

Синрифтовые осадочные образования основания эталонного разреза рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика)*

А. В. Маслов^{1, 2}, Э. З. Гареев², В. Н. Подковыров³, Л. Н. Котова³

¹ Институт геологии и геохимии УрО РАН,
Российская Федерация, 620016, Екатеринбург, ул. Вонсовского, 15

² Институт геологии УФИЦ РАН,
Российская Федерация, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

Для цитирования: Маслов А. В., Гареев Э. З., Подковыров В. Н., Котова Л. Н. Синрифтовые осадочные образования основания эталонного разреза рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 1. С. 36–55. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.103>

Изучение валового химического состава песчаников айской свиты бурзянской серии Южного Урала (тип нижнего рифея Северной Евразии) позволило сделать вывод, что в их составе присутствуют продукты разрушения и пород кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП), и осадочных/метаосадочных пород ее платформенного проточехла. В составе песчаников и ассоциирующих с ними глинистых сланцев, по всей видимости, имеется заметная доля литогенного (неоднократно переотложенного) материала. Глинистые породы айской свиты не содержат так называемой камуфлированной пирокластики, и, следовательно, процессы их накопления не сопровождались размывом вулканических пород или синхронной эксплозивной деятельностью. Для тонкозернистых терригенных образований присущи в целом невысокие значения индекса химического изменения (Chemical Index of Alteration — CIA). Это позволяет предполагать, что они формировались при относительно выраженной тектонической активности в областях размыва, возможно, нивелировавшей воздействие процессов химического выветривания на эти образования. Сравнение валовых химических составов терригенных пород айской свиты с составом среднего протерозойского кратонного песчаника (ПКП), среднего постархейского австралийского сланца (Post Archean Australian Average Shale — PAAS) и ряда других референтных геологических объектов показало, что для этих составов характерны достаточно широкие вариации содержания основных породообразующих оксидов (заметная химическая незрелость состава), что также можно рассматривать как отражение накопления их в достаточно активных тектонических обстановках. Анализ валового химического состава песчаников и глинистых пород айской свиты дает основания предполагать, что источниками кластики для них выступали и кислые магматические породы, и осадочные и/или метаосадочные образования с повышенным количеством кварца; это согласуется с результатами предшествующих минералого-петрографических исследований. Положение индивидуальных точек состава песчаников и глинистых пород айской

* Работа с аналитическими материалами проведена В. Н. Подковыровым и Л. Н. Котовой в рамках темы НИР № 0153-2018-0011.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

свиты на диаграмме DF1–DF2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) не позволяет сделать определенного вывода об их палеогеодинамической природе, так как одна часть точек тяготеет к области составов, характерной для осадочных пород, сформировавшихся в рифтогенных обстановках, а другая — к области составов, типичных для коллизионных обстановок. Более определенно в пользу рифтогенной/синрифтовой природы терригенных пород айской свиты свидетельствует распределение на указанной диаграмме точек их средних составов.

Ключевые слова: Южный Урал, нижний рифей, айская свита, песчаники, глинистые породы, литохимия.

Введение

В верхнедокембрийско-палеозойской последовательности Уральского складчатого пояса несколько раз повторяются сходные по палеогеодинамическим обстановкам формирования крупные комплексы отложений: рифтогенные (базальные уровни бурзянской и юрматинской серий рифея, верхнекембрийско-нижнеордовикские образования), молассовые (верхневендские и верхнепермско-триасовые отложения) и др. В большинстве своем они в настоящее время достаточно хорошо изучены с позиций стратиграфии, литологии, петрографии, петрологии, минералогии и т. п., однако в том, что касается литохимических особенностей слагающих их осадочных пород, многие вопросы еще требуют доработки. Связано это с тем, что валовый химический состав осадочных образований многие годы не воспринимался исследователями как сколько-нибудь информативный, в отличие от той же характеристики для магматических и вулканических пород.

Из всех макрорегионов Уральского складчатого пояса в этом отношении в наибольшей степени повезло Южному Уралу, так как в пределах его западного склона в Башкирском мегантиклинории расположен эталонный разрез рифея (Стратотип..., 1983; Semikhatov et al., 2015, и др.), объединяющий разнообразные осадочные последовательности суммарной мощностью до 12–15 км, на примере которых в 1980–1990-х гг. был выполнен крупный комплекс региональных геохимических исследований (Гареев, 1982; 1986–1989; 1997; 1998, и др.). Полученные при этом материалы актуальны до настоящего времени и позволяют решать самые разнообразные задачи (Маслов и Гареев, 1992, 1994; Маслов и др., 2003а; 2003b; 2007; Maslov et al., 2003–2006; 2008; 2013; 2016а; 2016b; Nozhkin et al., 2009, и др.).

Данная работа призвана систематизировать общие литохимические особенности наиболее древней синрифтовой/рифтогенной осадочной ассоциации Башкирского мегантиклинория — айской свиты, возраст основных вулканитов в разрезах которой в настоящее время оценивается в 1752 ± 11 млн лет (определен методом U–Pb-датирования при помощи вторично-ионной масс-спектрометрии — SIMS¹) (Краснобаев et al., 2013), соответственно современная оценка нижней границы рифея составляет ~1750 млн лет (Semikhatov et al., 2015).

¹ SIMS — Secondary Ion Mass Spectrometry.

Методика исследования и фактический материал

В основу статьи положена выборка валовых химических анализов (ППП² менее 5%) песчаников (64 анализа) и глинистых сланцев (54 анализа) айской свиты, составленная на основе сведений из банка литохимических данных PrecSed³ и коллекции данных Э.З.Гареева (ИГ БФ АН СССР/УНЦ РАН, Уфа). Эти материалы получены в разные годы методами классической «мокрой химии» и рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), в том числе в ИГ БФ АН СССР/УНЦ РАН и Институте геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург). Средние арифметические, минимальные и максимальные содержания основных породообразующих оксидов в песчаниках и глинистых породах исследованной выборки приведены в таблице.

Таблица. Средние, минимальные и максимальные содержания основных породообразующих оксидов в песчаниках и глинистых сланцах айской свиты и их соотношение с составом ряда референтных геологических объектов, масс. %

Компонент	Песчаники	Глинистые сланцы	А	Б	В
SiO ₂	<u>78,47±8,67</u>	<u>65,06±2,36</u>	<u>0,85±0,09</u>	<u>1,07±0,12</u>	<u>1,04±0,05</u>
	62,88–94,66	59,38–70,00	0,68–1,03	0,86–1,29	0,95–1,18
TiO ₂	<u>0,38±0,20</u>	<u>0,72±0,15</u>	<u>2,26±1,17</u>	<u>0,65±0,34</u>	<u>0,72±0,15</u>
	0,07–0,82	0,45–1,12	0,41–4,82	0,12–1,39	0,45–1,12
Al ₂ O ₃	<u>9,66±3,70</u>	<u>16,20±1,22</u>	<u>2,5±0,96</u>	<u>0,89±0,34</u>	<u>0,85±0,07</u>
	2,04–16,46	13,44–19,63	0,53–4,25	0,19–1,52	0,67–1,04
Fe ₂ O ₃ общ	<u>2,26±1,37</u>	<u>4,74±1,44</u>	<u>1,71±1,04</u>	<u>0,64±0,39</u>	<u>0,66±0,20</u>
	0,31–5,42	1,42–7,61	0,23–4,11	0,09–1,54	0,20–1,06
MnO	<u>0,02±0,02</u>	<u>0,03±0,02</u>	—	—	<u>0,24±0,14</u>
	0,01–0,10	0,01–0,08			0,05–0,68
MgO	<u>1,01±1,06</u>	<u>2,31±1,14</u>	<u>1,84±1,92</u>	<u>0,52±0,54</u>	<u>1,03±0,52</u>
	0,01–5,44	0,20–5,80	0,02–9,89	0,01–2,78	0,09–2,64
CaO	<u>0,67±0,96</u>	<u>0,64±0,53</u>	<u>1,50±2,14</u>	<u>0,45±0,65</u>	<u>0,49±0,41</u>
	0,01–4,33	0,11–2,52	0,02–9,62	0,01–2,93	0,08–1,94
Na ₂ O	<u>1,25±1,07</u>	<u>1,91±0,66</u>	<u>2,45±2,10</u>	<u>1,62±1,39</u>	<u>1,63±0,58</u>
	0,07–3,55	0,47–4,05	0,14–6,95	0,09–4,61	0,39–3,38
K ₂ O	<u>4,56±1,93</u>	<u>4,97±1,35</u>	<u>5,18±2,19</u>	<u>1,12±0,48</u>	<u>1,32±0,38</u>
	0,50–8,85	2,71–8,85	0,57–10,06	0,12–2,18	0,70–2,39
P ₂ O ₅	<u>0,12±0,07</u>	<u>0,17±0,07</u>	<u>3,91±2,28</u>	<u>1,17±0,68</u>	<u>1,09±0,42</u>
	0,01–0,36	0,03–0,31	0,33–12,07	0,10–3,62	0,19–1,95
ППП	<u>1,26±1,07</u>	<u>3,25±0,68</u>	—	—	—
	0,10–4,90	1,85–4,86			

Примечания. 1. Числитель — среднее арифметическое и стандартное отклонение, знаменатель — минимальное и максимальное значения. 2. А — состав песчаников нормирован на ПКП; Б — состав песчаников нормирован на состав алевропесчаных пород нижнего рифея ВЕП; В — состав глинистых сланцев нормирован на состав РААС. 3. Прочерк — нет данных.

