а также средних значений ряда индикаторных отношений и дискриминантных функций, на диаграммах $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$, F3–F4, SiO_2-K_2O/Na_2O и DF1–DF2. Анализ полученных результатов позволяет видеть следующее: 1) поля синрифтовых песчаников характеризуются широким разбросом значений $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (0.4...3.5) и $\log(Na_2O/K_2O)$ (~0.2...6.0 и более). Ряд из них вообще не укладываются в типовые области классификационной диаграммы Ф.Дж. Петтиджона с соавторами. Это дает основание считать, что состав синрифтовых песчаников может быть весьма различным, так как контролируется значительным числом факторов. Диаграмма Дж. Мейнарда с соавторами не пригодна для отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории синрифтовых псаммитов. На диаграммах М. Бхатиа и К. Крука, а также Б. Розера и Р. Корша и поля, и средние точки составов синрифтовых песчаников в основном расположены в области пассивных континентальных окраин, что делает невозможным их использование для отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории «синрифтовых песчаников». Напротив, на высококремнистой диаграмме DF1–DF2 С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина ~80 % объектов из нашего банка данных локализованы в области составов, свойственных именно рифтогенным обстановкам. Это хорошо соотносится с авторской оценкой «процента соответствия» для образцов из подобных обстановок (79–85 %). Таким образом, приведенные в статье данные показывают, что наиболее приемлемой дискриминантной диаграммой для отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории «синрифтовых» в настоящее время является диаграмма С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина.

Ключевые слова: синрифтовые песчаники; валовый химический состав; дискриминантная палеогеодинамическая диаграмма

1. ВВЕДЕНИЕ

Для интерпретации палеогеодинамических обстановок формирования терригенных толщ с начала 1980-х гг. активно привлекаются данные о валовом химическом составе песчаников и глинистых образований, а также соотношениях в них редких и рассеянных элементов. В эти годы был опубликован ряд дискриминантных диаграмм, широко вошедших в практику региональных исследований [Maslov et al., 2016a, 2016b; и ссылки в этих работах]. К их числу относятся диаграммы $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ [Maynard et al., 1982], $(Fe_2O_3^*+MgO)-K_2O/Na_2O$, $(Fe_2O_3^*+MgO)-Al_2O_3/SiO_2$ и другие [Bhatia, 1983], SiO_2-K_2O/Na_2O [Roser, Korsch, 1986], $(K_2O+Na_2O)-SiO_2/20-(TiO_2+Fe_2O_3+MgO)$ [Kroonenberg, 1994] и др. Все они дают возможность с той или иной «долей соответствия» отнести терригенные породы к образованиям нескольких палеогеодинамических обстановок: пассивных и активных континентальных окраин, океанических и континентальных вулканических дуг.

Нужно отметить, что за последующие 25–30 лет не было предложено ни одной другой диаграммы такого типа, а количество критических отзывов о диаграммах 1980-х гг. росло [Armstrong-Altrin, Verma, 2005; Ryan, Williams, 2007; Caracciolo et al., 2012; и др.]. Подробно эта ситуация, как и особенности использования перечисленных диаграмм при анализе различных типов осадочных последовательностей, рассмотрена в публикациях [Maslov et al., 2012a, 2012b, 2016a, 2016b], и здесь на ней мы специально не останавливаемся.

В 2013 г. опубликованы новые дискриминантные диаграммы для терригенных пород с высоким (63–95 мас. %) и низким (35–63 мас. %) содержанием $(SiO_2)_{adj}^1$ [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], на которых впервые появилась область составов, свойственных рифтогенным обстановкам. До этого точки составов песчаников и глинистых пород данного типа в основном концентрировались в областях пассивных континентальных окраин.

Сопоставление указанных дискриминантных палеогеодинамических диаграмм показало, что они позволяют с определенной долей условности разграничить терригенные ассоциации только платформенных, рифтогенных, островодужных обстановок и пассивных окраин [Maslov et al., 2016b]. Фигуративные точки составов пород коллизионных осадочных ассоциаций самостоятельные поля на них не образуют [Maslov et al., 2013, 2015].

Настоящая публикация посвящена анализу положения полей составов синрифтовых песчаников на таких широко применяемых при региональных палеогеодинамических исследованиях дискриминантных диаграммах, как $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ [Maynard et al., 1982], F3–F4 [Bhatia, Crook, 1986], SiO_2-K_2O/Na_2O [Roser, Korsch, 1986] и DF1–DF2 [Verma, Armstrong-Altrin, 2013]. Известно [Ingersoll et al., 1990; Garzanti et al., 2001], что песчаники рифтовых зон образованы, как правило, за счет локальных источников сноса и характеризуются существенными вариациями петрографического состава. Весьма быстро происходит в таких обстановках и изменение комплексов пород в областях размыва. Так, например, для мезопротерозойской рифтовой зоны Мидконтинента (США) установлена смена на протяжении ~40–50 млн лет состава палеоводосборов – от соотношения «основные : кислые породы» 80–90 : 10–20 в начале формирования ее осадочного заполнения до 10–20 : 80–100 в конце [Cullers, Berendsen, 1998]. Понять, насколько и как отражается это на упомянутых выше диаграммах, также одна из задач исследований, если не настоящих, то будущих.

2. ПРОЦЕССЫ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РИФТАХ: ОБЗОР

Настоящий раздел не претендует на сколько-нибудь полноценный анализ процессов осадконакопления в рифтовых зонах, так как данной проблеме в той или иной мере посвящены сотни публикаций [Milanovsky, 1976, 1983; Logatchev, 1977; Grachev, 1987; Kaz'min, 1987; Razvalyaev, 1988; Maslov, 1994; Chamov, 2016; Illies, Greiner, 1978; Crossley, 1984; Rosendahl, 1987; Morley, 1989; Lambiase, 1990; Cohen, 1990; Schlishe, 1991; Postma, Drinia, 1993; Ziegler, 1994; Lambiase, Bosworth, 1995; Olsen, 1995; Sengör, 1995; Withjack et al., 1998; Morley, 1999; Gawthorpe, Leeder, 2000; Renaut, Ashley, 2002; Corti, 2009; и многие др.].

Как подчеркнуто в монографии [Leonov, Volozh, 2004], рифты принадлежат категории структур, занимающих особое место в процессах формирования осадочных бассейнов, а многоплановые вопросы рифтогенеза продолжают оставаться в числе популярных тем в тектонике и геодинамике. При этом Ю.Г. Леоновым специально отмечено, что «главным диагностическим признаком рифтов является тектоническая структура и геодинамический режим, в котором она сформировалась. Остальные признаки, такие как состав пород, заполняющих рифт, наличие и тип магматизма и пр., важны, и многие из них выражены в рифтах достаточно характерно» [Leonov, Volozh, 2004, p. 45].

Процессы осадконакопления в рифтовых осадочных бассейнах тесно связаны с тектоническими

¹ Здесь $(SiO_2)_{adj}$ представляет содержание SiO_2 , полученное после пересчета содержаний 10 основных породообразующих оксидов на безводную основу.

процессами; последние контролируют объем и общую архитектуру области аккомодации. При этом характер осадконакопления в раздвиговых и сдвиговых бассейнах вследствие конвергенции признаков часто оказывается сходным. В собственно сбросовых бассейнах более грубые осадки, слагающие, как правило, конусообразные тела, являются отражением активных периодов образования сбросов и маркируют области разгрузки [Leonov, Volozh, 2004]. В бассейнах или их частях, образованных за счет смещений, подобных домино, пространство аккомодации контролируется величиной запрокидывания отдельных блоков. Это ведет к появлению локальных/разрозненных ловушек кластики, заполнение которых обломочным материалом часто определяется сложными соотношениями между погружающимися и воздымающимися блоками.

Характер выполняющих внутриконтинентальные рифтовые впадины отложений в разных их типах различен, так как контролируется рядом факторов, таких как тектоника и ее отражение в рельефе, климат, вулканическая деятельность и гидротермальная активность [Milanovsky, 1976]. *Щелевые рифты* (например, Восточно-Африканский) включают, как правило, два комплекса отложений [Logatchev, 1977; Rasskazov et al., 2010; и др.] – нижний/молассоидный (песчано-алевритоглинистые осадки озерного, болотного и аллювиального генезиса) и верхний/молассовый, сложенный более пестрым в гранулометрическом отношении набором пород (от тонкообломочных до валунно-галечных, озерного, аллювиального, пролювиального, флювиогляциального и иногда ледникового генезиса). В строении комплекса выполнения *сводово-вулканических рифтовых зон* решающее значение имеют вулканические образования. Присутствующие здесь осадочные образования также характеризуются аллювиальным, пролювиальным, озерным, лагунным и/или морским генезисом. Отложения, заполняющие бассейны *эпигорогенных рифтовых зон*, сходны с осадочным выполнением межгорных впадин орогенных областей. Это пестрые в генетическом отношении континентальные образования, включающие ту или иную долю вулканических пород различного состава.

К сожалению, в указанных выше и многих других работах нет сведений о валовом химическом составе синрифтовых псаммитов. Связано это в основном с тем, что и в середине 1970-х гг., и позднее такая информация, в отличие от сведений по химическому составу магматических образований, не считалась в какой-либо степени важной для анализа процессов формирования осадочного выполнения рифтовых структур.

Остановимся еще на классификации рифтовых структур. Наиболее приемлемой для целей нашего

исследования представляется систематика рифтов Дж. Шенгёра [Şengör, 1995; Şengör, Natal'in, 2001; и др.], так как принципиальным моментом ее является *положение о том, что рифты формируются на всех стадиях цикла Уилсона*. Эта классификация сочетается как геометрический и кинематический, так и динамический подход. В рамках первого выделяются отдельные небольшие рифты, рифтовые звезды, рифтовые цепочки, рифтовые кластеры и рифтовые сети. В основу кинематической составляющей положены характеристики границ плит, а также общие особенности перемещений и напряжений. Здесь выделяется ряд соподчиненных категорий, к наиболее крупным из которых относятся внутриплитные рифты (категория k1), рифты на дивергентных (k2), консервативных (k3) и конвергентных границах плит (k4), а также тройные сочленения рифтов (k5). В свою очередь, рифты на дивергентных границах плит включают структуры, сформированные вследствие сводообразования (k21, рифтовые долины Восточной Африки), и структуры, которые не связаны с предрифтовым сводообразованием (k22, трог Salton, Южная Калифорния). Рифты на консервативных границах плит объединяют структуры, сформированные в трансформных обстановках (k31), пулл-апарт бассейны (k32) и клинораздвиги (k33). Рифты на конвергентных границах ассоциируют либо с зонами субдукции (k41), либо с зонами континентальной коллизии (k42). Первые включают рифты, связанные с вулканическими дугами, испытывающими растяжение (k411, трог Окинава, Идзу-Бонинская дуга), рифты «нейтральных» дуг (k412) и рифты, связанные с дугами, находящимися на стадии сжатия (k413). К рифтам, связанным с зонами континентальной коллизии, принадлежат импактогены (k421, Верхнерейнский грабен, рифты Осло и Викинг), структуры, образованные в интраконтинентальных поясах столкновения (k422), и зоны деформаций, внешне напоминающие поверхность паковых льдов (k423, регион Эгейского моря, запад Анатолийского плоскогорья) [Şengör, Natal'in, 2001]. Динамический подход учитывает процессы, определяющие формирование рифтов. Наиболее крупные подразделения – рифты активного типа, «связанные с плюмами» (d1), и пассивного типа, «связанные с границами плит» (d2). В последней ситуации могут формироваться структуры, принадлежащие категориям k22, k31, k32, k33, k411, k412, k413, k421, k422, k423 и k5 [Şengör, Natal'in, 2001].

3. МАТЕРИАЛ И ПОДХОДЫ К ЕГО АНАЛИЗУ

На первом этапе исследований нами собран банк оригинальных и литературных данных о валовом

химическом составе (основные породообразующие оксиды, редкие и рассеянные элементы) песчаников и глинистых пород более чем 30 осадочных последовательностей разного возраста, накопившихся в различных типах рифтовых структур. К сожалению, не во всех работах авторы рассматривают одновременно данные и по песчаникам, и по глинистым породам. В связи с этим в настоящей публикации проанализированы только материалы по химическому составу песчаников 14 объектов (учтено ~270 полных химических анализов, таблица), представляющих интракратонные рифты, рифты, сформированные на разных этапах распада суперконтинентов Коламбия и Гондвана², задуговые рифты и рифты, образование которых происходило на завершающих стадиях орогенных циклов (рис. 1). К их числу относятся³ псаммиты неопротерозойской серии Uinta Mountain (Юта, США) [Condie et al., 2001], песчаники меловой формации Omdurman Хартумского бассейна (Центральный Судан) [Elzien et al., 2014], силикокластические образования бассейна Калахари Восточно-Африканской рифтовой зоны (Северо-Западная Ботсвана) [Huntsman-Mapila et al., 2005], отложения нижней части надсерии Vindhyan (Юго-Восточный Раджастан, Индия) [Raza et al., 2010], песчаники пермской формации Malužiná (Малые Карпаты, Словакия) [Vdačný et al., 2013], нижнемиоценовой формации Nukhul рифта Суэцкого залива (Центральный Синай, Египет) [Zaid, 2013], уйской серии неопротерозоя Учуро-Майского региона (Юго-Восточная Сибирь) [Khudoley et al., 2001; Cullers, Podkovyrov, 2002], мезонеопротерозойской серии Banxi (блок Янцзы, Южный Китай) [Deru et al., 2007], псаммиты верхнемеловой формации Sillakudi бассейна Cauvery (Южная Индия) [Bakkiaraj et al., 2010], мезопротерозойской надсерии Белт-Перселл (запад США) [González-Álvarez, 2005], серий Oronto и Bayfield верхов мезопротерозоя рифтовой области Мидконтинента (район Великих озер, США) [Cullers, Berendsen, 1998], айской и машакской свит, а также аршинской серии верхнего докембрия Южного Урала [Maslov, Gareev, 1994, 1996; Maslov et al., 2012a, 2012b, 2018; и др.].