Эталонный разрез рифея Башкирского мегантиклинория объединяет три седиментационные серии: 1) бурзянскую, 2) юрматинскую и 3) каратаускую (Стратотип..., 1983).

² ППП — потери при прокаливании.

³ Данные для банка собрали А. В. Сочава и В. Н. Подковыров (ИГГД РАН, Санкт-Петербург).

Бурзянская серия (типичное подразделение нижнего рифея) включает в себя в северо-восточных районах мегантиклинория айскую, саткинскую и бакальскую свиты (рис. 1), а в центральной его части аналогами последних являются соответственно большеинзерская, суранская и юшинская свиты. В нижней части айской свиты (мощность 1700–2500 м) преобладают песчаники с прослоями гравелитов и конгломератов и покровами metabазальтов, а в верхней — низкоуглеродистые⁴ глинистые сланцы с прослоями песчаников и алевролитов. По петрографическому составу песчаники данного уровня типа рифея отвечают в основном аркозам, граувакковым аркозам, субаркозам и полевошпат-кварцевым разностям (по классификации В. Д. Шутова).

Саткинская свита (до 3000–3500 м) сложена преимущественно доломитами, в том числе строматолитовыми; в средней ее части присутствует 180–200-метровая толща низкоуглеродистых глинистых сланцев с прослоями доломитов и алевролитов.

Бакальская свита (1500–1650 м) представлена в нижней части низкоуглеродистыми глинистыми сланцами с прослоями доломитов и алевролитов, а в верхней — объединяет несколько алюмосиликокластических и карбонатных пачек.

Юрматинская серия (типичное подразделение среднего рифея) включает в себя четыре свиты: 1) машакскую, 2) зигальгинскую, 3) зигазино-комаровскую и 4) авзянскую.

Машакская свита (1600–3000 м) представлена песчаниками, конгломератами и алевролитами с подчиненными им прослоями и пакетами глинистых сланцев. В нижней и средней ее частях наблюдаются многочисленные силы, потоки и покровы долеритов и экструзивные тела дацитов. Это вторая синрифтовая ассоциация в эталонном разрезе рифея.

Зигальгинская свита (500–700 м) слагается преимущественно кварцевыми песчаниками.

Зигазино-комаровская свита (750–1500 м) объединяет пачки неравномерного переслаивания глинистых сланцев, алевролитов и песчаников.

Авзянская свита (1600–2300 м) представлена несколькими карбонатными и терригенными толщами.

Каратауская серия (тип верхнего рифея) объединяет ряд алюмосиликокластических (зильмердакская, инзерская, криволукская) и карбонатных (катавская, миньярская, укская) свит. Максимальная мощность отложений серии оценивается в 5500–6000 м. Данный стратон не содержит синрифтовых ассоциаций, подробная характеристика состава и строения разрезов всех литостратиграфических подразделений каратауской серии приведена в работах (Раабен, 1975; Козлов, 1982; Стратотип..., 1983; Маслов, 1988; Маслов и др., 2002), и здесь на ней мы не останавливаемся.

В 1960-х — начале 1970-х гг. верхнедокембрийские осадочные последовательности западного склона Южного Урала рассматривались как типичные миогеосинклинальные образования (Смирнов, 1964; Гарань, 1969; Романов, 1973; Беккер, 1988 и др.), венчающиеся вендской молассой (ашинская серия).

⁴ В соответствии с работой (Юдович, Кетрис, 1988) к низкоуглеродистым глинистым сланцам относятся черные сланцы с содержанием C_{org} от 1 до 3 масс. %.

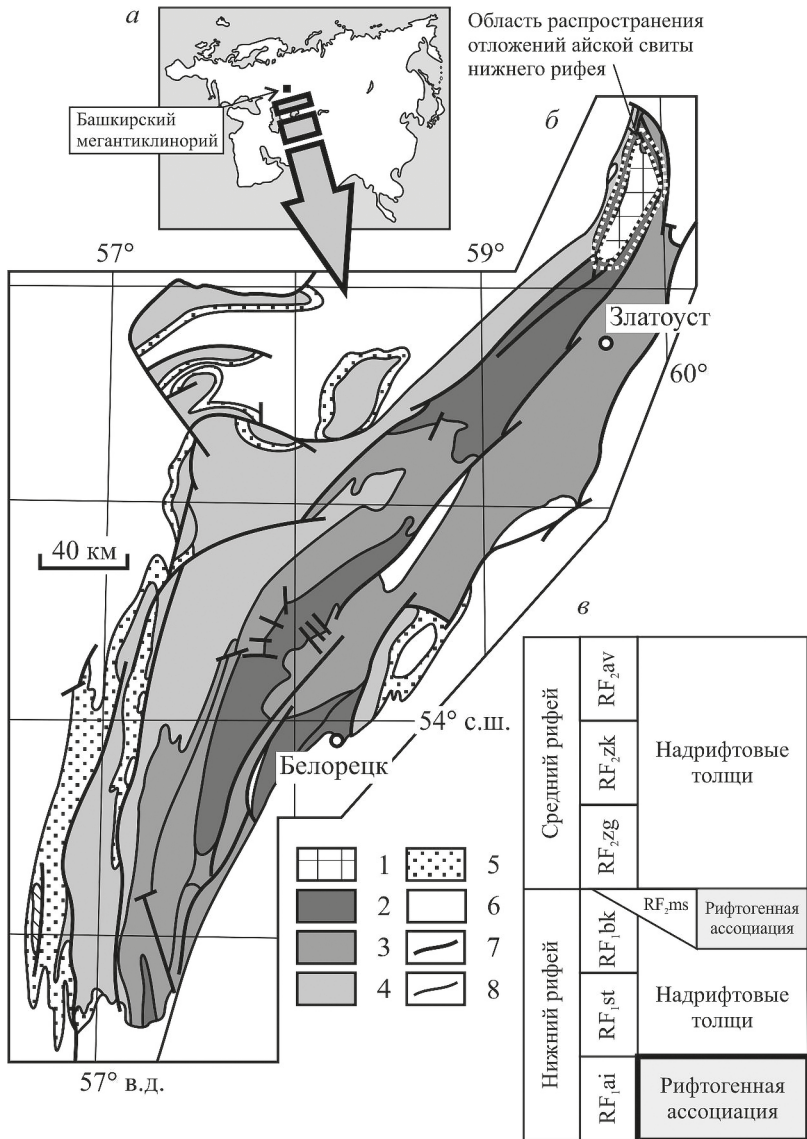


Рис. 1. Обзорная схема (а), геологическая карта (б) Башкирского мегантиклинория и распределение различных осадочных ассоциаций в разрезах нижнего и среднего рифея (в)

1 — дорифейские кристаллические образования; 2 — породы нижнего рифея (бурзянская серия); 3 — породы среднего рифея (юрматинская серия); 4 — отложения верхнего рифея (каратауская серия); 5 — вендские осадочные образования (ашинская серия); 6 — палеозойские отложения; 7 — тектонические нарушения; 8 — геологические границы.

Свиты: RF₁ai — айская; RF₁st — саткинская; RF₁bk — бакальская; RF₂ms — машакская; RF₂zg — зигальгинская; RF₂zk — зигазино-комаровская; RF₂av — авзянская.

В начале 1980-х гг. появились представления о рифтогенно-депрессивной природе рифейско-вендских отложений Башкирского мегантиклинория (Иванов, 1980, 1981; Формирование..., 1986; Парначев, 1988, и др.).

В последние годы все более широкое распространение получает точка зрения о том, что в раннем и среднем рифее на указанной территории и в прилегающих к ней районах ВЕП существовали относительно небольшие эпикратонные бассейны, а для позднего рифея можно реконструировать латеральный ряд формаций, сходный с рядами формаций, присущими океаническим бассейнам (Маслов и др., 2002; Пучков, 2010, и др.).

Процессы внутриконтинентального рифтогенеза начала раннего и среднего рифея, связанные с несколькими субглобальными плюмовыми событиями (Пучков, 2013, 2016 и др.), привели к появлению в типовом разрезе рифея специфических синрифтовых вулканогенно-осадочных ассоциаций айской и машакской свит, объединяющих конгломераты, микститы, грубо- и разнозернистые песчаники, низкоуглеродистые глинистые сланцы, основные и кислые вулканиты (см. рис. 1).

Результаты исследований и их обсуждение

На классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O})$ (Herron, 1988) подавляющее число фигуративных точек глинистых сланцев айской свиты сосредоточено в поле вакк, тогда как точки песчаников можно видеть в полях аркозов и литаренитов, а также сублитаренитов и субаркозов (рис. 2). Таким образом, очевидно, что в составе каркаса псаммитов айской свиты присутствуют продукты разрушения и кристаллических пород фундамента (так называемый петрогенный

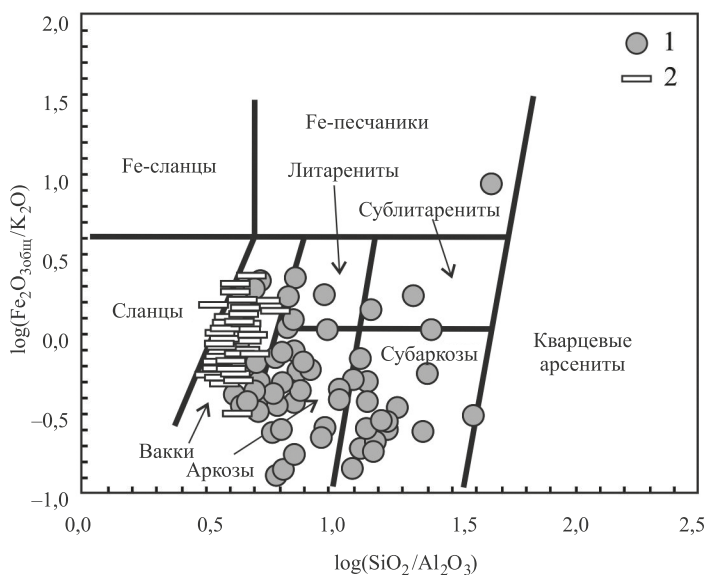


Рис. 2. Положение точек состава песчаников и глинистых пород айской свиты на классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O})$

1 — песчаники, 2 — глинистые породы

материал, т. е. материал, прошедший только один седиментационный цикл), и осадочных/метаосадочных образований дорифейского возраста (платформенный проточехол). Этот вывод хорошо согласуется с данными предшествующих минералого-петрографических исследований (Чайка, 1966 и др.).

В соответствии с представлениями, приведенными в работе (Юдович и Кетрис, 2000), разграничить петро- и литогенные (многократно переотложенные) осадочные образования можно при помощи ряда литохимических критериев.

Так, в петрогенных образованиях, как правило, сохраняются исходные корреляционные связи между основными породообразующими оксидами и литохимическими модулями: между титановым и железным модулями (соответственно ТМ и ЖМ) наблюдается положительная корреляция, тогда как между модулем общей щелочности (НКМ) и гидролизатным модулем (ГМ⁵) корреляция отсутствует.

Для песчаников айской свиты корреляция между ТМ и ЖМ весьма слабая отрицательная ($r = -0,17$), а между НКМ и ГМ она по сути дела отсутствует ($r = 0,04$). Вместе с тем между значениями ГМ и ТМ в песчаниках существует выраженная положительная корреляция ($r = 0,86$), тогда как в таких несомненно литогенных породах, как кварцевые песчаники, между указанными модулями наблюдается отчетливая отрицательная корреляция (Юдович и Кетрис, 2000). Последнее представляется нам дополнительным аргументом для того, чтобы отнести псаммиты айской свиты к породам с существенной долей петрогенного материала.

На диаграмме НКМ—ФМ (Юдович и Кетрис, 2000), имеющей вид

$$(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2,$$

точки состава глинистых сланцев айской свиты в основном сосредоточены в областях V (хлорит-сметит-гидрослюдистые глины) и VI (гидрослюдистые глины со значительной примесью дисперсных полевых шпатов) (рис. 3). При этом точка РААС на данном графике находится в зоне перекрытия областей II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и гидрослюды глины) и V. Среднее содержание оксида магния в глинистых сланцах айской свиты составляет $2,1 \pm 1,1$ масс. % (минимум — 0,2, максимум — 5,8 %). Из 44 образцов глинистых сланцев только для 5 характерно содержание $\text{MgO} > 3$ %. Последнее значение рассматривается в качестве порогового — оно позволяет разделить «обычные» глинистые породы и тонкозернистые обломочные образования с возможной примесью так называемой камуфлированной пирокластик (Юдович и Кетрис, 2000). Из сказанного можно сделать вывод, что в составе глинистых пород рассматриваемого нами уровня эталонного разреза рифея такая пирокластика отсутствует.

Глинистые сланцы айской свиты характеризуются отсутствием корреляции и между ТМ и ЖМ ($r = 0,05$), и между НКМ и ГМ ($r = -0,02$). Соотношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_{3\text{ср}}$ составляет для них $0,29 \pm 0,08$ (минимум — 0,18, максимум — 0,56), при этом для 11 образцов из 44 указанный параметр в той или иной мере выше 0,30 — порогового значения, которое в работе (Cox et al., 1995) принято как разделяющее лито- и петрогенные глинистые породы. Все это дает основание предполагать, что глинистые сланцы исследованной нами выборки содержат определенную долю ли-

⁵ Перечисленные модули рассчитываются по содержаниям основных породообразующих оксидов: ТМ = $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ЖМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, НКМ = $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$, ГМ = $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MnO})/\text{SiO}_2$.

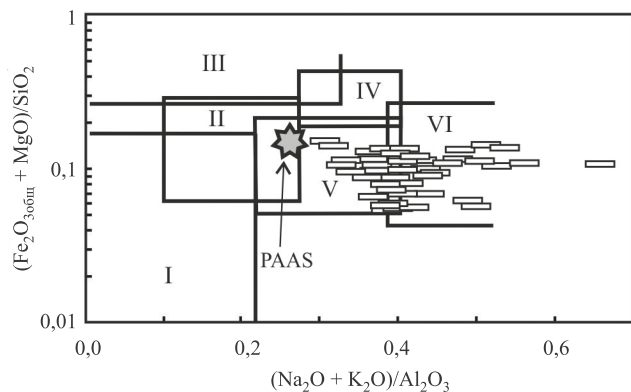


Рис. 3. Положение фигуративных точек глинистых пород айской свиты на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ — $(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$

Условные обозначения см. рис. 2.

I–VI — поля глин: I — преимущественно каолинитовых; II — преимущественно смектитовых с примесью каолинита и гидрослюды; III — преимущественно хлоритовых с примесью Fe-гидрослюды; IV — хлорит-гидрослюдистых; V — хлорит-смектит-гидрослюдистых; VI — гидрослюдистых со значительной примесью дисперсных полевых шпатов

тогенного материала, причем примерно в четверти образцов она, по всей видимости, невелика.

Среднее значение индекса химического изменения (CIA⁶) для глинистых пород айского уровня составляет 63 ± 4 (минимум — 53, максимум — 70). Это может указывать на достаточно слабое химическое выветривание пород-источников тонкой алюмосиликокластики, или же этот факт можно интерпретировать как следствие относительно выраженной/достаточно интенсивной тектоники в областях размыва.

Сравнение валового химического состава песчаников и глинистых пород айской синрифтовой ассоциации с составом таких референтных объектов, как средний протерозойский кратонный песчаник — ПКП (Condie, 1993) и средний постархейский австралийский глинистый сланец — PAAS (Taylor and McLennan, 1985), показывает достаточно широкие вариации содержаний основных породообразующих оксидов (рис. 4, а). Так, среднее содержание оксида кремния в песчаниках айской свиты составляет $(0,68 \div 1,03)$ ПКП (среднее — 0,85 ПКП) (см. таблицу). Средние содержания оксидов титана, алюминия и натрия варьируют в пределах $(\sim 2,3 \div 2,5)$ ПКП. Средние содержания оксидов фосфора и калия еще выше — соответственно 3,9 ПКП и 5,2 ПКП. Примерно такое же распределение основных породообразующих оксидов в песчаниках айской свиты наблюдается

⁶ Химический индекс изменения рассчитывается по формуле

$$\text{CIA} = 100 (\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$$

(где CaO* — содержание оксида кальция в в терригенных компонентах), при этом содержания породообразующих оксидов берутся в молекулярных количествах (Nesbitt and Young, 1982 и др.).