Остановимся несколько подробнее на особенностях формирования отложений трех последних объектов из нашего банка данных. Взгляды иссле-

дователей на обстановки формирования осадочных последовательностей рифея восточной и северо-восточной (в современных координатах) периферии Восточно-Европейского кратона различны [Maslov, Isherskaya, 2002; Maslov et al., 2001]. Так, авторы работы [Ivanov, Samygin, 1986] отрицают существование в позднем докембрии к востоку от Урала океана, а следовательно, и наличие осадочных комплексов пассивных окраин в его западном секторе. По представлениям [Puchkov, 2000, p. 29], накопление кварцитосланцевых и карбонатных толщ здесь «... лишь прерывается пароксизмами рифтогенеза». В.С. Сурков с соавторами [Surkov et al., 1993] считают, что в начале рифея в центральной части Лавразии был сформирован длительно функционировавший мантийный плюм, обусловивший появление сводового поднятия и веерообразной системы внутриконтинентальных рифтогенных осадочных бассейнов.

Раннерифейские осадочные последовательности на территории современного Башкирского мегантиклинория и Волго-Уральской области выполняют широкую надрифтовую впадину с раздробленным фундаментом и представлены как вулканогенными и грубообломочными континентальными и прибрежно-морскими терригенными образованиями (айская и прикамская свиты), так и отложениями умеренно глубоководных обстановок, в том числе с ограниченной циркуляцией (суранская, бакальская, юшинская и другие свиты).

Накоплению осадочных образований среднего рифея предшествовала перестройка структурного плана. В начале среднего рифея на востоке Башкирского мегантиклинория сформировалась узкая рифтовая депрессия, где геологически почти мгновенно накапливалась вулканогенно-осадочная толща машакской свиты (до 2700–3300 м). Впоследствии указанная структура трансформировалась в надрифтовую впадину, охватившую также и прилегающие районы Восточно-Европейского кратона.

В позднем рифее (каратавии) произошло формирование крупного перикратонного прогиба, протягивавшегося, по всей видимости, от Южного Урала до северной периферии Кольского полуострова. В начале каратавия в него с запада и северо-запада поступала в громадных объемах аркозавая и полевошпатово-кварцевая кластика, накапливавшаяся в условиях интенсивного компенсированного и перекompенсированного прогибания в аллювиальных, аллювиально-дельтовых и прибрежно-бассейновых обстановках. Средние и верхние уровни каратавия сложены мелководными алюмосилико-кластическими и карбонатными последовательностями [Maslov et al., 2001].

На востоке Башкирского мегантиклинория в верхней части верхнепротерозойских образований

² Анализу данных по распределению на различных дискриминантных палеогеодинамических диаграммах точек состава синрифтовых песчаников и ассоциирующих с ними глинистых пород мы предполагаем посвятить специальную работу, которая сейчас готовится к публикации.

³ Мы не ставили перед собой задачу верификации авторских представлений о природе той или иной осадочной последовательности из приведенного списка, считая, что такой вопрос рассмотрен в цитируемых в данном абзаце работах. В то же время мы отдаем себе отчет в том, что могут быть и иные точки зрения.

Средние, минимальные и максимальные содержания породообразующих оксидов (мас. %) в синрифтовых песчаниках различных структур и значения ряда индикаторных параметров их состава

The mean, minimum and maximum contents of petrogenic oxides (wt. %) in the syn-rift sandstones of various objects of research, and the values of several indicator parameter of their composition

Компоненты	Объекты исследования						
	Серия Uinta Mountain (объект № 2)	Формация Omdurman (№ 5)	Отложения дельты р. Окаванго (№ 19)	Отложения нижней части надсерии Vindhyan (№ 29)	Формация Malužiná (№ 33)	Формация Nukhul (№ 35)	Уйская серия (№ 36)
SiO ₂	<u>89.66±7.46</u> 75.11–99.14	<u>86.49±8.06</u> 71.45–94.99	<u>92.12±5.93</u> 76.75–99.04	<u>91.83±5.01</u> 76.57–97.20	<u>76.11±4.33</u> 67.83–85.03	<u>79.32±5.64</u> 70.05–90.10	<u>77.71±10.72</u> 62.42–98.10
TiO ₂	<u>0.14±0.12</u> 0.04–0.37	<u>0.01±0.01</u> 0.004–0.02	<u>0.79±1.51</u> 0.02–6.91	<u>0.13±0.11</u> 0.03–0.38	<u>0.32±0.16</u> 0.05–0.63	<u>0.68±0.58</u> 0.06–1.99	<u>0.49±0.37</u> 0.01–1.34
Al ₂ O ₃	<u>4.37±3.58</u> 0.55–10.91	<u>5.44±1.71</u> 3.23–8.92	<u>2.05±2.96</u> 0.03–11.76	<u>3.54±2.44</u> 0.75–9.20	<u>11.99±1.78</u> 7.88–14.98	<u>6.05±3.98</u> 0.97–11.16	<u>8.50±4.89</u> 0.43–17.86
Fe ₂ O ₃ общ	<u>1.97±3.15</u> 0.05–12.37	<u>6.98±7.88</u> 0.52–22.14	<u>0.92±0.72</u> 0.14–2.43	<u>1.27±1.53</u> 0.02–4.06	<u>2.13±0.77</u> 0.61–3.66	<u>3.91±1.51</u> 1.08–5.42	<u>3.72±2.84</u> 0.04–11.52
MgO	<u>0.32±0.28</u> 0.04–0.97	<u>0.10±0.14</u> 0.01–0.41	<u>0.35±0.40</u> 0.03–1.52	<u>0.26±0.30</u> 0.02–1.18	<u>0.76±0.42</u> 0.08–1.80	<u>2.16±1.87</u> 0.49–5.80	<u>1.55±1.01</u> 0.10–4.46
CaO	<u>0.08±0.08</u> 0.01–0.28	<u>0.55±0.63</u> 0.008–1.92	<u>0.54±0.94</u> 0.01–3.53	<u>0.13±0.09</u> 0.06–0.42	<u>1.11±0.93</u> 0.09–3.30	<u>0.85±0.70</u> 0.13–2.11	<u>1.66±2.71</u> 0.03–13.65
Na ₂ O	<u>1.03±1.25</u> 0.02–3.29	<u>0.06±0.07</u> 0.02–0.24	<u>0.10±0.07</u> 0.02–0.38	<u>0.11±0.09</u> 0.02–0.39	<u>4.09±0.93</u> 1.73–5.66	<u>1.22±0.67</u> 0.06–1.98	<u>1.51±1.11</u> 0.01–3.22
K ₂ O	<u>1.53±1.21</u> 0.15–3.61	<u>0.07±0.03</u> 0.04–0.12	<u>0.37±0.27</u> 0.09–1.14	<u>1.01±1.77</u> 0.02–6.31	<u>1.17±0.47</u> 0.41–2.12	<u>2.17±1.10</u> 0.12–3.91	<u>1.78±1.35</u> 0.05–4.71
MnO	<u>0.01±0.03</u> 0.004–0.13	<u>0.32±0.72</u> 0.02–2.11	<u>0.01±0.006</u> 0.01–0.03	<u>0.03±0.02</u> 0.01–0.11	<u>0.04±0.02</u> 0.01–0.09	<u>0.07±0.04</u> 0.01–0.15	<u>0.02±0.01</u> 0.006–0.04
P ₂ O ₅	<u>0.03±0.02</u> 0.02–0.11	<u>0.02±0.01</u> 0.01–0.03	<u>0.01±0.01</u> 0.006–0.03	<u>0.03±0.02</u> 0.01–0.07	<u>0.08±0.03</u> 0.03–0.16	<u>0.09±0.04</u> 0.03–0.13	<u>0.19±0.15</u> 0.02–0.48
ппп	<u>0.84±0.88</u> 0.15–3.61	-	<u>2.42±1.73</u> 0.66–5.86	-	<u>2.04±1.01</u> 0.50–4.80	<u>3.38±1.23</u> 2.05–5.11	<u>2.45±1.86</u> 0.25–8.44
Сумма	<u>99.98±0.67</u> 98.11–100.80	-	<u>99.12±0.74</u> 98.50–100.90	-	<u>99.85±0.13</u> 99.28–100.00	<u>99.77±0.34</u> 99.26–100.33	<u>99.48±0.89</u> 96.35–100.94
log(SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	<u>1.50±0.49</u> 0.86–2.26	<u>1.22±0.14</u> 0.98–1.47	<u>2.23±0.88</u> 0.81–3.49	<u>1.53±0.37</u> 0.92–2.11	<u>0.81±0.09</u> 0.68–1.03	<u>1.24±0.41</u> 0.80–1.97	<u>1.11±0.51</u> 0.55–2.33
log(Na ₂ O/K ₂ O)	<u>0.63±0.99</u> 0.03–4.33	<u>1.14±1.96</u> 0.40–6.00	<u>0.29±0.12</u> 0.13–0.56	<u>1.50±2.46</u> 0.02–9.75	<u>4.26±2.50</u> 1.26–12.30	<u>0.59±0.29</u> 0.22–1.01	<u>-0.13±0.57</u> -1.45–0.67
F1	<u>-6.96±2.53</u> -9.24...-2.14	<u>-0.37±5.99</u> -6.51...11.45	<u>-9.15±3.67</u> -21.65...-2.62	<u>-7.70±1.62</u> -10.46...-5.19	<u>-0.56±1.68</u> -5.52...1.58	<u>-8.27±5.01</u> -17.19...-2.93	<u>-4.67±3.09</u> -10.35...1.75
F2	<u>-3.62±3.15</u> -7.45...-2.14	<u>-7.90±1.95</u> -11.56...-6.51	<u>-6.10±0.83</u> -6.76...-2.90	<u>-5.50±2.42</u> -7.61...-0.84	<u>0.90±1.82</u> -5.03...3.01	<u>-4.22±4.29</u> -12.81...-0.17	<u>-3.25±2.60</u> -7.26...1.34
K ₂ O/Na ₂ O	<u>6.14±7.96</u> 0.23...33.75	<u>1.81±0.78</u> 0.17–2.50	<u>3.94±1.51</u> 1.80–7.67	<u>10.97±16.38</u> 0.10–48.54	<u>0.31±0.18</u> 0.08–0.79	<u>2.23±1.28</u> 0.99–4.53	<u>3.83±7.28</u> 0.21–28.00
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	<u>55.32±58.04</u> 7.18...180.25	<u>17.87±6.24</u> 9.55–29.41	<u>789.04±1076.75</u> 6.53–3124.33	<u>47.25±40.77</u> 8.32–127.40	<u>6.56±1.55</u> 4.76–10.66	<u>27.39±30.09</u> 6.28–92.89	<u>30.58±52.51</u> 3.54–214.98
F3	<u>-3.39±1.10</u> -5.13...-1.26	<u>-7.69±4.27</u> -14.04...-3.98	<u>-4.55±1.48</u> -10.12...-2.84	<u>-4.02±0.34</u> -4.63...-3.53	<u>-0.19±0.83</u> -2.37...0.96	<u>-3.18±1.07</u> -5.10...-1.99	<u>-1.58±1.79</u> -4.89...1.64
F4	<u>0.19±1.84</u> -2.68...3.10	<u>-0.05±2.74</u> -4.02...5.95	<u>4.03±3.97</u> 1.48...19.97	<u>1.10±2.48</u> -5.36...2.87	<u>2.17±0.97</u> 0.18...4.51	<u>3.86±3.15</u> 0.60...9.42	<u>3.06±2.30</u> -0.98...7.06
DF1	<u>-1.26±2.10</u> -5.46...3.39	<u>-1.76±4.12</u> -8.26...3.39	<u>0.01±2.68</u> -4.15...6.20	<u>1.32±3.26</u> -4.98...6.37	<u>-2.00±1.46</u> -5.58...0.42	<u>0.46±3.20</u> -2.95...6.82	<u>-0.63±2.04</u> -3.42...3.89
DF2	<u>-7.55±2.43</u> -11.27...-2.22	<u>-0.57±1.57</u> -3.08...1.58	<u>-8.94±3.78</u> -14.99...-3.34	<u>-5.85±3.15</u> -11.00...-0.98	<u>-1.46±0.65</u> -2.67...0.31	<u>-4.53±1.77</u> -8.41...-2.51	<u>-4.10±2.38</u> -9.75...1.28
n	18	8	27	15	25	11	30