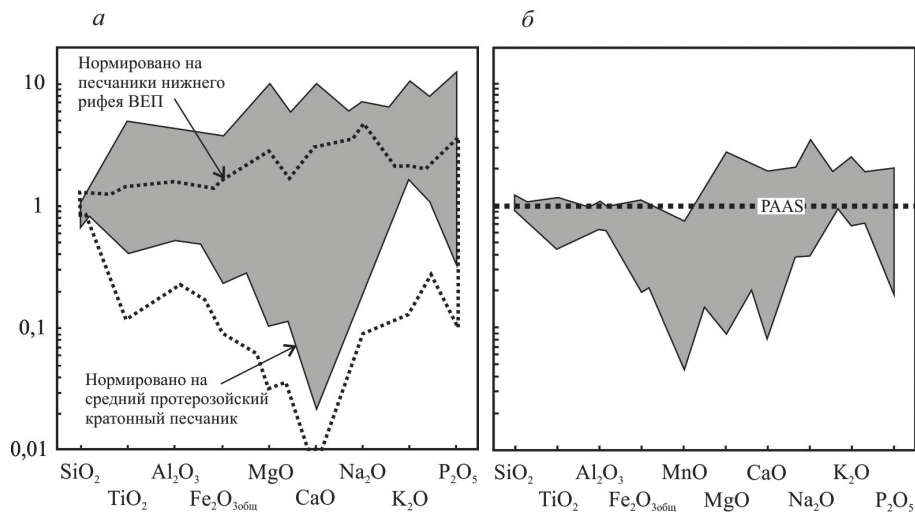


Рис. 4. Распределение основных породообразующих оксидов в песчаниках (а) и глинистых породах (б) айской свиты, нормированных по алевропесчаным породам нижнего рифея ВЕП, среднему протерозойскому кратонному песчанику и PAAS

и при нормировании на «средний нижнерифейский алевропесчаник» ВЕП (Ронов и др., 1995) (см. рис. 4, а). Очевидно, что присутствующие в разрезах айской свиты песчаники характеризуются заметной незрелостью своего химического состава, что, как можно предполагать, в какой-то, возможно и существенной, степени связано с их формированием в достаточно активных тектонических обстановках. На это же указывает и заметно больший разброс содержаний в них оксидов кальция и натрия по сравнению с песчаниками юшинской свиты нижнего рифея, принадлежащих к ассоциации надрифтовых толщ.

Глинистые породы айской свиты характеризуются сопоставимыми с PAAS средними содержаниями только трех оксидов — кремния, магния и фосфора (соответственно 1,04 PAAS, 1,03 PAAS и 1,09 PAAS) (см. рис. 4, б). Средние содержания оксидов титана, алюминия и железа в них несколько ниже (0,72 PAAS, 0,85 PAAS и 0,66 PAAS), а натрия и калия — несколько выше, чем в PAAS (соответственно 1,63 PAAS и 1,32 PAAS). Содержания оксидов марганца и кальция варьируют от 0,05 до 0,68 и от 0,08 до 1,94 при средних значениях соответственно 0,24 PAAS и 0,49 PAAS (см. таблицу).

На диаграмме $K_2O/Na_2O—SiO_2/Al_2O_3$ (Bolnar et al., 2005) фигуративные точки глинистых пород айской свиты (все характеризующиеся соотношениями $K_2O/Na_2O < 15$) расположены в области составов, для которой можно предполагать отсутствие проявления сколько-нибудь масштабного калиевого метасоматоза (рис. 5). Соответственно, во всех дальнейших рассуждениях мы можем без каких-либо поправок использовать данные о содержании оксида калия в глинистых породах основания нижнего рифея Башкирского мегантиклинория.

Известно, что процессы осадконакопления в рифтовых бассейнах тесно связаны с процессами тектоническими (Осадочные..., 2004; и др.); последние контролируют объем и общую архитектуру области аккомодации, способствуют появлению многочисленных локальных источников кластики и ловушек последней. В целом

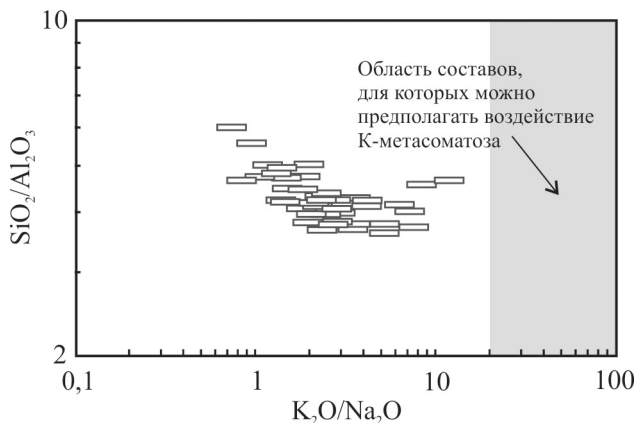


Рис. 5. Положение точек глинистых сланцев айской свиты на диаграмме $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$

Условные обозначения см. рис. 2

формирование осадочного заполнения рифтов — процесс неравновесный и незавершенный. В таких обстановках синрифтовые осадочные образования имеют весьма пестрый петрографический (Ingersoll et al., 1990; Garzanti et al., 2001 и др.), и, как мы видим, химический состав.

По данным о валовом химическом составе осадочных пород можно в определенной мере судить и о составе пород-источников обломочного материала для них. Для этого обычно используется ряд различных диаграмм, из них наиболее широко — диаграмма F1—F2⁷ (Roser, Korsch, 1988). Распределение фигуративных точек состава песчаников и глинистых пород айской свиты на этой диаграмме (рис. 6) достаточно показательно. Львиная доля точек сосредоточена в области, представляющей продукты разрушения кислых магматических пород; существенно меньше их расположено в области составов, отвечающей продуктам разрушения осадочных и/или метаосадочных образований, содержащих заметную долю кварца. Такое распределение не противоречит выводу, сделанному выше при рассмотрении положения точек осадочных пород айской свиты на диаграмме М. Хиррона (Herron, 1988), а именно: в каркасе песчаников данного уровня эталонного разреза рифея присутствуют продукты разрушения и кристаллических пород фундамента, и до-рифейского проточехла.

До недавнего времени по валовому химическому составу осадочных пород можно было более или менее уверенно судить только об ограниченном числе палеогеодинамических обстановок их формирования (пассивные и активные, в том числе с островными дугами разных типов, континентальные окраины). Для песчаников и глинистых пород коллизионных и рифтогенных обстановок области характерных составов на большинстве дискриминантных диаграмм отсутствовали.

⁷ Здесь принято следующее:

$$\begin{aligned}
 F1 &= 30,638(TiO_2/Al_2O_3) - 12,541(Fe_2O_{3общ}/Al_2O_3) + \\
 &+ 7,329(MgO/Al_2O_3) + 12,031(Na_2O/Al_2O_3) + 35,402(K_2O/Al_2O_3) - 6,382, \\
 F2 &= 56,5(TiO_2/Al_2O_3) - 10,879(Fe_2O_{3общ}/Al_2O_3) + \\
 &+ 30,875(MgO/Al_2O_3) - 5,404(Na_2O/Al_2O_3) + 11,112(K_2O/Al_2O_3) - 3,89.
 \end{aligned}$$

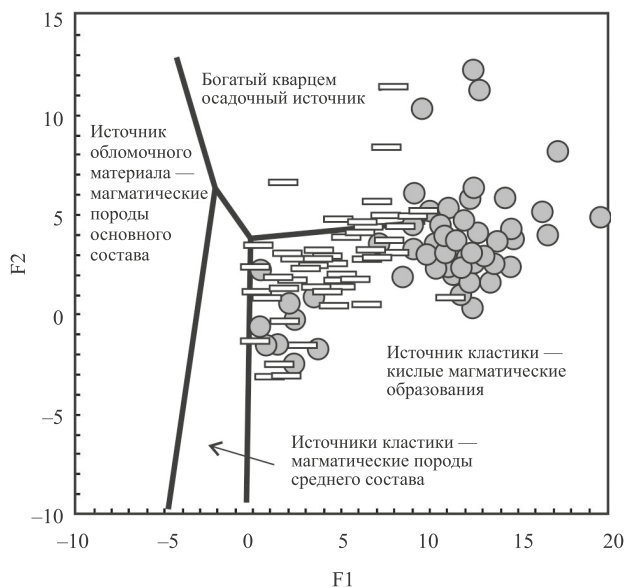


Рис. 6. Распределение точек состава песчаников и глинистых пород айской свиты на диаграмме F1—F2

Условные обозначения см. рис. 2

Ситуация изменилась только в последние несколько лет. В 2013 г. опубликованы новые дискриминантные диаграммы DF1—DF2⁸ для терригенных пород с высоким (63–95 %) и низким (35–63 %) содержанием SiO₂ (Verma and Armstrong-Altrin, 2013). Границы классификационных полей (на диаграммах выделены области составов, характерные для рифтогенных, коллизионных и островодужных обстановок) на них проведены на основе расчета вероятности в соответствии с работой (Agrawal, 1999). В то же время представляется, что и указанные диаграммы нуждаются в определенной доработке, так как не всегда позволяют однозначно установить палеогеодинамическую природу терригенных ассоциаций (Maslov et al., 2016b).

Точки состава песчаников и глинистых пород айской свиты распределены на диаграмме DF1—DF2 в основном в областях, характерных для осадочных пород, сформированных и в рифтогенных, и в коллизионных обстановках. Небольшая их доля присутствует также в области составов, типичных для островодужных обстановок (рис. 7, а). Очевидно, что такое распределение не позволяет сделать какого-либо вывода о принадлежности песчаников и глинистых пород айской

⁸ Здесь принято следующее:

$$DF1 = -0,263 \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0,604 \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1,725 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ + 0,660 \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 2,191 \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0,144 \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1,304 \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ + 0,054 \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0,330 \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1,588,$$

$$DF2 = -1,196 \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + [1,064 \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0,303 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ + 0,436 \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0,838 \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0,407 \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1,021 \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - \\ - 1,706 \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}] - 0,126 \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1,068.$$

Нижний индекс «_{adj}» показывает, что расчет ведется по содержаниям оксидов, приведенным к 100 % сухого вещества. В то же время нами показано (Маслов и др., 2018), что значения DF можно определять и без такого пересчета.

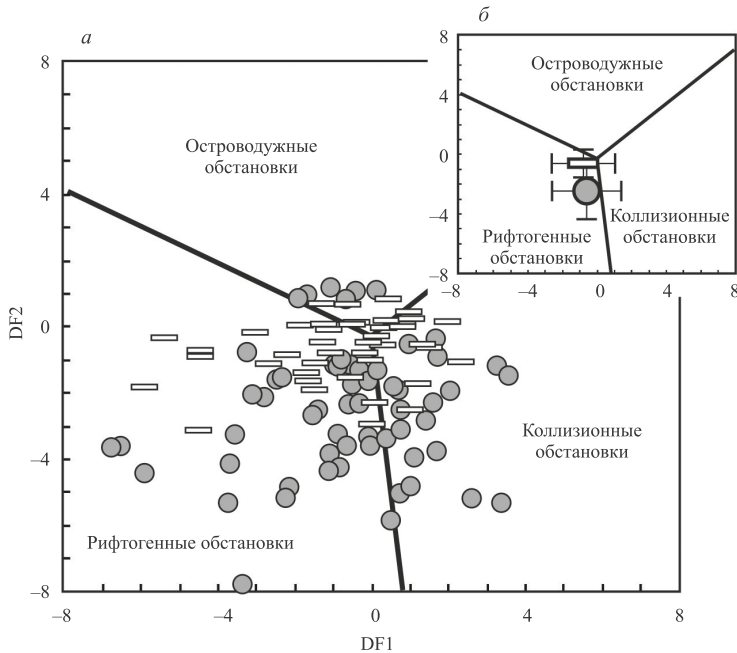


Рис. 7. Распределение частных (а) и средних (б) фигуративных точек состава песчаников и глинистых пород айской свиты на диаграмме DF1—DF2

Условные обозначения см. рис. 2

свиты к той или иной палеогеодинамической обстановке. Чтобы получить более строгий вывод, мы нанесли на указанную диаграмму средние точки песчаников и глинистых сланцев айской свиты (рис. 7, б), которые попали в область составов, характерных для рифтогенных обстановок. Исходя из сказанного и с учетом геологических данных, осадочные породы айской свиты можно с существенной долей вероятности считать синрифтовыми образованиями.

Заключение

1. В составе песчаников айской свиты — базального подразделения бурзянской серии нижнего рифея Башкирского мегантиклинория (тип нижнего рифея Северной Евразии), присутствуют продукты разрушения и кристаллического фундамента ВЕП, и осадочных/метаосадочных пород ее платформенного проточехла. Этим определяется наличие существенной доли литогенного (неоднократно перетолженного) материала в составе псаммитов, а также ассоциирующих с ними глинистых сланцев.

2. Глинистые породы айской свиты в большинстве проанализированных нами образцов не содержат примеси так называемой камуфлированной пирокластики.

3. В целом тонкозернистые обломочные породы айской свиты характеризуются невысокими значениями индекса химического изменения, что позволяет предполагать формирование их в обстановках относительно выраженной тектоники в областях размыва, которая в существенной мере подавляла, по всей видимости,

воздействие процессов химического выветривания на состав пород палеоводосборов.

4. Сравнение валовых химических составов и песчаников, и глинистых сланцев айской свиты с рядом референтных объектов (средний ПКП, PAAS и др.) показало, что для них характерны достаточно широкие вариации содержаний основных породообразующих оксидов, т. е. заметная химическая незрелость. Можно предполагать, что последняя обусловлена именно формированием их в относительно активных тектонических обстановках.

5. Глинистые породы айской свиты не несут признаков влияния калиевого метасоматоза.

6. Анализ валового химического состава песчаников и глинистых пород айской свиты показал, что источниками кластики для них выступали кислые магматические и (возможно) метаморфические породы (кристаллический фундамент ВЕП), а также осадочные и/или метаосадочные образования (проточехол) с повышенным количеством кварца.

7. Положение индивидуальных точек состава песчаников и глинистых пород айской свиты на диаграмме DF1–DF2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) не позволяет сделать однозначного вывода об их палеогеодинамической природе (основная масса точек присутствует в областях, характерных для осадочных пород как рифтогенных, так и коллизионных обстановок; меньшая их часть сосредоточена в поле составов, типичных для островодужных обстановок). Более определенно в пользу рифтогенной/синрифтовой природы терригенных пород айской свиты свидетельствует распределение на указанной диаграмме средних точек песчаников и глинистых сланцев.

Авторы признательны С. Г. Ковалеву, С. В. Мичурину, Н. П. Горбуновой и их коллегам за существенное и быстрое расширение банка аналитических данных по терригенным породам айской свиты. Иллюстрации к статье выполнены Н. С. Глушковой. Финансовая поддержка исследований (подбор материала для выполнения химических анализов, обработка и обсуждение полученных данных) осуществлена за счет гранта РНФ 16-17-10192 (А. В. Маслов).

Литература

- Беккер, Ю. Р., 1988. Молассы докембрия. Недр, Ленинград.
- Гарань, М. И., 1969. Верхний докембрий (рифей): Стратиграфия. Геология СССР. Т. 12. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. 1. Недр, Москва.
- Гареев, Э. З., 1982. Геохимические особенности карбонатных пород опорных разрезов катавской и укской свит рифея Южного Урала. Верхний докембрий и палеозой Южного Урала. БФАН СССР, Уфа.
- Гареев, Э. З., 1986. Геохимия и условия формирования отложений миньярской свиты Южного Урала. Стратиграфия, литология и геохимия верхнего докембрия Южного Урала и Приуралья. БФАН СССР, Уфа.
- Гареев, Э. З., 1987. Условия формирования зильмердакских отложений по геохимическим данным на примере стратотипического разреза по р. Малый Инзер (Южный Урал). Геохимия осадочных формаций Урала. УНЦ АН СССР, Свердловск.
- Гареев, Э. З., 1988. Геохимические особенности и условия осадконакопления отложений инзерской свиты в стратотипическом разрезе на Южном Урале. Верхний докембрий Южного Урала и востока Русской плиты, БФАН СССР, Уфа.