О к о н ч а н и е т а б л и ц а

E n d o f T a b l e

Компоненты	Объекты исследования						
	Серия Ванхи (№ 37)	Формация Sillakkudi (№ 44)	Надсерия Белт-Перселл (№ 51)	Серии Oronto и Bayfield (№ 52)	Айская свита (№ 53)	Машакская свита (№ 54)	Аршинская серия (объект № 55)
SiO ₂	<u>72.34±2.87</u> 68.00–75.84	<u>74.90±10.60</u> 60.41–90.46	<u>82.34±9.67</u> 66.70–99.64	<u>83.78±8.91</u> 65.10–97.10	<u>72.02±4.06</u> 67.80–80.90	<u>89.11±6.09</u> 76.18–97.53	<u>80.90±11.72</u> 63.26–96.20
TiO ₂	<u>0.71±0.09</u> 0.53–0.84	<u>1.15±0.17</u> 0.91–1.41	<u>0.32±0.22</u> 0.02–0.67	<u>0.43±0.34</u> 0.05–1.07	<u>0.50±0.19</u> 0.27–0.82	<u>0.29±0.15</u> 0.10–0.65	<u>0.41±0.25</u> 0.05–1.07
Al ₂ O ₃	<u>12.93±1.22</u> 10.67–14.95	<u>4.49±2.85</u> 0.76–9.89	<u>8.24±4.75</u> 0.21–16.17	<u>6.47±3.59</u> 1.36–13.70	<u>11.83±1.75</u> 8.60–15.07	<u>4.85±3.56</u> 0.70–12.86	<u>9.66±6.03</u> 1.74–17.89
Fe ₂ O ₃ общ	<u>7.08±1.23</u> 5.74–9.45	<u>4.64±5.05</u> 0.08–14.93	<u>2.27±1.48</u> 0.16–5.07	<u>1.84±2.09</u> 0.10–7.97	<u>2.66±1.29</u> 0.90–4.87	<u>2.93±2.39</u> 1.05–11.49	<u>3.20±2.56</u> 0.27–8.80
MgO	<u>1.52±0.70</u> 0.12–2.65	<u>0.17±0.12</u> 0.01–0.29	<u>1.43±1.09</u> 0.09–4.38	<u>0.96±0.84</u> 0.01–2.38	<u>1.24±0.65</u> 0.20–2.00	<u>0.65±0.58</u> 0.03–2.10	<u>0.85±0.98</u> 0.08–3.51
CaO	<u>1.94±1.91</u> 0.25–5.96	<u>7.74±5.56</u> 0.70–13.70	<u>0.48±0.51</u> 0.006–2.36	<u>0.73±1.21</u> 0.02–3.83	<u>1.63±1.46</u> 0.27–4.77	<u>0.56±0.42</u> 0.09–1.50	<u>0.25±0.49</u> 0.08–2.65
Na ₂ O	<u>2.16±0.86</u> 1.36–3.95	<u>1.13±1.31</u> 0.01–3.80	<u>1.06±0.80</u> 0.01–2.62	<u>0.10±0.05</u> 0.01–0.19	<u>1.81±0.61</u> 0.31–2.89	<u>0.08±0.07</u> 0.02–0.32	<u>1.23±0.67</u> 0.35–2.70
K ₂ O	<u>1.92±0.97</u> 0.67–3.16	<u>1.82±1.49</u> 0.02–4.21	<u>2.16±1.29</u> 0.16–5.45	<u>2.99±1.55</u> 0.12–5.30	<u>5.91±0.67</u> 4.80–6.84	<u>1.39±1.12</u> 0.04–3.69	<u>1.70±1.42</u> 0.07–3.99
MnO	<u>0.35±0.26</u> 0.12–0.79	<u>0.11±0.23</u> 0.07–0.81	<u>0.03±0.04</u> 0.02–0.18	<u>0.03±0.02</u> 0.01–0.09	<u>0.03±0.02</u> 0.01–0.07	<u>0.01±0.002</u> 0.005–0.05	<u>0.02±0.01</u> 0.01–0.05
P ₂ O ₅	<u>0.15±0.02</u> 0.11–0.17	<u>0.22±0.10</u> 0.11–0.39	<u>0.05±0.04</u> 0.03–0.15	<u>0.01±0.004</u> 0.002–0.018	<u>0.16±0.04</u> 0.08–0.21	<u>0.08±0.19</u> 0.03–0.86	<u>0.12±0.07</u> 0.02–0.34
ппп	–	<u>3.86±2.59</u> 0.19–6.21	<u>1.67±1.09</u> 0.15–5.15	<u>2.12±1.51</u> 0.31–4.45	<u>2.03±1.56</u> 0.46–5.30	<u>0.46±0.40</u> 0.02–1.02	–
Сумма	–	<u>100.21±0.63</u> 99.11–101.28	<u>100.13±0.19</u> 99.50–100.50	<u>99.46±0.33</u> 98.76–99.94	<u>99.81±0.30</u> 99.16–100.31	–	–
log(SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	<u>0.75±0.06</u> 0.67–0.85	<u>1.31±0.33</u> 0.80–2.00	<u>1.14±0.48</u> 0.64–2.68	<u>1.19±0.33</u> 0.70–1.85	<u>0.79±0.08</u> 0.65–0.97	<u>1.38±0.38</u> 0.79–2.14	<u>1.03±0.42</u> 0.55–1.74
log(Na ₂ O/K ₂ O)	<u>1.71±1.75</u> 0.48–5.81	<u>0.61±0.62</u> 0.04–2.22	<u>0.58±0.41</u> 0.01–1.48	<u>0.11±0.30</u> 0.01–1.25	<u>0.32±0.13</u> 0.05–0.60	<u>0.10±0.18</u> 0.006–0.80	<u>0.04±0.50</u> –0.69...1.15
F1	<u>0.54±3.09</u> –3.08...5.00	<u>–2.01±4.44</u> –8.52...6.68	<u>–6.70±2.37</u> –10.85...–2.01	<u>–7.82±3.53</u> –11.18...0.42	<u>–7.95±1.45</u> –11.11...–6.28	<u>–6.72±1.95</u> –9.20...–0.33	<u>–4.10±2.83</u> –8.18...1.89
F2	<u>–2.37±1.04</u> –3.89...–1.15	<u>0.25±6.24</u> –8.72...8.98	<u>–3.29±2.33</u> –7.49...0.45	<u>–3.25±1.89</u> –6.42...–0.19	<u>3.91±1.04</u> 2.85...5.96	<u>–5.52±1.73</u> –8.84...–2.47	<u>–3.42±1.94</u> –5.60...0.42
K ₂ O/Na ₂ O	<u>1.05±0.71</u> 0.17–2.08	<u>4.44±5.46</u> 0.45–23.00	<u>9.45±21.34</u> 0.68–100.67	<u>30.50±26.81</u> 0.60–109.00	<u>4.59±5.03</u> 1.67–20.39	<u>65.01±146.20</u> 1.25–610.00	<u>1.67±1.56</u> 0.07–5.98
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	<u>5.65±0.75</u> 4.67–7.11	<u>27.24±24.47</u> 6.34–99.13	<u>19.67±26.19</u> 4.42–105.98	<u>17.50±17.77</u> 4.40–71.40	<u>6.25±1.26</u> 4.50–9.41	<u>34.71±32.78</u> 6.23–139.33	<u>16.34±16.20</u> 2.56–55.29
F3	<u>–3.29±0.67</u> –4.39...–2.14	<u>–2.35±3.00</u> –6.06...2.59	<u>–2.87±0.74</u> –4.12...–1.14	<u>–4.18±0.62</u> –5.69...–3.15	<u>–1.34±0.84</u> –2.74...–0.04	<u>–3.95±1.61</u> –6.05...2.31	<u>–2.71±0.82</u> –3.76...–0.68
F4	<u>1.48±1.24</u> –0.49...3.59	<u>1.29±2.62</u> –3.64...4.68	<u>1.09±1.53</u> –2.83...3.69	<u>0.80±3.30</u> –3.61...8.92	<u>–3.82±1.42</u> –6.28...–1.86	<u>0.57±2.01</u> –2.26...6.50	<u>1.42±1.63</u> –2.64...4.28
DF1	<u>–0.93±2.41</u> –6.85...0.45	<u>–3.66±3.25</u> –8.25...1.67	<u>1.24±2.17</u> –1.70...5.69	<u>2.94±4.36</u> –8.42...8.48	<u>–0.75±2.38</u> –6.69...2.41	<u>–0.72±6.26</u> –13.15...9.00	<u>–2.64±2.15</u> –7.47...0.77
DF2	<u>–2.01±1.43</u> –3.81...0.26	<u>–7.68±2.23</u> –11.25...–3.15	<u>–4.72±2.02</u> –10.66...–1.30	<u>–8.90±2.16</u> –13.17...–4.78	<u>–5.59±1.72</u> –10.07...–3.81	<u>–9.11±3.49</u> –16.87...–5.17	<u>–4.78±1.13</u> –7.38...–1.97
n	8	13	38	16	12	20	27

П р и м е ч а н и е. В числителе – среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значение, ппп – потери при прокаливании. Прочерк – нет данных, n – число образцов в выборке.

N o t e. Numerator – arithmetic mean and standard deviations; denominator – minimum and maximum values; ppp – loss of ignition; dash – no data; n – the number of analyzed samples.

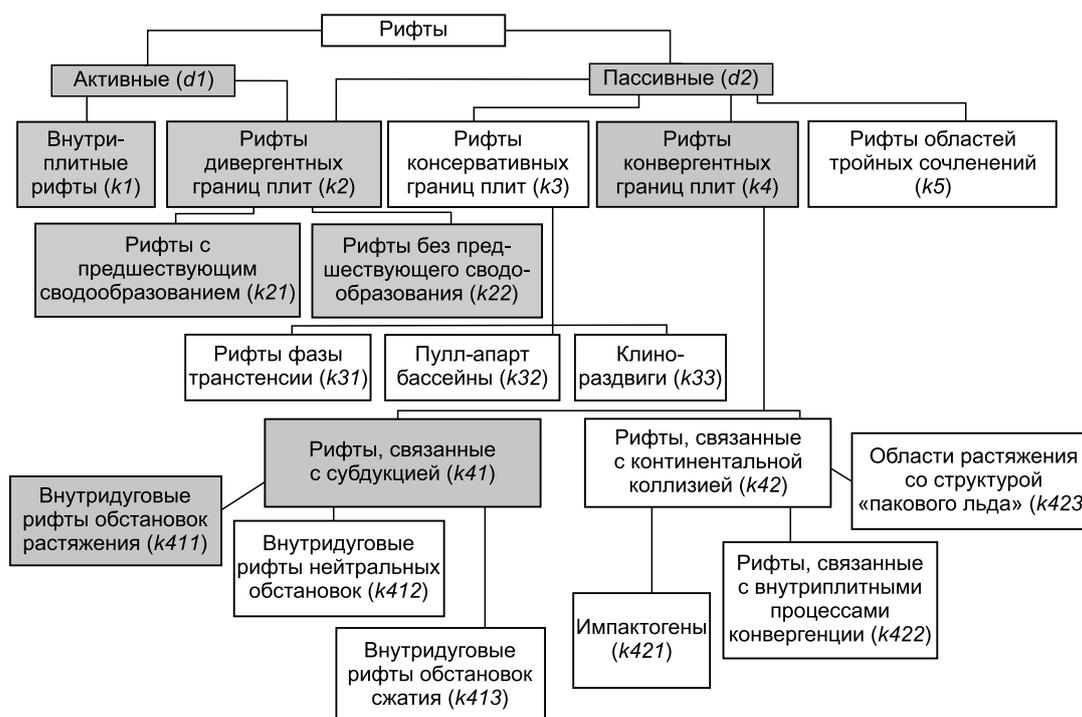


Рис. 1. Классификация рифтов Дж. Шенгёра [Şengör, 1995; Şengör, Natal'in, 2001]. Серой заливкой показаны категории рифтов, о песчаниках осадочного заполнения которых идет речь в данной работе.

Fig. 1. Rift classification after A.M.C. Şengör [Şengör, 1995; Şengör, Natal'in, 2001]. Gray filling shows the rift categories with the discussed syn-rift sandstones.

присутствует комплекс вулканогенных и осадочных пород (аршинская свита/серия) [Maslov et al., 2018]. Слагающие ее образования рассматриваются как терригенно-сланцевый рифтогенно-депрессивный комплекс, формирование которого связано с начальным этапом континентального рифтогенеза [Rykus et al., 2002; и др.]. Эти представления подтверждает и распределение точек составов метаосадочных пород аршинской серии на диаграмме DF1–DF2 [Verma, Armstrong-Altrin, 2013]. С учетом данных о геодинамической природе metabazaltov аршинской серии [Maslov et al., 2018] это делает представления о рифтогенной/плюмовой природе породных ассоциаций данного уровня верхнего докембрия Южного Урала достаточно хорошо обоснованными. Как показано в статье [Puchkov, 2016], на нераспавшейся части Родинии (Балтика, Лаврентия, Калахари, Сибиря) в интервале 750–710 млн лет магматические образования формируют широкую, но сравнительно компактную область, и не исключено, что они обусловлены суперплюмом. В этом случае аршинский (позднекаратауский) эпизод рифтогенеза принадлежит активному типу, является плюмзависимым и отражает один из этапов распада Родинии.

На *втором этапе* исследований проанализировано: 1) положение полей составов синрифтовых

песчаников на классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [Pettijohn et al., 1972] и диаграмме F1–F2 [Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986], дающей представление о возможном составе комплексов пород – источников обломочного материала; 2) положение полей составов песчаников перечисленных выше объектов, а также средних значений некоторых индикаторных отношений и функций, используемых при построении ряда различных дискриминантных палеогеодинамических диаграмм, таких как $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, F3–F4, $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ и DF1–DF2.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Состав синрифтовых песчаников

Среднее арифметическое содержание SiO_2 в синрифтовых песчаниках, входящих в наш банк данных, варьируется от ~72 мас. % (айская свита нижнего рифея Южного Урала) до ~92 мас. % (силикокластические образования бассейна Калахари, Восточно-Африканская рифтовая система). Минимальное среднее содержание TiO_2 (~0.01 мас. %) присуще псаммитам айской свиты Южного Урала, максимальное (1.15 мас. %) – песчаникам верхне-

меловой формации Sillakkudi. Параметр Al_2O_3 среднее⁴ варьируется от 2.05 мас. % (песчаники бассейна Калахари) до ~13 мас. % (мезонеопротерозойская серия Vanxi). Величина Na_2O среднее изменяется от 0.06 мас. % (меловая формация Omdurman) до ~4.1 мас. % (пермская формация Malužiná). Наконец, минимальное значение K_2O среднее составляет 0.07 мас. % (меловая формация Omdurman), а максимальное достигает ~5.9 мас. % (айская свита Южного Урала).

Для классификации песчаников по валовому химическому составу предложена диаграмма $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$ [Pettijohn et al., 1972], на которой показаны поля граувакк, лититов и сублититов, аркозов и субаркозов, а также кварцевых аренитов. Эта диаграмма чрезвычайно широко используется при литогеохимических исследованиях терригенных образований [Murphy et al., 1996; Das et al., 2006; Dupuis et al., 2006; Svendsen et al., 2007; El-Rahman et al., 2010; Descourvieres et al., 2011; Fatima, Khan, 2012; Roy, Roser, 2012; и др.].

Поля составов песчаников из нашего банка данных имеют на ней различное расположение (рис. 2, а); разброс значений $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ составляет от 0.4 до 3.5, параметр $\log(Na_2O/K_2O)$ изменяется от ~0.2 до более 6.0. Показательно, что поля составов песчаников ряда объектов (например, № 5 – песчаники меловой формации Omdurman, № 33 – песчаники пермской формации Malužiná и № 37 – песчаники мезонеопротерозойской серии Vanxi) вообще выходят за пределы предложенных Ф.Дж. Петтиджоном с соавторами классификационных областей, а для большинства исследуемых нами объектов характерно наличие того или иного количества индивидуальных образцов, также локализованных вне областей «типичных песчаников».

При обращении к анализу средних значений $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ и $\log(Na_2O/K_2O)$ для исследуемых нами выборок, а также присущих им величин стандартных отклонений можно заметить, что подавляющая часть средних точек все же локализована в обычных для диаграммы Ф.Дж. Петтиджона с соавторами областях, за исключением граувакк и лититов (рис. 2, б). Однако средние точки ряда объектов и здесь расположены вне диаграммы (объект № 5 – песчаники формации Omdurman, № 19 – силикокластические образования бассейна Калахари, № 29 – песчаники нижней части надсерии Vindhyan, № 33 и 37 – песчаники формации Malužiná и серии Vanxi).

Все это показывает, что валовый химический состав синрифтовых песчаников может быть различным, что хорошо подтверждается и данными ис-

следования их петрографического состава [Evans, 1990; Ingersoll et al., 1990; Garzanti et al., 2001; и др.]. В то же время, как мы увидим ниже, состав петрофонда исследованных нами песчаниковых ассоциаций в целом не столь пестр, как можно было бы ожидать, исходя из собственно петрографического состава псаммитов.

4.2. Состав пород в источниках сноса

Для суждения о составе пород, выступавших источниками обломочного материала для песчаников исследуемых нами осадочных последовательностей, использована диаграмма F1–F2 [Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986]. На ней значительная часть полей синрифтовых псаммитов сосредоточена в области составов, образованных за счет размыва богатых кварцем осадочных пород (рис. 3, а). Некоторые поля расположены в двух (№ 33, 37 и 53) и более (объект № 44 – песчаники верхнемеловой формации Sillakkudi) классификационных полях диаграммы.

Средние точки большинства синрифтовых песчаниковых ассоциаций также сосредоточены в области составов, источниками обломочного материала для которых являлись богатые кварцем осадочные образования (рис. 3, б). Несколько по-иному локализованы средние точки ассоциаций № 33 и 44 (в поле составов, источниками кластики для которых являлись кислые вулканические образования), № 37 (то же, изверженные породы среднего состава), а также № 5 и 53. Средняя точка песчаников ассоциации 5 попадает на линию, разделяющую поля, образованные материалом размыва богатых кварцем осадочных и изверженных пород основного состава, а средняя точка псаммитов ассоциации № 53 – на линию, разграничивающую поля, типичные для продуктов размыва кислых вулканических пород и богатых кварцем осадочных образований.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что в областях размыва при формировании синрифтовых песчаников рассматриваемых нами ассоциаций основную роль играли богатые кварцем осадочные образования с той или иной долей магматических пород кислого, среднего и основного состава.

4.3. Положение полей синрифтовых песчаников на дискриминантных диаграммах

Диаграмма $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ Дж. Мейнарда с соавторами. При нанесении полей синрифтовых песчаниковых ассоциаций на данную диаграмму мы столкнулись с феноменом существенно больших собственных им значений и K_2O/Na_2O , и SiO_2/Al_2O_3 , чем принято в ее оригинальной версии

⁴ Здесь и далее таким образом обозначены средние арифметические содержания того или иного оксида.

(рис. 4, а). Это же наблюдается и для средних составов подавляющего большинства песчанниковых ассоциаций, за исключением псаммитов пермской формации Malužiná (объект 33) и мезонеопротерозойской серии Banxi (объект 37) (рис. 4, б). Первые из них сопоставимы с составами песчаных пород преддуговых бассейнов (это отвечает реальной геологической ситуации), а вторые – с составами песчанников пассивных континентальных окраин.

Средние точки песчанников айской и машакской свит, а также аршинской серии верхнего докембрия Южного Урала, формирование которых рассматривается многими авторами [Ivanov, Samygin, 1986; Puchkov, 2000, 2010; и др.] как происходившее в обстановках, сходных с рифтогенными, в том числе и активного рифтогенеза, расположены на диаграмме Дж. Мейнарда с соавторами достаточно далеко от ее стандартных полей. На наш взгляд, все сказанное в целом показывает, что диаграмма Дж. Мейнарда с соавторами не может использоваться в целях геодинамической типизации синрифтовых песчанниковых ассоциаций.

Диаграмма F3–F4 М. Бхатиа и К. Крука. Поля синрифтовых песчанниковых ассоциаций, как и их средние точки, на данной диаграмме тяготеют в подавляющем большинстве случаев к области составов псаммитов, свойственных пассивным континентальным окраинам (рис. 5, а, б). Они занимают примерно половину данной области, но для того чтобы обозначить ее как область составов синрифтовых терригенных ассоциаций, нужны дополнительные исследования; пока же, на основе нашего опыта, это представляется малоперспективным. Единственное исключение – песчанники нижнерифейской айской свиты западного склона Южного Урала, поле точек индивидуальных образцов кото-

рых и средняя для всей выборки точка локализованы в области составов активных континентальных окраин. Точки песчанников машакской свиты и аршинской серии рифея Южного Урала расположены в области составов, типичных для пассивных континентальных окраин.

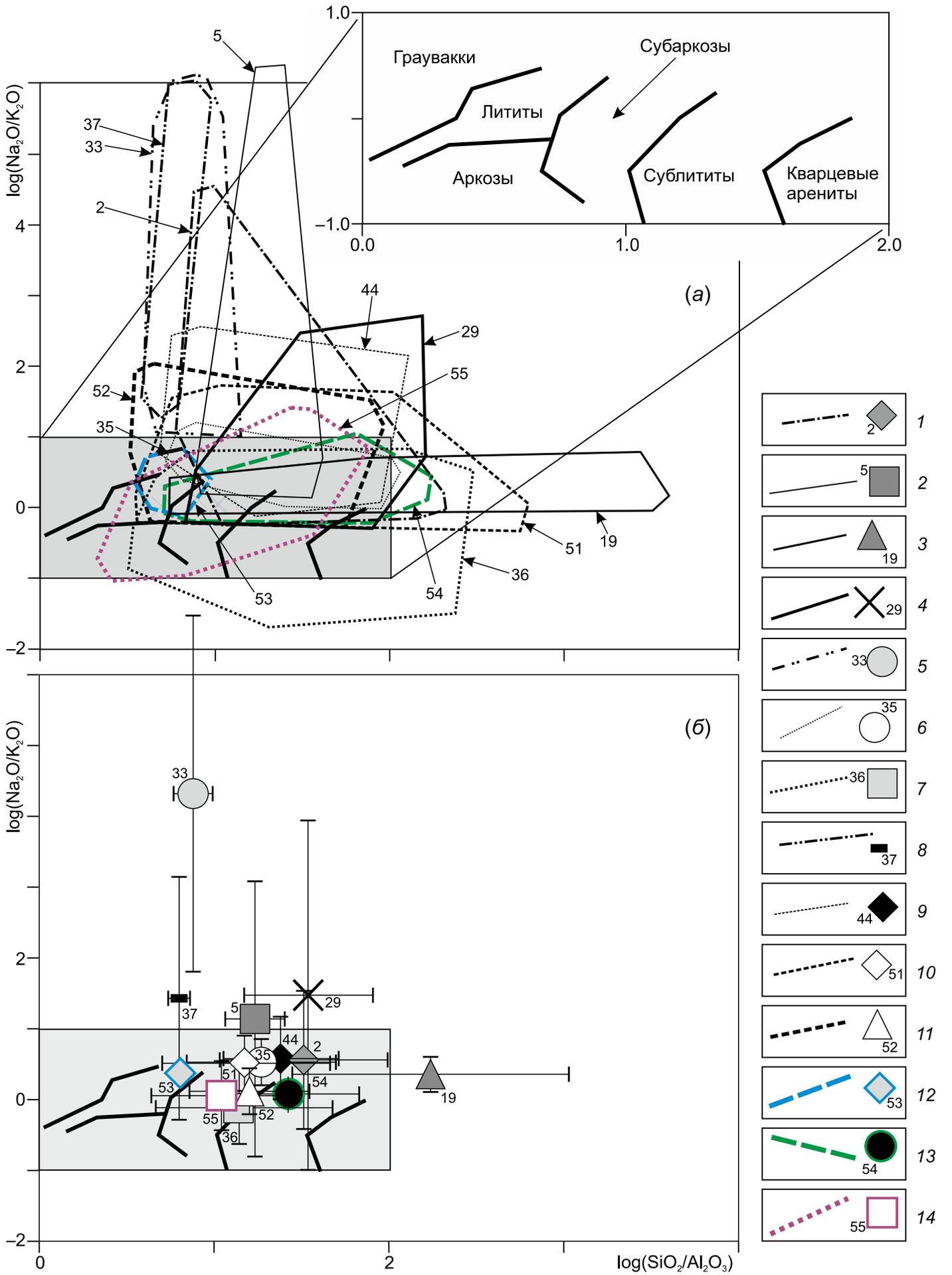
Диаграмма SiO_2-K_2O/Na_2O Б. Розера и Р. Корша. На этой диаграмме, так же как и на диаграмме F3–F4, поля синрифтовых песчанниковых ассоциаций сосредоточены преимущественно в области состава псаммитов пассивных континентальных обстановок и занимают почти всю ее площадь (рис. 6, а). Исключениями из сказанного, как и в случае с диаграммой Дж. Мейнарда с соавторами, являются поля песчанников пермской формации Malužiná (объект 33) и песчанников мезонеопротерозойской серии Banxi (объект 37), локализованные почти полностью в области составов псаммитов активных континентальных окраин. Более отчетливо все сказанное видно при анализе распределения средних для рассматриваемых нами 14 синрифтовых песчанниковых ассоциаций точек состава (рис. 6, б). Последние на указанной диаграмме, так же как и на диаграмме М. Бхатиа и К. Крука, занимают примерно половину области составов терригенных пород пассивных континентальных окраин. Однако отметить, исходя из этого, особую область синрифтовых псаммитов нам представляется не вполне конструктивным, так как в этой же части данной области диаграммы действительно сосредоточено, как правило, множество точек псаммитов пассивных окраин континентов [McCann, 1998; Das et al., 2006; Dostal, Keppie, 2009; Etemad-Saeed et al., 2011; Descourvieres et al., 2011; Wang et al., 2013; и др.]. Песчанниковые ассоциации базальных уровней нижнего и среднего рифея типового разреза, а также

Рис. 2. Положение полей (а) и средних точек (б) состава синрифтовых песчанников на диаграмме Ф.Дж. Петтиджона с соавторами.