- Гареев, Э.З., 1989. Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000016736> (дата обращения: 14.03.2018).
- Гареев, Э.З., 1997. Петрохимические и геохимические особенности и эволюция состава осадочных пород стратотипического разреза рифея на Южном Урале, в: Рифей Северной Евразии. Геология. Общие проблемы стратиграфии. УрО РАН, Екатеринбург.
- Гареев, Э.З., 1998. Петрохимия и эволюция составов терригенных пород как отражение процессов осадконакопления на примере стратотипа ашинской серии венда на Южном Урале, в: Палеогеография венда-раннего палеозоя Северной Евразии. ИГТ УрО РАН, Екатеринбург.
- Иванов, С.Н., 1980. О доордовиковской истории Урала и предгеосинклинальном развитии земной коры вообще. Доордовиковская история Урала 1, 3–28.
- Иванов, С.Н., 1981. О байкалидах Урала и Сибири. Геотектоника 5, 47–65.
- Козлов, В.И., 1982. Верхний рифей и венд Южного Урала. Наука, Москва.
- Маслов, А.В., 1988. Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. Наука, Москва.
- Маслов, А.В., Гареев, Э.З., 1992. Основные петрохимические особенности и условия образования аркозовых комплексов рифея и венда Южного Урала. Литология и полезные ископаемые 3, 50–60.
- Маслов, А.В., Гареев, Э.З., 1994. Основные черты петрохимической эволюции песчаников стратотипического разреза рифея на Южном Урале. Литология и полезные ископаемые 4, 119–127.
- Маслов, А.В., Гареев, Э.З., Котова, Л.Н., Подковыров, В.Н., 2018. Литохимические особенности песчаников машакской свиты (средний рифей, Южный Урал). Проблемы минералогии, петрографии и металлогении 21, 153–161.
- Маслов, А.В., Гареев, Э.З., Крупенин, М.Т., Ронкин, Ю.Л., 2007. Литогеохимические особенности глинистых сланцев и аргиллитов верхнего рифея Башкирского мегантиклинория в координатах реального времени. Литосфера 5, 38–67.
- Маслов, А.В., Крупенин, М.Т., Гареев, Э.З., 2003а. Литологические, литохимические и геохимические индикаторы палеоклимата (на примере рифея Южного Урала). Литология и полезные ископаемые 5, 427–446.
- Маслов, А.В., Крупенин, М.Т., Гареев, Э.З., Петров, Г.А., 2003б. К оценке редокс-обстановок рифейских и вендских бассейнов осадконакопления западного склона Урала. Литосфера 2, 75–93.
- Маслов, А.В., Оловянишников, В.Г., Ишерская, М.В., 2002. Рифей восточной, северо-восточной и северной периферии Русской платформы и западной мегазоны Урала: литостратиграфия, условия формирования и типы осадочных последовательностей. Литосфера 2, 54–95.
- Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция, 2004. Научный мир, Москва.
- Парначев, В.П., 1988. Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008564815> (дата обращения 14.03.2018).
- Пучков, В.Н., 2010. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). ДизайнПолиграфСервис, Уфа.
- Пучков, В.Н., 2013. Плюмы в истории Урала. Бюллетень МОИП. Отдел геологический 4, 64–73.
- Пучков, В.Н., 2016. Взаимосвязь плитных и плюмовых процессов в глобальном и региональном масштабе, в: Плюмовые процессы на Урале. Металлогения древних и современных океанов–2016. От минералогенезиса к месторождениям. ИМин УрО РАН, Миасс.
- Раабен, М.Е., 1975. Верхний рифей как единица общей стратиграфической шкалы. Наука, Москва.
- Романов, В.А., 1973. Типовые разрезы докембрия Южного Урала. Наука, Москва.
- Ронов, А.Б., Мигдисов, А.А., Хане, К., 1995. Количественные закономерности эволюции состава алевропесчаных пород Русской плиты. Геохимия 3, 323–348.
- Смирнов, Ю.Д., 1964. История развития Уральской складчатой области в докембрии, в: Геология докембрия. Доклады советских геологов. МГК XXII сессия. Недра, Москва.
- Стратотип рифея, 1983. Стратиграфия. Геохронология. Наука, Москва.
- Формирование земной коры Урала, 1986. Наука, Москва.
- Чайка, В.М., 1966. Докембрийские аркозовые формации, метаморфизованные россыпи и цирконовый метод изучения метаморфических пород и гранитов. Проблемы осадочной геологии докембрия 1, 200–215.
- Юдович, Я.Э., Кетрис, М.П., 1988. Геохимия черных сланцев. Наука, Ленинград.
- Юдович, Я.Э., Кетрис, М.П., 2000. Основы литохимии. Наука, Санкт-Петербург.

- Agrawal, S., 1999. Geochemical discrimination diagrams: a simple way of replacing eye-fitted boundaries with probability based classifier surfaces. *Journal of the Geological Society of India* 54, 335–346.
- Bolnar, R., Kamber, B. S., Moorbath, S., Whitehouse, M. J., Collerson, K. D., 2005. Chemical characterization of earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 1555–1573.
- Condie, K. C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, 1–37.
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 2919–2940.
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Castiglioni, G., 2001. Petrology of rifted-margin sand (Red Sea and Gulf of Aden, Yemen). *Journal of Geology* 109, 277–297.
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 820–829.
- 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, 1280–1296.
- Krasnobaev, A. A., Busharina, S. V., Puchkov, V. N., Kozlov, V. I., Sergeeva, N. D., Lepekhina, E. N., 2013. Zirconology of Navysh volcanic rocks of the Ai suite and the problem of the age of the Lower Riphean boundary in the Southern Urals. *Doklady Earth Sciences* 448(2), 185–190.
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Podkovyrov, V. N., Graunov, O. V., 2016a. Paleoclimate changes in the Late Precambrian: Evidence from the Upper Precambrian section of the South Urals. *Lithology and Mineral Resources* 51(2), 117–135.
- Maslov, A. V., Krupenin, M. T., Gareev, E. Z., 2005. Terrigenous sedimentary sequences in the Riphean stratotype: Contribution of recycling and input of the first cycle material. *Geochemistry International* 43(2), 131–152.
- Maslov, A. V., Podkovyrov, V. N., Mizens, G. A., Nozhkin, A. D., Fazliakhmetov, A. M., Malinovsky, 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.
- Maslov, A. V., Mizens, G. A., Podkovyrov, V. N., Gareev, E. Z., Sorokin, A. A., Smirnova, Y. N., Sokur, T. M., 2013. Synorogenic psammites: Major lithochemical features. *Lithology and Mineral Resources* 48(1), 74–97.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Lepikhina, O. P., Gareev, E. Z., 2003. Provenances of Riphean sedimentary basins at the Russian Platform-Southern Urals junction: Evidence from petrographic, petrochemical, and geochemical data. *Doklady Earth Sciences* 389(2), 180–183.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Lepikhina, O. P., Gareev, E. Z., 2004. The lower Riphean fine-grained aluminosilicate clastic rocks of the Bashkir anticlinorium in the southern Urals: Composition and evolution of their provenance. *Geochemistry International* 42(6), 561–578.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Podkovyrov, V. N., Gareev, E. Z., Gorozhanin, V. M., 2006. Secular variations of the upper crust composition: Implication of geochemical data on the Upper Precambrian shales from the Southern Urals western flank and Uchur-Maya region. *Stratigraphy and Geological Correlation* 14(2), 126–149.
- Maslov, A. V., Nozhkin, A. D., Podkovyrov, V. N., Letnikova, E. F., Turkina, O. M., Ronkin, Yu. L., Dmitrieva, N. V., Gareev, E. Z., Lepikhina, O. P., Popova, O. Yu., 2008. Riphean fine-grained aluminosilicate clastic rocks in the Southern Urals, Uchur-Maya area, and the Yenisei Kryazh: Principal litho-geochemical characteristics. *Geochemistry International* 46(11), 1117–1144.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Nozhkin, A. D., Maslov, A. V., Podkovyrov, V. N., Turkina, O. M., Letnikova, E. F., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Dmitrieva, N. V., Gareev, E. Z., Lepikhina, O. P., 2009. Geochemistry of Riphean terrigenous rocks in the Southern Urals and Siberia and variations of the continental-crust maturity. *Russian Geology and Geophysics* 50, 71–86.
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology* 67, 119–139.

- Semikhatov, M. A., Chumakov, N. M., Kuznetsov, A. B., 2015. Isotope age of boundaries between the general stratigraphic subdivisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) in Russia: The evolution of opinions and the current estimate. *Stratigraphy and Geological Correlation* 23(6), 568–579.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell Scientific, Oxford, 312 p.
- 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.

Статья поступила в редакцию 4 января 2018 г.
Статья рекомендована в печать 14 февраля 2018 г.