1 – неопротерозойская серия Uinta Mountain, США; 2 – меловая формация Omdurman, Хартумский бассейн; 3 – голоценовые силикокластические образования, бассейн Калахари; 4 – нижняя часть надсерии Vindhyan, Индия; 5 – пермская формация Malužiná, Малые Карпаты; 6 – нижнемиоценовая формация Nukhul, Суэцкий рифт; 7 – неопротерозойская уйская серия, Учуро-Майский регион, Юго-Восточная Сибирь; 8 – мезонеопротерозойская серия Banxi, Южный Китай; 9 – верхнемеловая формация Sillakkudi, бассейн Cauvery; 10 – мезопротерозойская надсерия Белт-Перселл, США; 11 – серии Oronto и Bayfield верхов мезопротерозоя, рифтовая область Мидконтинента, США; 12 – айская свита нижнего рифея, Южный Урал; 13 – машакская свита среднего рифея, Южный Урал; 14 – аршинская серия верхнего докембрия, Южный Урал. Цифры у полей и средних точек – номера объектов в нашем банке данных.

Fig. 2. The syn-rift sandstone compositions on the diagram of F.J. Pettijohn et al. (a) – fields; (b) – mean points.

1 – Neoproterozoic Uinta Mountain Group, USA; 2 – Cretaceous Omdurman Formation, Khartoum Basin; 3 – Holocene silicoclastic deposits, Kalahari Basin; 4 – the lower part of the Vindhyan Supergroup, India; 5 – Permian Malužiná Formation, Small Carpathians; 6 – Lower Miocene Nukhul Formation, Suez Rift; 7 – Neoproterozoic Ui Group, Uchuro-May region, Southeast Siberia; 8 – Meso-Neoproterozoic Banxi Group, South China; 9 – Upper Cretaceous Sillakkudi Formation, Cauvery Basin; 10 – Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup, USA; 11 – Upper Mesoproterozoic Oronto and Bayfield Groups, Midcontinent, USA; 12 – Lower Riphean Ai Formation, Southern Urals; 13 – Middle Riphean Mashak Formation, Southern Urals; 14 – Upper Precambrian Arsha Group, Southern Urals. Figures near the fields and mean points are the numbers of the objects in our database.



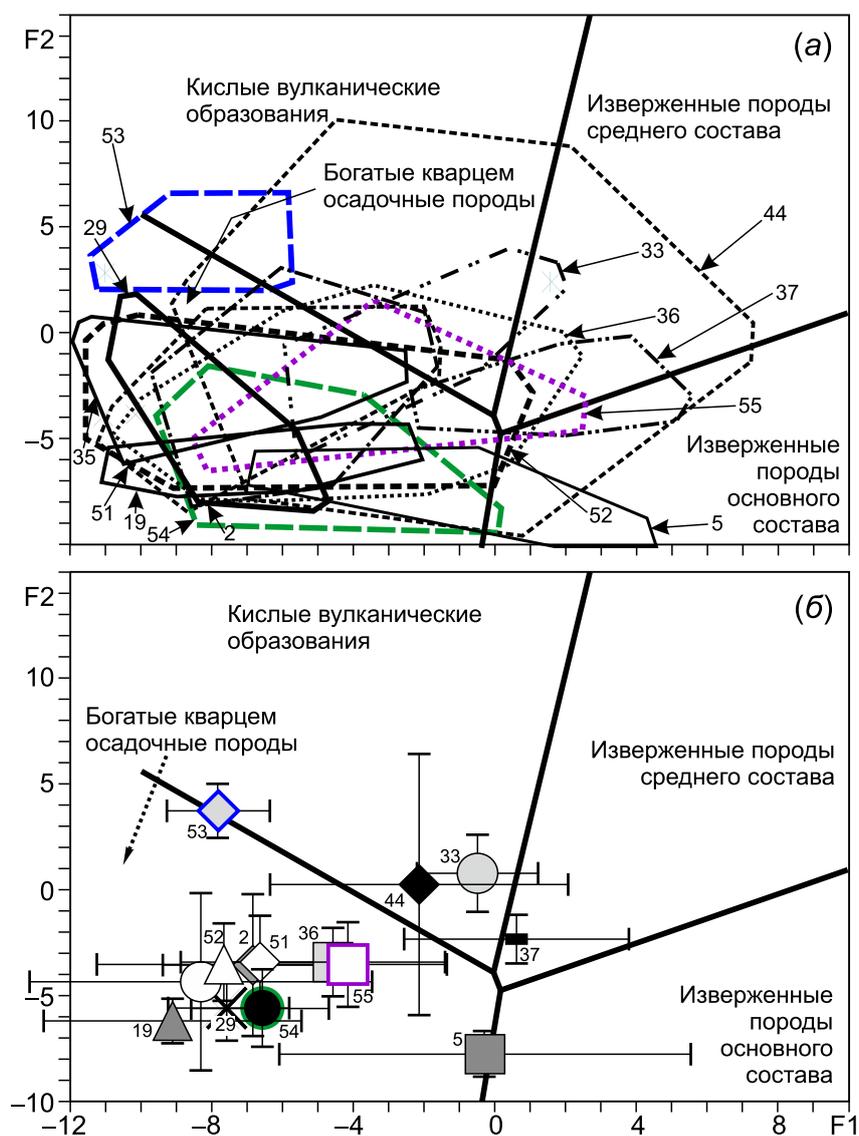


Рис. 3. Положение полей (а) и средних точек (б) состава синрифтовых песчаников на диаграмме М. Бхатиа и К. Крука для реконструкции состава пород на палеоводосборах. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 3. The syn-rift sandstone compositions on the diagram designed by M. Bhatia and K. Crook to reconstruct the composition of catchment rocks. (a) – fields; (б) – mean points. See Fig. 2 for the legend.

псаммиты аршинской серии восточного крыла Башкирского мегантиклинория локализованы на указанной диаграмме в области составов пассивных континентальных окраин.

Диаграмма DF1–DF2 С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина⁵. Как уже отмечено выше, на данной диаграмме впервые появляется область составов терригенных пород, формировавшихся в условиях рифтогенеза. Насколько соответствуют ей поля составов и средние точки исследованных нами син-

рифтовых песчаниковых ассоциаций разного возраста?

Распределение на данной диаграмме полей состава индивидуальных образцов синрифтовых псаммитов осадочных последовательностей из нашего банка данных носит, как и в большинстве рассмотренных выше случаев, достаточно хаотичный характер, тем более что от трети до половины площади некоторых из них (например, объекты № 29, 35, 36, 52, 54 и др.) расположено не только собственно в области рифтогенных терригенных образований, но и в области составов, сформированных в коллизионных обстановках (рис. 7, а).

При рассмотрении положения на диаграмме DF1–DF2 средних точек состава синрифтовых пес-

⁵ Подавляющее большинство валовых химических анализов песчаников из нашего банка данных характеризуется содержаниями $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}} > 63\%$, поэтому нами использована диаграмма С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина [Verma, Armstrong-Altrin, 2013] для высококремнистых составов.

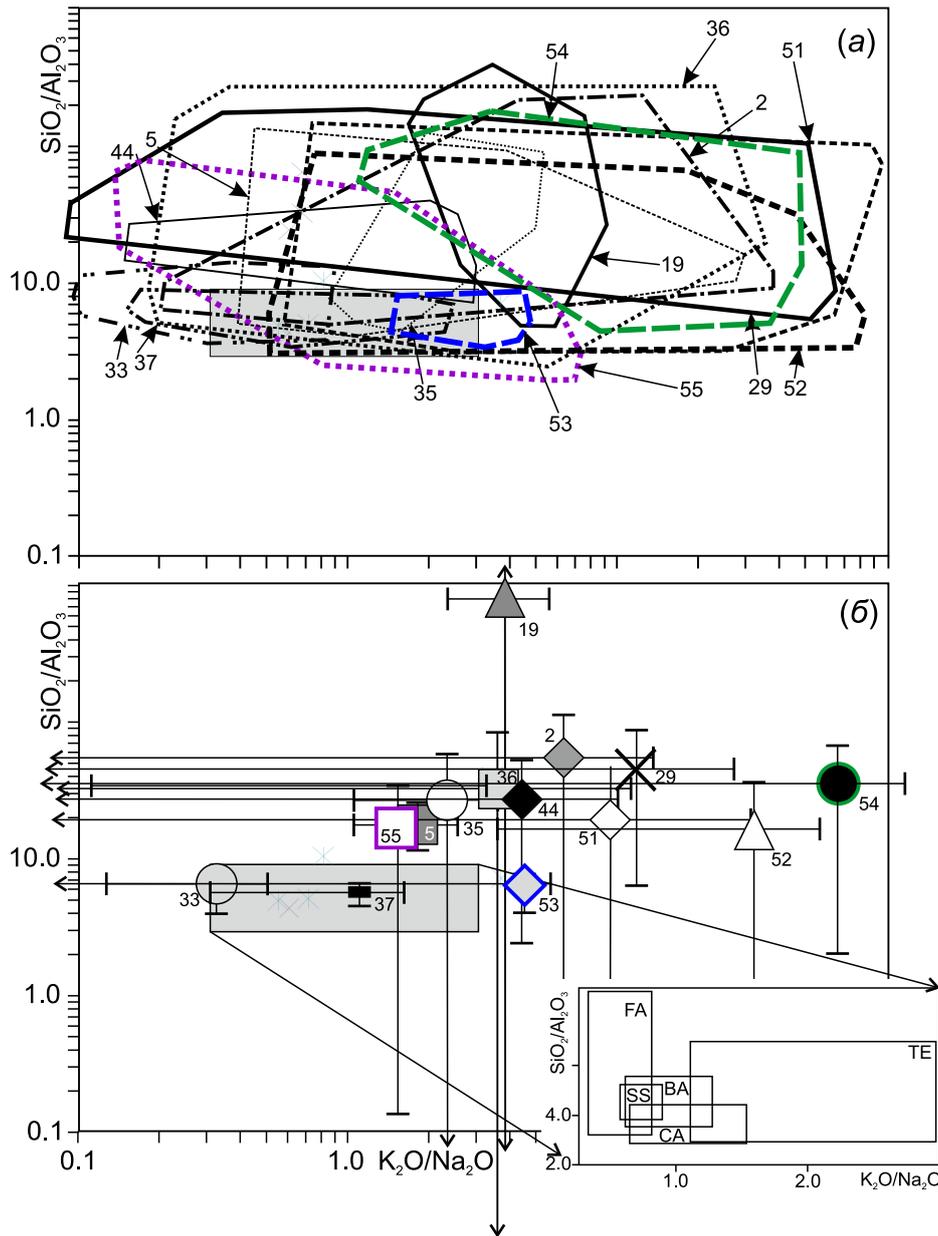


Рис. 4. Положение полей (а) и средних точек (б) состава синрифтовых песчаников на диаграмме Дж. Мейнарда с соавторами. Поля песчаных пород: TE – бассейнов пассивных континентальных окраин; SS – бассейнов активных окраин, сопряженных со сдвигами; CA – то же, сопряженных с окраинно-континентальными дугами; FA – преддуговых бассейнов; BA – задуговых бассейнов. Остальные условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 4. The syn-rift sandstone compositions on the diagram of J. Maynard et al. (a) – fields; (б) – mean points. Sandstone fields: TE – basins of passive continental margins; SS – basins of active margins, associated with shifts; CA – the same, conjugated with continental arcs; FA – forearc basins; BA – backarc basins. See Fig. 2 for the legend.