Контактная информация:

Маслов Андрей Викторович — amas2004@mail.ru
Гареев Эмир Зуфарович — emirgareev2015@yandex.ru
Подковыров Виктор Николаевич — vpodk@mail.ru
Котова Людмила Николаевна — l.n.kotova@ipgg.ru

Synrift deposits of the lower part of the Riphean stratotype, Southern Urals (a short lithochemical characterization)

Andrey V. Maslov^{1, 2}, Emir Z. Gareev², Victor N. Podkovyrov³, Ludmila N. Kotova³

¹ Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS,
15, Vonsovsky ul., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

² Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre of RAS,
16/2, Karl Marx ul., Ufa, 450077, Russian Federation

³ Institute of Precambrian Geology and Geochronology of RAS,
2, Makarova nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Maslov A. V., Gareev E. Z., Podkovyrov V. N., Kotova L. N. Synrift deposits of the lower part of the Riphean stratotype, Southern Urals (a short lithochemical characterization). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 1, pp. 36–55. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.103>

The study of the bulk chemical composition of the sandstones of the Ai Formation of the Burzyan Group of the Southern Urals (the stratotype of the Lower Riphean of Northern Eurasia) led to the conclusion that they contain products of destruction of both the crystalline basement rocks of the East European Platform and the sedimentary/metasedimentary rocks of its platform protocoast. In the composition of sandstones and associated clay rocks, there appears to be a noticeable portion of lithogenous (repeatedly redeposited) material. Clay rocks of the Ai Formation do not contain the so-called “camouflaged pyroclastics”, and, consequently, the processes of their accumulation were not accompanied by erosion of volcanic rock or synchronous explosive activity. As a whole, low values of the chemical index of alteration (CIA) are inherent for fine-grained terrigenous formations. This makes it possible to assume their formation under conditions of relatively pronounced tectonic activity in catchment areas, possibly minimized by the effects of chemical weathering processes. A comparison of the bulk chemical compositions of the terrigenous rocks of the Ai Formation with the composition of the average Proterozoic craton sandstone, PAAS and a number of other reference geological objects has shown that they are characterized by fairly wide variations in the content of the main rock-forming oxides (significant chemical immaturity of the composition), which can also be regarded as a reflection of their accumulation in sufficiently active tectonic environments. Analysis of the bulk chemical composition of sandstones and clay rocks of the

Ai Formation suggests that the sources of the clastic material were as acid magmatic rocks as sedimentary and/or metasedimentary rocks with an increased amount of quartz; this is consistent with the results of previous mineralogical-petrographic studies. The position of the individual data points of sandstones and clay rocks of the Ai Formation on the DF1–DF2 diagram (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) does not allow us to draw a definite conclusion about their paleogeodynamic nature, since one part of the points is located in the field that is characteristic for sedimentary rocks of riftogenic environments, and the other lies in the field typical for collision environments. More specifically, in favor of the riftogenic/synrift nature of the terrigenous rocks of the Ai Formation, the distribution of the data points of their average compositions on the DF1–DF2 diagram is evidence.

Keywords: Southern Urals, Lower Riphean, Ai Formation, sandstones, clay rocks, litho-chemistry.

References

- Agrawal, S., 1999. Geochemical discrimination diagrams: a simple way of replacing eye-fitted boundaries with probability based classifier surfaces. *Journal of the Geological Society of India* 54, 335–346.
- Bekker, Yu. R., 1988. Molassy dokembriia [Precambrian molasses]. Nedra, Leningrad. 288 p. (In Russian)
- Bolnar, R., Kamber, B. S., Moorbath, S., Whitehouse, M. J., Collerson, K. D., 2005. Chemical characterization of earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 1555–1573.
- Chaika, V. M., 1966. Dokembriiskie arkozovye formatsii, metamorfizovannye rossypi i tsirkonovyi metod izucheniia metamorficheskikh porod i granitov [Precambrian arkose formations, metamorphosed placers and the zircon method for studying metamorphic rocks and granites]. *Problemy osadochnoi geologii dokembriia [Problems of Precambrian sedimentary geology]* 1, 200–215. (In Russian)
- Condie, K. C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, 1–37.
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 2919–2940.
- Formirovanie zemnoi kory Urala [Formation of the Earth's crust of the Urals], 1986. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Garan, M. I., 1969. Verkhni dokembrii (rifei): Stratigrafiia. Geologiiia SSSR. T. 12 [Upper Precambrian (Riphean): Stratigraphy. Geology of USSR. Vol. 12]. Permskaia, Sverdlovskaia, Cheliabinskaia i Kurganskaia oblasti. Part 1. Nedra, Moscow. (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1982. Geokhimicheskie osobennosti karbonatnykh porod opornykh razrezov katavskoi i uk-skoi svit rifeia Iuzhnogo Urala [Geochemical characteristics of carbonate rocks from base sections of the Riphean Katav and Uk formations, Southern Urals], in: Verkhni dokembrii i paleozoi Iuzhnogo Urala [Upper Precambrian and Paleozoic of Southern Urals]. BFAN SSSR, Ufa. (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1986. Geokhimiia i uslovia formirovaniia otlozhenii min'iarskoi svity Iuzhnogo Urala [Geochemistry and formation conditions of Min'yar Formation deposits, Southern Urals], in: Stratigrafiia, litologiiia i geokhimiia verkhnego dokembriia Iuzhnogo Urala i Priural'ia [Stratigraphy, lithology and geochemistry of Upper Precambrian of Southern Urals and Cis-Urals], BFAN SSSR, Ufa. (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1987. Uslovia formirovaniia zil'merdakskikh otlozhenii po geokhimicheskim dannym na primere stratotipicheskogo razreza po r. Malyi Inzer (Iuzhnyi Ural) [Formation conditions of zilmerdak deposits according geochemical data on the example of stratotypical cross-section along Malyi Inzer river (Southern Urals)], in: Geokhimiia osadochnykh formatsii Urala [Geochemistry of the Urals sedimentary formations]. UNTs AN SSSR, Sverdlovsk. (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1988. Geokhimicheskie osobennosti i uslovia osadkonakopleniia otlozhenii inzerskoi svity v stratotipicheskoi razreze na Iuzhnom Urale [Geochemical features and sedimentation conditions of the Inzer Formation deposits in the stratotypical cross-section, Southern Urals], in: Verkhni dokembrii Iuzhnogo Urala i vostoka Russkoi plity [Upper Precambrian of Southern Urals and eastern part of the Russian Plate]. BFAN SSSR, Ufa. (In Russian)

- Gareev, E. Z., 1989. Geokhimiia osadochnykh porod stratotipicheskogo razreza rifeia [Geochemistry of sedimentary rocks of the stratotypical Riphean cross-section]. URL: <https://search.rsl.ru/ru-record/01000016736> (accessed: 14.03.2018). (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1997. Petrokhimicheskie i geokhimicheskie osobennosti i evoliutsiia sostava osadochnykh porod stratotipicheskogo razreza rifeia na Iuzhnom Urale [Petrochemical and geochemical features and evolution of the sedimentary rock composition in stratotypical Riphean cross-section of the Southern Urals], in: Rifei Severnoi Evrazii. Geologiya. Obshchie problemy stratigrafii [Riphean of the Northern Eurasia. Geology. General problems of Stratigraphy]. UrO RAN, Ekaterinburg. (In Russian)
- Gareev, E. Z., 1998. Petrokhimiia i evoliutsiia sostavov terrigennykh porod kak otrazhenie protsessov osadkonakopleniia na primere stratotipa ashinskoii serii venda na Iuzhnom Urale [Petrochemistry and evolution of the terrigenous rock composition as reflection of sedimentary processes on the example of the Vendian Asha Group type section, Southern Urals], in: Paleogeografiia venda-rannego paleozoiia Severnoi Evrazii [Paleogeography of Vendian-Early Paleozoic of the Northern Eurasia]. IGG UrO RAN, Ekaterinburg. (In Russian)
- Garzanti, E., Vezzoli, G., Ando, S., Castiglioni, G., 2001. Petrology of rifted-margin sand (Red Sea and Gulf of Aden, Yemen). *Journal of Geology* 109, 277–297.
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 820–829.
- 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, 1280–1296.
- Ivanov, S. N., 1980. O doordovikskoi istorii Urala i predegeosinklinal'nom razvitii zemnoi kory voobshche, Doordovikskaiia istoriia Urala [About PreOrdovician history of the Urals and PreGeosynclinal development of the earth's crust in general. PreOrdovician history of the Urals] 1, 3–28. (In Russian)
- Ivanov, S. N., 1981. O baikalidakh Urala i Sibiri [About the Baikhalides of the Urals and Siberia]. *Geotektonika* 5, 47–65. (In Russian)
- Kozlov, V. I., 1982. Verkhniia rifei i vend Iuzhnogo Urala [Upper Riphean and Vendian of Southern Urals]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Krasnobae, A. A., Busharina, S. V., Puchkov, V. N., Kozlov, V. I., Sergeeva, N. D., Lepekhina, E. N., 2013. Zirconology of Navysh volcanic rocks of the Ai suite and the problem of the age of the Lower Riphean boundary in the Southern Urals. *Doklady Earth Sciences* 448(2), 185–190.
- Maslov, A. V., 1988. Litologiya verkhnerifeiskikh otlozhenii Bashkirskogo megantiklinorii [Lithology of Upper Riphean deposits of Bashkirian Meganticlinorium]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., 1992. Osnovnye petrokhimicheskie osobennosti i uslovia obrazovaniia arkozovykh kompleksov rifeia i venda Iuzhnogo Urala [Main petrochemical features and formation conditions of the Riphean and Vendian arkose complexes of the Southern Urals]. *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and mineral resources]* 3, 50–60. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., 1994. Osnovnye cherty petrokhimicheskoi evoliutsii peschanikov stratotipicheskogo razreza rifeia na Iuzhnom Urale [Main features of sandstone petrochemical evolution in Riphean stratotypical cross-section on Southern Urals]. *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and mineral resources]* 4, 119–127. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Kotova, L. N., Podkovyrov, V. N., 2018. Litokhimicheskie osobennosti peschanikov mashakskoi svity (srednii rifei, Iuzhnyi Ural) [Lithochemical features of Mashak Formation sandstones, Southern Urals]. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny]* 21, 153–161. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Krupenin, M. T., Ronkin, Iu. L., 2007. Litogeokhimicheskie osobennosti glinistykh slantsev i argillitov verkhnego rifeia Bashkirskogo megantiklinorii v koordinatakh real'nogo vremeni [Lithochemical features of Upper Riphean shales and argillites of the Bashkirian meganticlinorium in real-time coordinates]. *Litosfera [Lithosphere]* 5, 38–67. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Podkovyrov, V. N., Graunov, O. V., 2016a. Paleoclimate changes in the Late Precambrian: Evidence from the Upper Precambrian section of the South Urals. *Lithology and Mineral Resources* 51(2), 117–135.
- Maslov, A. V., Krupenin, M. T., Gareev, E. Z., 2003a. Litologicheskie, litokhimicheskie i geokhimicheskie indikatory paleoklimata (na primere rifeia Iuzhnogo Urala) [Lithological, Lithochemical, and Geochemical Indicators of Paleoclimate: Evidence from Riphean of the Southern Urals]. *Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and mineral resources]* 5, 427–446. (In Russian)