чаников различных ассоциаций картина становится более четкой (рис. 7, б). Средние точки трех объектов – песчаников нижней части надсерии Vinhyuan (№ 29), мезопротерозойской надсерии Белт-Перселл (№ 51) и серий Oronto и Bayfield рифтовой области Мидконтинента (№ 52) – попадают в область составов терригенных пород, характерных, по мнению С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина, для коллизионных обстановок. Точки остальных 11

объектов из нашего банка данных, в том числе и песчаниковых ассоциаций верхнего докембрия Южного Урала (объекты № 53 – айская свита, 54 – машакская свита и 55 – аршинская серия), на данной диаграмме локализованы в области составов, свойственных рифтогенным обстановкам. Можно предполагать, что это в какой-то мере «сглаживает» ранее высказанное Ю.Г. Леоновым мнение о том, что «возможность субъективных оценок ве-

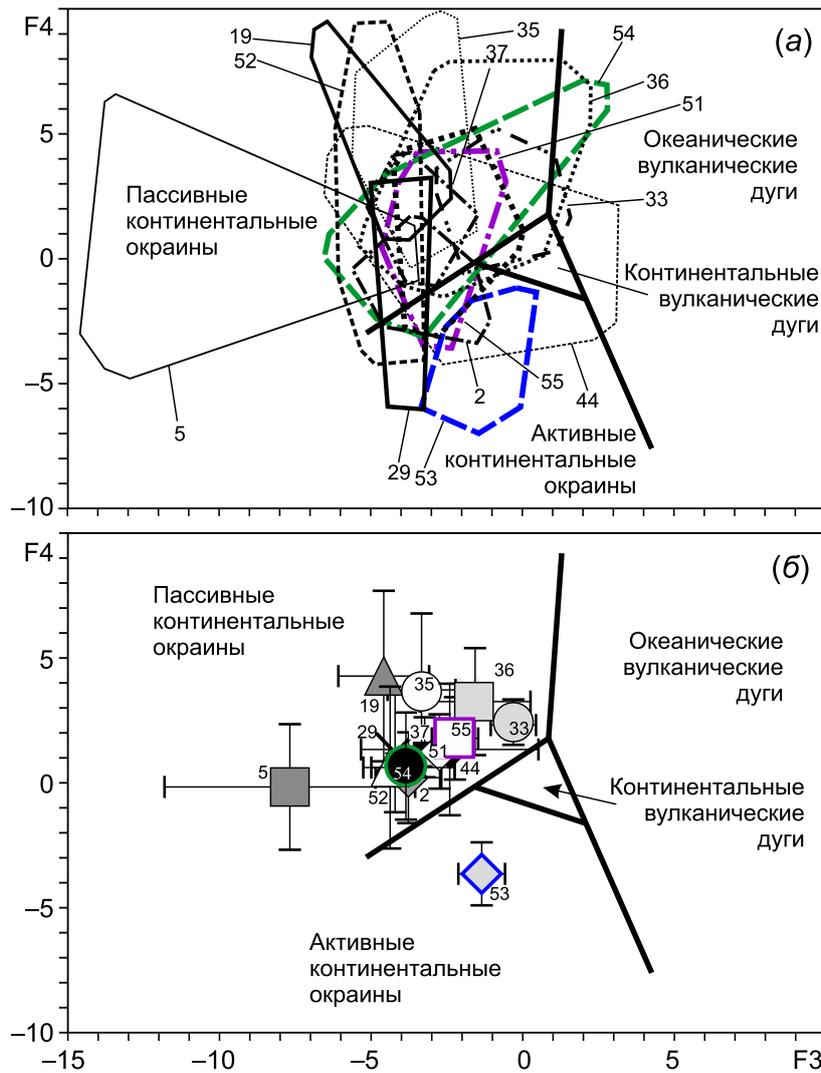


Рис. 5. Положение полей (а) и средних точек (б) состава синрифтовых песчаников на диаграмме М. Бхатиа и К. Крука для реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования терригенных ассоциаций. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 5. The syn-rift sandstone compositions on the diagram designed by M. Bhatia and K. Kruk to reconstruct the paleogeodynamic settings for sedimentary rocks. (a) – fields; (b) – mean points. See Fig. 2 for the legend.

лика ... тогда, когда рифт устанавливается на основании состава пород, считающихся индикаторами рифтового режима, и при отсутствии структурных признаков рифта. Помимо того, что представления о породах-индикаторах, в том числе магматических, вообще довольно размыты, в реальных ситуациях, особенно в складчатых поясах, эти породы часто представлены фрагментами, нередко к тому же претерпевшими тектоническую и метаморфическую переработку ...» [Leonov, Volozh, 2004, p. 45]. Такая точка зрения применима, как раньше считал и один из авторов настоящей работы, к ряду ранне- и среднерифейских объектов западного склона Южного Урала, так же как и к части позднекембрийских комплексов Северо-Американской и Восточно-Европейской платформ [Maslov, 1994], но в

свете рассмотренных выше данных эти представления, вполне вероятно, нуждаются в определенной корректировке.

Таким образом, так называемая «степень успеха/соответствия» в исследованной нами ситуации составляет ~80 %, тогда как, по данным авторов [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], для диаграммы с $63 < (SiO_2)_{adj} < 95$ мас. % «степень соответствия» для образцов из рифтогенных обстановок варьировалась в пределах 79–85 %, а для диаграммы с $(SiO_2)_{adj}$ от 35 до 63 мас. % – 75–92 % [Maslov et al., 2016b].

Наконец, мы рассчитали для всей совокупности индивидуальных валовых химических анализов синрифтовых песчаников из нашего банка данных средние значения DF1 и DF2. Соответствующая им средняя точка оказалась расположена в области со-

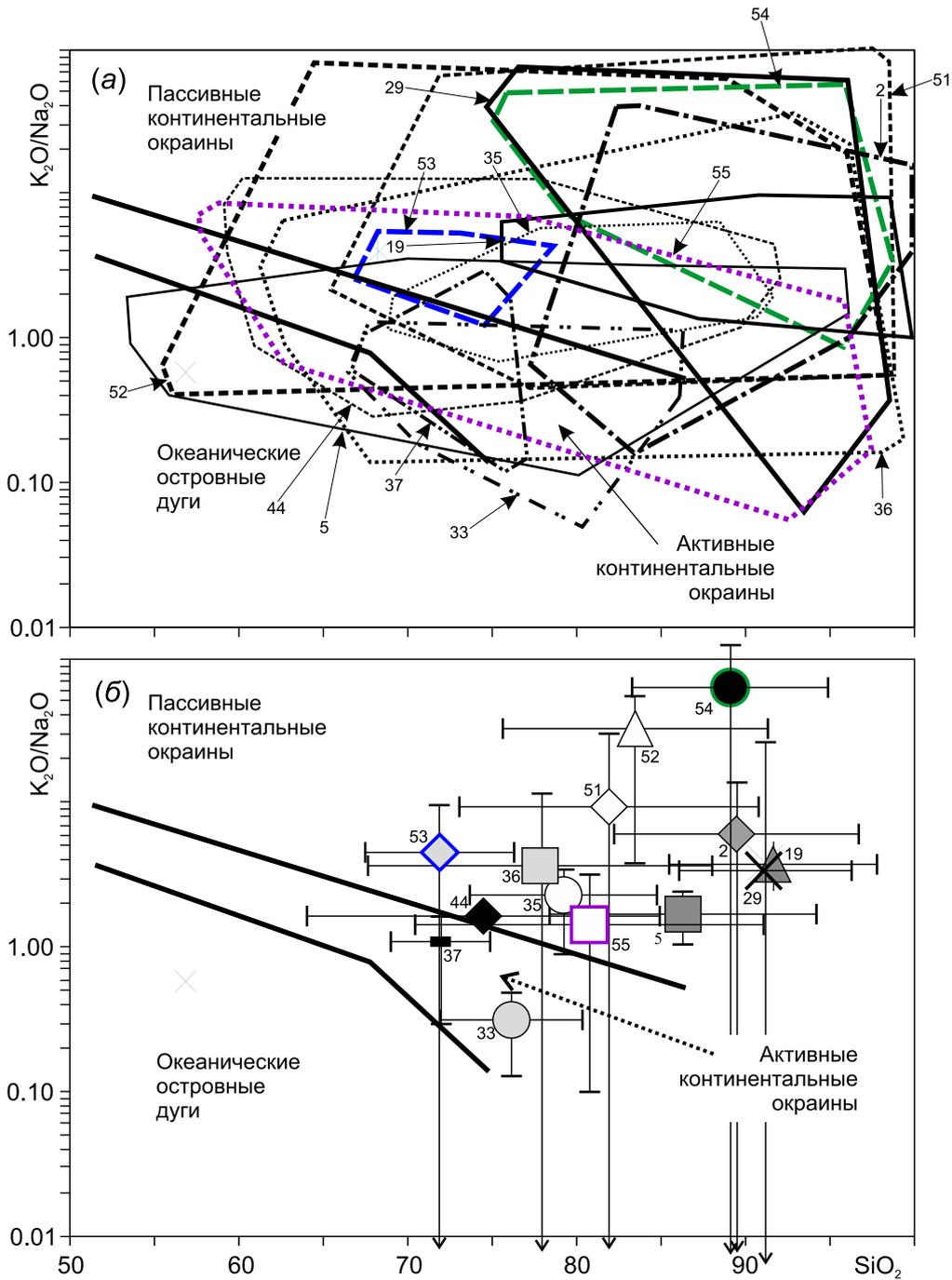


Рис. 6. Положение полей (а) и средних точек (б) состава синрифтовых песчаников на диаграмме Б. Розера и Р. Корша. Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 6. The syn-rift sandstone compositions on the diagram of B. Roser and R. Korsch. (a) – fields; (б) – mean points. See Fig. 2 for the legend.

ставов, характерных для терригенных пород рифтогенных геодинамических обстановок (рис. 7, в).

Следует, однако, подчеркнуть еще одно обстоятельство. Так как на диаграмме DF1–DF2 нет области, отвечающей составам песчаников пассивных континентальных окраин, мы вынесли на диаграмму с $(SiO_2)_{adj} > 63\%$ составы ряда платформенных и сходных с ними псаммитовых ассоциаций. В итоге

поля точек разных объектов этого класса распределились между областями, характерными для рифтогенных и коллизионных образований [Maslov et al., 2016b], т.е. фактически мы вернулись к ситуации с распределением полей и средних точек состава рифтогенных песчаников и песчаников пассивных континентальных окраин на диаграммах М. Бхатиа и К. Крука, а также Б. Розера и Р. Корша.

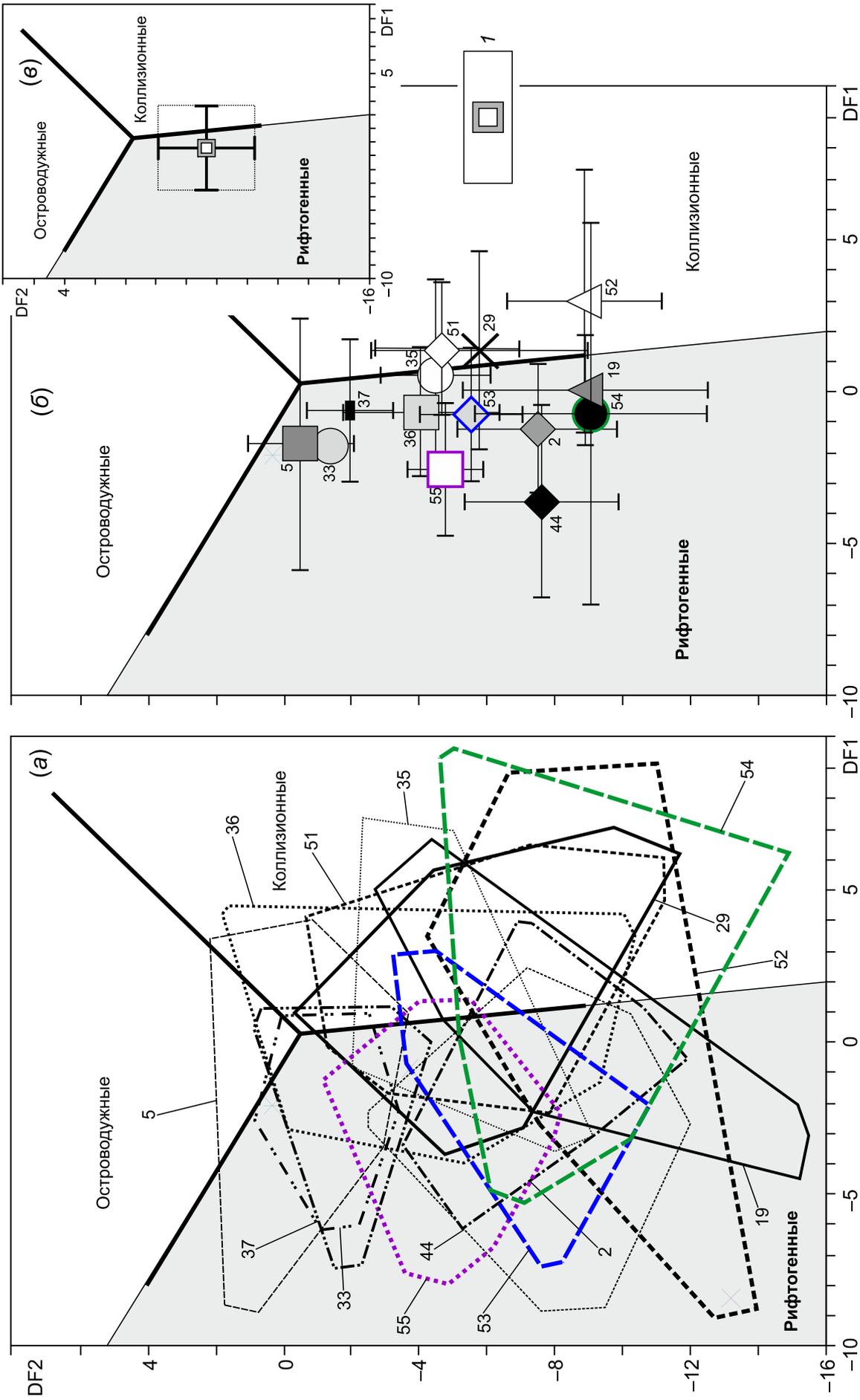


Рис. 7. Положение полей (а) и средних точек (б) и также «общей точки» (в) состава синрифтовых песчаников на диаграмме С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина. 1 – «общая/средняя точка» состава синрифтовых песчаников (~270 валовых химических анализов) из проанализированной нами базы данных. Остальные условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 7. The syn-rift sandstone compositions on the diagram of S. Verma and J. Armstrong-Altrin. (a) – fields; (б) – mean points; (в) – the location of the 'common' point of the composition of syn-rift sandstones. 1 – the 'common/mean point' of the composition of syn-rift sandstones (~270 bulk chemical analyses) from our database. See Fig. 2 for the legend.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенных данных позволяет сделать ряд выводов относительно валового химического состава и особенностей распределения полей синрифтовых песчаников и их средних точек на широко используемых в настоящее время дискриминантных палеогеодинамических диаграммах для терригенных пород. Поля синрифтовых песчаников характеризуются широким разбросом значений $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ (0.4...3.5) и $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (~0.2...6.0 и более). Ряд из них вообще не укладываются в типовые области песчаников классификационной диаграммы [Pettijohn et al., 1972]. Их средние точки ведут себя несколько по-иному, в основном соответствуя классификационным областям, за исключением граувакк и лититов. Из сказанного следует вывод о том, что состав синрифтовых песчаников может быть различным, так как контролируется значительным числом факторов. Этот вывод не противоречит тому, что из распределения полей и средних точек синрифтовых песчаниковых ассоциаций на диаграмме F1–F2 [Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986] можно сделать заключение о формировании их основной части за счет размыва богатых кварцем осадочных пород и, в ряде случаев, кислых магматических образований.