- Maslov, A. V., Krupenin, M. T., Gareev, E. Z., 2005. Terrigenous sedimentary sequences in the Riphean stratotype: Contribution of recycling and input of the first cycle material. *Geochemistry International* 43(2), 131–152.
- Maslov, A. V., Krupenin, M. T., Gareev, E. Z., Petrov, G. A., 2003b. K otsenke redoks-obstanovok rifeiskikh i vendskikh basseinov osadkonakopleniia zapadnogo sklona Urala [To the evaluation of redox conditions of Riphean and Vendian sedimentary basins of western slope of the Urals]. *Litosfera [Lithosphere]* 2, 75–93. (In Russian)
- Maslov, A. V., Mizens, G. A., Podkovyrov, V. N., Gareev, E. Z., Sorokin, A. A., Smirnova, Y. N., Sokur, T. M., 2013. Synorogenic psammites: Major lithochemical features. *Lithology and Mineral Resources* 48(1), 74–97.
- Maslov, A. V., Nozhkin, A. D., Podkovyrov, V. N., Letnikova, E. F., Turkina, O. M., Ronkin, Yu. L., Dmitrieva, N. V., Gareev, E. Z., Lepikhina, O. P., Popova, O. Yu., 2008. Riphean fine-grained aluminosilicate clastic rocks in the Southern Urals, Uchur-Maya area, and the Yenisei Kryazh: Principal litho-geochemical characteristics. *Geochemistry International* 46(11), 1117–1144.
- Maslov, A. V., Olovianishnikov, V. G., Isherskaia, M. V., 2002. Rifei vostochnoi, severo-vostochnoi i severnoi periferii Russkoi platformy i zapadnoi megazony Urala: litostratigrafiia, usloviia formirovaniia i tipy osadochnykh posledovatel'nostei [Riphean of the eastern, northeastern and northern periphery of the Russian platform and the western megazone of the Urals: lithostratigraphy, formation conditions and types of sedimentary sequences]. *Litosfera [Lithosphere]* 2, 54–95. (In Russian)
- Maslov, A. V., Podkovyrov, V. N., Mizens, G. A., Nozhkin, A. D., Fazliakmetov, A. M., Malinovsky, 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.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Lepikhina, O. P., Gareev, E. Z., 2003. Provenances of Riphean sedimentary basins at the Russian Platform-Southern Urals junction: Evidence from petrographic, petrochemical, and geochemical data. *Doklady Earth Sciences* 389(2), 180–183.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Lepikhina, O. P., Gareev, E. Z., 2004. The lower Riphean fine-grained aluminosilicate clastic rocks of the Bashkir anticlinorium in the southern Urals: Composition and evolution of their provenance. *Geochemistry International* 42(6), 561–578.
- Maslov, A. V., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Podkovyrov, V. N., Gareev, E. Z., Gorozhanin, V. M., 2006. Secular variations of the upper crust composition: Implication of geochemical data on the Upper Precambrian shales from the Southern Urals western flank and Uchur-Maya region. *Stratigraphy and Geological Correlation* 14(2), 126–149.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717.
- Nozhkin, A. D., Maslov, A. V., Podkovyrov, V. N., Turkina, O. M., Letnikova, E. F., Ronkin, Yu. L., Krupenin, M. T., Dmitrieva, N. V., Gareev, E. Z., Lepikhina, O. P., 2009. Geochemistry of Riphean terrigenous rocks in the Southern Urals and Siberia and variations of the continental-crust maturity. *Russian Geology and Geophysics* 50, 71–86.
- Osadochnye basseiny: metodika izucheniia, stroenie i evoliutsiia [Sedimentary basins: methods of research, structure and evolution], 2004. Nauchnyi mir, Moscow. (In Russian)
- Parnachev, V. P., 1988. Magmatizm i osadkonakoplenie v pozdnedokembriiskoi istorii Iuzhnogo Urala [Magmatism and sedimentation in the Late Precambrian history of the Southern Urals]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008564815> (accessed 14.03.2018). (in Russian)
- Puchkov, V. N., 2010. Geologiya Urala i Priural'ia (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and the Urals (actual issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. DesignPolygraph Service, Ufa. (In Russian)
- Puchkov, V. N., 2013. Pliumy v istorii Urala [Plumas in the history of the Urals]. *Bulleten' MOIP [MSN bulletin. Geological series]* 4, 64–73. (In Russian)
- Puchkov, V. N., 2016. Vzaimosviaz' plitnykh i pliumovykh protsessov v global'nom i regional'nom masshtabe [Interconnection of plate and plume processes on a global and regional scale, in Plume processes in the Urals], in: Pliumovye protsessy na Urale. Metallogeniia drevnykh i sovremennykh okeanov–2016. Ot mineralogenezisa k mestorozhdeniiam [Metallogeny of ancient and modern oceans–2016. From mineralogens to deposits]. IMin UrO RAN, Miass. (In Russian)
- Raaben, M. E., 1975. Verkhonii rifei kak edinitsa obshchei stratigraficheskoi shkaly [The Upper Riphean as a unit of the general stratigraphic scale]. Nauka, Moscow. (In Russian)

- Romanov, V. A., 1973. Tipovye razrezy dokembrii Iuzhnogo Urala [Typical sections of the Precambrian of the Southern Urals]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Ronov, A. B., Migdisov, A. A., Khane, K., 1995. Kolichestvennyye zakonomernosti evoliutsii sostava alevropeschanykh porod Russkoi plity [Quantitative patterns of the evolution of the composition of siltstones and sandstones of the Russian plate]. Geokhimiia [Geochemistry International] 3, 323–348. (In Russian)
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. Chemical Geology 67, 119–139.
- Semikhatov, M. A., Chumakov, N. M., Kuznetsov, A. B., 2015. Isotope age of boundaries between the general stratigraphic subdivisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) in Russia: The evolution of opinions and the current estimate. Stratigraphy and Geological Correlation 23(6), 568–579.
- Smirnov, Iu. D., 1964. Istoriia razvitiia Ural'skoi skladchatoi oblasti v dokembrii [History of development of the Ural fold region in the Precambrian], in: Geologiya dokembrii. Doklady sovetskikh geologov. MGK XXII sessiia. [Geology of Precambrian. Reports of Soviet geologists. IGC XXII session]. Nedra, Moscow. (In Russian)
- Stratotip rifeia. Stratografiia Geokhronologiiia [Stratotype of Riphean. Stratigraphy. Geochronology]. Geokhronologiiia [Geochronology], 1983. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell Scientific, Oxford, 312 p.
- 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.
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P., 1988. Geokhimiia chernykh slantsev [Geochemistry of black shales]. Nauka, Leningrad. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P., 2000. Osnovy litokhimiia [Basics of lithochemistry]. Nauka, St. Petersburg. (In Russian)

Author's information:

Andrey V. Maslov — amas2004@mail.ru

Emir Z. Gareev — emirgareev2015@yandex.ru

Victor N. Podkovyrov — vpodk@mail.ru

Ludmila N. Kotova — l.n.kotova@ipgg.ru