Диаграмма Дж. Мейнарда с соавторами не пригодна для отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории синрифтовых псаммитов, несмотря на то, что на ней показана область составов песчаников пассивных континентальных окраин, т.е. объектов, характеризующихся в существенной степени спокойной геодинамикой.

На диаграммах М. Бхатиа и К. Крука, а также Б. Розера и Р. Корша и поля, и средние точки составов синрифтовых песчаников, напротив, в основном расположены в области пассивных континентальных окраин. В этой же области локализованы, естественно, и точки собственно псаммитов пассивных окраин, что делает невозможным использование и данных диаграмм для более или менее убедительного отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории «выполняющих внутриконтинентальные рифты».

В то же время на диаграмме С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина около 80 % объектов из нашего банка данных локализованы в области составов, отнесенной этими специалистами к категории

«свойственных рифтогенным обстановкам». Это хорошо соотносится и с их оценкой «степени соответствия» для образцов из рифтогенных обстановок (79–85 %) [Verma, Armstrong-Altrin, 2013] для диаграммы с $63 < (\text{SiO}_2)_{\text{adj}} < 95$ мас. %.

Таким образом, в настоящее время наиболее приемлемой дискриминантной диаграммой для отнесения тех или иных песчаниковых ассоциаций к категории синрифтовых является диаграмма С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина. Другие диаграммы не позволяют сделать это корректно, по всей видимости, вследствие ошибочно выбранных «поисковых предпочтений».

Общий же вывод из проведенных исследований таков – в настоящее время на основе данных о валовом химическом составе песчаников мы можем с достаточно высокой степенью вероятности судить о их принадлежности к периостроводужным/приостроводужным бассейнам осадконакопления, бассейнам, сформированным на пассивных континентальных окраинах, и рифтогенным внутрикратонным структурам. Корректно ли последнее для данных о валовом химическом составе глинистых пород, и может ли быть разграничено по литохимическим данным осадочное выполнение разных типов рифтов – это вопросы будущего.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны С.Г. Ковалеву за содействие в проведении исследований, а также В.Н. Пучкову и О.Ю. Мельничуку за консультации по ряду вопросов. На завершающей стадии работы над рукописью весьма ценными были пожелания и советы рецензентов М.И. Тучковой и А.К. Худолея, которые были приняты нами с благодарностью. Иллюстрации к статье выполнены Н.С. Глушковой. Сбор, обработка и интерпретация литохимических данных для песчаников айской и машакской свит, а также аршинской серии Южного Урала проведены при поддержке РФФИ (грант 16-17-10192). Обобщение данных по другим объектам выполнено в рамках госзадания ИГГ УрО РАН (тема № 1201357932). Эти работы продолжают наши исследования по анализу валового химического состава псаммитов различных геодинамических обстановок, начатые публикациями [Maslov et al., 2013, 2015, 2016a].

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P., 2005. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sedimentary Geology* 177 (1–2), 115–129. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.02.004>.

- Bakkiaraj D., Nagendra R., Nagarajan R., Armstrong-Altrin J.S., 2010. Geochemistry of sandstones from the Upper Cretaceous Sillakkudi Formation, Cauvery Basin, Southern India: implication for provenance. *Journal of the Geological Society of India* 76 (5), 453–467. <https://doi.org/10.1007/s12594-010-0128-3>.
- Bhatia M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *Journal of Geology* 91 (6), 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>.
- Bhatia M.R., Crook K.A.W., 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92 (2), 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>.
- Caracciolo L., von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Critelli S., Manetti P., Marchev P., 2012. Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene–Oligocene sandstones of the Western Thrace basin, Greece and Bulgaria. *Journal of Sedimentary Research* 82 (7), 482–498. <https://doi.org/10.2110/jsr.2012.31>.
- Chamov N.P., 2016. The Structure and Development of the Mid-Russian–White Sea Province in the Neoproterozoic. GEOS, Moscow, 233 p. (in Russian) [Чамов Н.П. Структура и развитие Среднерусско-Беломорской провинции в неопротерозое. М.: ГЕОС, 2016. 233 с.].
- Cohen A.S., 1990. Tectono-stratigraphic model for sedimentation in Lake Tanganyika, Africa. In: B.J. Katz (Ed.), Lacustrine basin exploration: case studies and modern analogs. American Association of Petroleum Geologists Memoir, vol. 50, p. 137–150.
- Condie K.C., Lee D., Farmer G.L., 2001. Tectonic setting and provenance of the Neoproterozoic Uinta Mountain and Big Cottonwood groups, northern Utah: constraints from geochemistry, Nd isotopes, and detrital modes. *Sedimentary Geology* 141–142, 443–464. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00086-0).
- Corti G., 2009. Continental rift evolution: from rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa. *Earth-Science Reviews* 96 (1–2), 1–53. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.06.005>.
- Crossley R., 1984. Controls of sedimentation in the Malawi Rift Valley, Central Africa. *Sedimentary Geology* 40 (1–3), 33–50. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(84\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0037-0738(84)90038-1).
- Cullers R.L., Berendsen P., 1998. The provenance and chemical variation of sandstones associated with the Mid-Continent Rift System, U.S.A. *European Journal of Mineralogy* 10 (5), 987–1002. <https://doi.org/10.1127/ejm/10/5/0987>.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N., 2002. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uig group, southeastern Russia. *Precambrian Research* 117 (3–4), 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00079-7).
- Das B.K., Al-Mikhlaifi A.S., Kaur P., 2006. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (6), 649–668. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.01.005>.
- Deru X., Xuexiang G., Pengchun L., Guanghao C., Bin X., Bachlinski R., Zhuanli H., Gonggu F., 2007. Mesoproterozoic–Neoproterozoic transition: Geochemistry, provenance and tectonic setting of clastic sedimentary rocks on the SE margin of the Yangtze block, South China. *Journal of Asian Earth Sciences* 29 (5–6), 637–650. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2006.04.006>.
- Descourvieres C., Douglas G., Leyland L., Hartog N., Prommer H., 2011. Geochemical reconstruction of the provenance, weathering and deposition of detrital-dominated sediments in the Perth Basin: The Cretaceous Leederville Formation, south-west Australia. *Sedimentary Geology* 236 (1–2), 62–76. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.12.006>.
- Dostal J., Keppie J.D., 2009. Geochemistry of low-grade clastic rocks in the Acatlán Complex of southern Mexico: Evidence for local provenance in felsic–intermediate igneous rocks. *Sedimentary Geology* 222 (3–4), 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.09.011>.
- Dupuis C., Hebert R., Dubois-Cote V., Guilmette C., Wang C.S., Li Z.J., 2006. Geochemistry of sedimentary rocks from melange and flysch units south of the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences* 26 (5), 489–508. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2004.11.002>.
- El-Rahman Y.A., Polat A., Fryer B.J., Dilek Y., El-Sharkawy M., Sakran S., 2010. The provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Um Hassa Greywacke Member, Wadi Hammamat area, Egypt: Evidence from petrography and geochemistry. *Journal of African Earth Sciences* 58 (2), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2010.02.010>.
- Elzien S.M., Farah A.A., Alhaj A.B., Mohamed A.A., Al-Imam O.A.O., Hussein A.H., Khalid M.K., Hamed B.O., Alhaj A.B., 2014. Geochemistry of Merkhayat sandstones, Omdurman Formation, Sudan: Implication of depositional environment, provenance and tectonic setting. *International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences* 2 (3), 10–15.
- Etemad-Saeed N., Hosseini-Barzi M., Armstrong-Altrin J.S., 2011. Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidences for provenance of the Lower Cambrian Lalun Formation, Posht-e-badam block, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences* 61 (2), 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.06.003>.
- Evans A.L., 1990. Miocene sandstone provenance relations in the Gulf of Suez: insights into synrift unroofing and uplift history. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 74 (9), 1386–1400. <https://doi.org/10.1306/OC9B24D9-1710-11D7-8645000102C1865D>.

- Fatima S., Khan M.S., 2012. Petrographic and geochemical characteristics of Mesoproterozoic Kumbalgarh clastic rocks, NW Indian shield: implications for provenance, tectonic setting, and crustal evolution. *International Geology Review* 54 (10), 1113–1144. <https://doi.org/10.1080/00206814.2011.623032>.
- Garzanti E., Vezzoli G., Ando S., Castiglioni G., 2001. Petrology of rifted-margin sand (Red Sea and Gulf of Aden, Yemen). *The Journal of Geology* 109 (3), 277–297. <https://doi.org/10.1086/319973>.
- Gawthorpe R.L., Leeder M.R., 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research* 12 (3–4), 195–218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2000.00121.x>.
- González-Álvarez I.J. 2005. Geochemical Study of the Mesoproterozoic Belt-Purcell Supergroup, Western North America: Implications for Provenance, Weathering and Diagenesis. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Department of Earth Sciences University of Saskatchewan. Saskatoon, 243 p.
- Grachev A.F., 1987. Rift Zones of the Earth. Nedra, Leningrad, 247 p. (in Russian) [Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. Л.: Недра, 1987. 247 с.].
- Huntsman-Mapila P., Kampunzu A.B., Vink B., Ringrose S., 2005. Cryptic indicators of provenance from the geochemistry of the Okavango Delta sediments, Botswana. *Sedimentary Geology* 174 (1–2), 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.11.001>.
- Illies J.H., Greiner G., 1978. Rhinegraben and the Alpine system. *Geological Society of America Bulletin* 89 (5), 770–782. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<770:RATAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<770:RATAS>2.0.CO;2).
- Ingersoll R.V., Cavazza W., Baldrige W.S., Shaficullah M., 1990. Cenozoic sedimentation and paleotectonics of north-central New Mexico: Implication for initiation and evolution of the Rio Grande rift. *Geological Society of America Bulletin* 102 (9), 1280–1296. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102<1280:CSAPON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<1280:CSAPON>2.3.CO;2).
- Ivanov S.N., Samygin S.G. (Eds.), 1986. Formation of the Earth's Crust of the Urals. Nauka, Moscow, 248 p. (in Russian) [Формирование земной коры Урала / Ред. С.Н. Иванов, С.Г. Самыгин. М.: Наука, 1986. 248 с.].
- Kaz'min V.G., 1987. Rift Structures of East Africa – the Breakup of the Continent and the Incipience of the Ocean. Nauka, Moscow, 205 p. (in Russian) [Казьмин В.Г. Рифтовые структуры Восточной Африки – раскол континента и зарождение океана. М.: Наука, 1987. 205 с.].
- Khudoley A.K., Rainbird R.H., Stem R.A., Kropachev A.P., Heaman L.M., Zanin A.M., Podkovyrov V.N., Belova V.N., Sukhorukov V.I., 2001. Sedimentary Evolution of the Riphean–Vendian Basin of Southeastern Siberia. *Precambrian Research* 111 (1–4), 129–163. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00159-0).
- Kroonenberg S.B., 1994. Effects of provenance, sorting and weathering on the geochemistry of fluvial sands from different tectonic and climatic environments. In: T. Nishiyama, G.W. Fisher, F. Kumon, K.M. Yu, Y. Watanbe, A. Motamed (Eds.), Proceedings of the 29th International Geological Congress, Part A. VSP, Utrecht, p. 69–81.
- Lambiase J.J., 1990. A model for tectonic control of lacustrine stratigraphic sequences in continental rift basins. In: B.J. Katz (Ed.), Lacustrine basin exploration: case studies and modern analogs. American Association of Petroleum Geologists Memoir, vol. 50, p. 265–276.
- Lambiase J.J., Bosworth W., 1995. Structural controls on sedimentation in continental rifts. In: J.J. Lambiase (Ed.), Hydrocarbon Habitat in rift basins. Geological Society, London, Special Publications, vol. 80, p. 117–144. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.080.01.06>.
- Leonov Yu.G., Volozh Yu.A. (Eds.), 2004. Sedimentary Basins: Methods of Research, Structure and Evolution. Nauchnyi Mir, Moscow, 526 p. (in Russian) [Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Ред. Ю.Г. Леонов, Ю.А. Волож. М.: Научный мир, 2004. 526 с.].
- Logatchev N.A., 1977. Volcanogenic and Sedimentary Formations of the Rift Zones of East Africa. Nauka, Moscow, 183 p. (in Russian) [Логачев Н.А. Вулканогенные и осадочные формации рифтовых зон Восточной Африки. М.: Наука, 1977. 183 с.].
- Maslov A.V., 1994. Sedimentary Complexes in the Riftogenic Structures. Yekaterinburg: IGG, Urals Branch of RAS, 162 p. (in Russian) [Маслов А.В. Осадочные комплексы в разрезах рифтогенных структур. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1994. 162 с.].
- Maslov A.V., Gareev E.Z., 1994. The main features of the petrochemical evolution of the sandstones of the Riphean stratotype in the Southern Urals. *Litologiya i Poleznye Iskopayemyye (Lithology and Mineral Resources)* (4), 119–127. (in Russian) [Маслов А.В., Гареев Э.З. Основные черты петрохимической эволюции песчаников стратотипического разреза рифея на Южном Урале // Литология и полезные ископаемые. 1994. № 4. С. 119–127].
- Maslov A.V., Gareev E.Z., 1996. Origin of Lower Proterozoic sandstone associations of the Southern Urals: major element and petrographic evidence. *Geochemistry International* 34 (3), 249–258.
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Isherskaya M.V., 2012a. «Standard» discriminant paleogeodynamic diagrams and platform sandstone associations. *Otechestvennaya Geologiya (Russian Geology)* (3), 55–65 (in Russian) [Маслов А.В., Гареев Э.З., Ишерская М.В. «Стандартные» дискриминантные палеогеодинамические диаграммы и платформенные песчаниковые ассоциации // Отечественная геология. 2012. № 3. С. 55–65].
- Maslov A.V., Isherskaya M.V., 2002. Riphean sedimentary sequences of the eastern and northeastern margins of the Eastern European craton. *Russian Journal of Earth Sciences* 4 (4), 271–276. <http://rjes.wdcb.ru/v04/tje02097/tje02097.htm>.
- Maslov A.V., Kovalev S.G., Puchkov V.N., Sergeeva N.D., 2018. The Riphean Arsha group of the Southern Urals: on the problem of a geodynamic nature of its rock associations. *Doklady Earth Sciences* (in press).

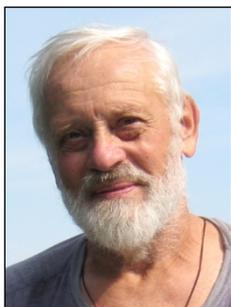
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z., Anfimov L.V., 2001. Riphean of the Western Slope of the Southern Urals (Classical Cross-Sections, Sedimento- and Lithogenesis, Minerageny, Geological Nature Monuments). Vol. I. IGG, Urals Branch of RAS, Yekaterinburg, 351 p. (in Russian) [Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерация, геологические памятники природы). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. Т. I. 351 с.].
- Maslov A.V., Mizens G.A., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sorokin A.A., Smirnova Yu.N., Sokur T.M., 2013. Synorogenic psammites: major lithochemical features. *Lithology and Mineral Resources* 48 (1), 74–97. <https://doi.org/10.1134/S0024490212050045>.
- Maslov A.V., Mizens G.A., Podkovyrov V.N., Nozhkin A.D., Sokur T.M., Malinovskii A.I., Sorokin A.A., Smirnova Yu.N., Gareev E.Z., Dmitrieva N.V., Krupenin M.T., Letnikova E.F., 2015. Synorogenic clay rocks: specifics of bulk composition and paleotectonics. *Geochemistry International* 53 (6), 510–533. <https://doi.org/10.1134/S0016702915060075>.
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z. 2012b. Evolution of the paleogeodynamic settings of the formation of the Lower and Middle Riphean sedimentary sequences of the Uchur–Maya region and the Bashkir meganticlinorium. *Russian Journal of Pacific Geology* 6 (5), 382–394. <https://doi.org/10.1134/S1819714012050041>.
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Kotova L.N., 2016a. Chemical composition of sandstones and paleogeodynamic reconstructions. *Litosfera (Lithosphere)* (6), 33–55 (in Russian) [Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Котова Л.Н. Валовый химический состав песчаников и палеогеодинамические реконструкции // *Литосфера*. 2016. № 6. С. 33–55].
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Mizens G.A., Nozhkin A.D., Fazliakhmetov A.M., Malinovskiy A.I., Khudoley A.K., Kotova L.N., Kuptsova A.V., Gareev E.Z., Zainullin R.I. 2016b. Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison. *Geochemistry International* 54 (7), 569–583. <https://doi.org/10.1134/S0016702916060033>.
- Maynard J.B., Valloni R., Ho Shing Ju, 1982. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin. In: J.K. Leggett (Ed.), *Trench-forearc geology: sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 10, p. 551–561. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1982.010.01.36>.
- McCann T., 1998. Sandstone composition and provenance of the Rotliegendes of the NE German basin. *Sedimentary Geology* 116 (3–4), 177–198. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(97\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(97)00106-1).
- Milanovsky E.E., 1976. Continental Rift Zones. Nedra, Moscow, 280 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 280 с.].
- Milanovsky E.E., 1983. Riftogenesis in the history of the Earth (rifting on ancient platforms). Nedra, Moscow, 280 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли (рифтогенез на древних платформах). М.: Недра, 1983. 280 с.].
- Morley C.K., 1989. Extension, detachments, and sedimentation in continental rifts (with particular reference to East Africa). *Tectonics* 8 (6), 1175–1192. <https://doi.org/10.1029/TC008i006p01175>.
- Morley C.K. (Ed.), 1999. *Geoscience of Rift Systems – Evolution of East Africa*. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, vol. 44, 250 p.
- Murphy J.B., Keppie J.D., Dostal J., Waldron J.W.F., Cude M.P., 1996. Geochemical and isotopic characteristics of Early Silurian clastic sequences in Antigonish Highlands, Nova Scotia, Canada: constraints on the accretion of Avalonia in the Appalachian–Caledonide Orogen. *Canadian Journal of Earth Sciences* 33 (3), 379–388. <https://doi.org/10.1139/e96-028>.
- Olsen K.H. (Ed.), 1995. *Continental rifts: Evolution, Structure, Tectonics*. Elsevier, Amsterdam, 465 p.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R., 1972. *Sand and Sandstone*. Springer, New York, 553 p. [Русский перевод: Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 534 с.].
- Postma G., Drinia H., 1993. Architecture and sedimentary facies evolution of a marine, expanding half-graben (Crete, Late Miocene). *Basin Research* 5 (2), 103–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1993.tb00060.x>.
- Puchkov V.N., 2000. Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. GILEM Publishing House, Ufa, 146 p. (in Russian) [Лучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.].
- Puchkov V.N., 2010. *Geology of the Urals and Cis-Urals (Actual Problems of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)*. DesignPoligraphService Publishing House, Ufa, 280 p. (in Russian) [Лучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: Дизайн-ПолиграфСервис, 2010. 280 с.].
- Puchkov V.N., 2016. Relationship between plume and plate tectonics. *Geotectonics* 50 (4), 425–438. <https://doi.org/10.1134/S0016852116040075>.
- Rasskazov S.V., Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., Kozhevnikov V.M., San'kov V.A., 2010. Academician N.A. Logatchev and his scientific school: contribution to studies of the Cenozoic continental rifting. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (3), 209–224 (in Russian) [Рассказов С.В., Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Кожевников В.М., Саньков В.А. Академик Н.А. Логачев и его научная школа: вклад в изучение кайнозойского континентального рифтогенеза // *Геодинамика и тектонофизика*. 2010. Т. 1. № 3. Р. 209–224]. <https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0017>.
- Raza M., Dayal A.M., Khan A., Bhardwaj V.R., Rais S., 2010. Geochemistry of lower Vindhyan clastic sedimentary rocks of Northwestern Indian shield: Implications for composition and weathering history of Proterozoic continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences* 39 (1–2), 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.02.007>.
- Razvalyayev A.V., 1988. *Continental Rifting and Its Prehistory*. Nedra, Moscow, 189 p. (in Russian) [Развалыев А.В. Континентальный рифтогенез и его предыстория. М.: Недра, 1988. 189 с.].

- Renaut R.W., Ashley G.M. (Eds.), 2002. Sedimentation in Continental Rifts. SEPM Special Publication. No. 73, 334 p.
- Rosendahl B.R., 1987. Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 15, 445–503. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.15.050187.002305>.
- Roser B.P., Korsch R.J., 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology* 94 (5), 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>.
- Roy D.K., Roser B.P., 2012. Geochemistry of Tertiary sequence in Shahbajpur-1 well, Hatia trough, Bengal basin, Bangladesh: provenance, source weathering and province affinity. *Journal of Life and Earth Science* 7, 1–13. <https://doi.org/10.3329/jles.v7i0.20115>.
- Ryan K.M., Williams D.M., 2007. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chemical Geology* 242 (1–2), 103–125. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.03.013>.
- Rykus M.V., Snachev V.I., Nasibullin R.A., Rykus N.G., Savel'ev D.E., 2002. Sedimentation, Magmatism and Ore-Bearing Potential of the Northern Part of the Uraltau Zone. IG USC of RAS, Ufa, 266 p. (in Russian) [Рыкус М.В., Сначёв В.И., Насибуллин Р.А., Рыкус Н.Г., Савельев Д.Е. Осадконакопление, магматизм и рудоносность северной части зоны Уралтау. Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2002. 266 с.].
- Schlishe R.W., 1991. Half-graben basin filling models: new constraints on continental extensional basin development. *Basin Research* 3 (3), 123–141. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1991.tb00123.x>.
- Sengör A.M.C., 1995. Sedimentation and tectonics of fossil rifts. In: C.J. Busby, R.-V. Ingersoll (Eds.), *Tectonics of sedimentary basins*. Blackwell, Oxford, p. 53–117.
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A., 2001. Rifts of the world. In: R.E. Ernst, K.L. Buchan (Eds.), *Mantle plumes: their identification through time*. Geological Society of America Special Papers, vol. 352, p. 389–482. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.389>.
- Surkov V.S., Korobeinikov V.P., Grishin M.P., 1993. Development of the oil and gas basins of Siberia in the Neogäikum. *Otechestvennaya geologiya (Russian Geology)* (6), 39–45 (in Russian) [Сурков В.С., Коробейников В.П., Гришин М.П. Развитие нефтегазоносных бассейнов Сибири в неогее // *Отечественная геология*. 1993. № 6. С. 39–45].
- Svendsen J., Friis H., Stollhofen H., Hartley N., 2007. Facies discrimination in a mixed fluvio-eolian setting using elemental whole-rock geochemistry – applications for reservoir characterization. *Journal of Sedimentary Research* 77 (1), 23–33. <https://doi.org/10.2110/jsr.2007.008>.
- Vdačný M., Vozárová A., Vozár J., 2013. Geochemistry of the Permian sandstones from the Malužiná Formation in the Malé Karpaty Mts (Hronic Unit, Western Carpathians, Slovakia): implications for source-area weathering, provenance and tectonic setting. *Geologica Carpathica* 64 (1), 23–38. <https://doi.org/10.2478/geoca-2013-0002>.
- Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S., 2013. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology* 355, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>.
- Wang B.-Q., Wang W., Zhou M.-F., 2013. Provenance and tectonic setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terrane, Tibet. *Geoscience Frontiers* 4 (6), 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.02.007>.
- Withjack M.O., Schlishe R.W., Olsen P.E., 1998. Diachronous rifting, drifting, and inversion on the passive margin of central eastern North America – an analog for other passive margins. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 82 (5A), 817–835.
- Zaid S.M., 2013. Genesis of the Nukhul sandstones, west central Sinai, Egypt. *Journal of Applied Sciences Research* 9 (1), 375–392.
- Ziegler P.A., 1994. Cenozoic rift system of western and central Europe: an overview. *Geologie en Mijnbouw* 73 (2–4), 99–127.



Андрей Викторович Маслов, докт. геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия
Институт геологии УНЦ РАН
450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, Россия
✉ e-mail: amas2004@mail.ru

Andrei V. Maslov, Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS, Head of Laboratory A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS
15 Akademik Vonsovsky street, Ekaterinburg 620016, Russia
Institute of Geology, Ufa Science Centre of RAS
16/2 Karl Marx street, Ufa 450077, Russia
✉ e-mail: amas2004@mail.ru



Виктор Николаевич Подковыров, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией
Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия
e-mail: vpodk@mail.ru

Victor N. Podkovyrov, Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
Institute of Precambrian Geology and Geochronology of RAS
2 Makarov Embankment, St. Petersburg 199034, Russia
e-mail: vpodk@mail.ru



Эмир Зуфарович Гареев, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт геологии УНЦ РАН
450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, Россия
e-mail: emirgareev2015@yandex.ru

Emir Z. Gareev, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of Geology, Ufa Science Centre of RAS
16/2 Karl Marx street, Ufa 450077, Russia
e-mail: emirgareev2015@yandex.ru



Нина Дмитриевна Сергеева, канд. геол.-мин. наук, в.н.с.
Институт геологии УНЦ РАН
450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2, Россия
e-mail: riphay@ufaras.ru

Nina D. Sergeeva, Candidate of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
Institute of Geology, Ufa Science Centre of RAS
16/2 Karl Marx street, Ufa 450077, Russia
e-mail: riphay@ufaras.ru