

Синрифтовые осадочные образования машакской свиты среднего рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика)

А. В. Маслов^{1, 2}, Э. З. Гареев², В. Н. Подковыров³,
С. Г. Ковалев², 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., Ковалев С. Г., Котова Л. Н. Синрифтовые осадочные образования машакской свиты среднего рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 3. С. 303–325. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.304>

В статье приведена краткая характеристика литохимических особенностей песчаников и глинистых пород машакской свиты Южного Урала — второй синрифтовой осадочной ассоциации в стратотипе рифея. Показано, что слагающие ее песчаники характеризуются широкими вариациями валового химического состава — от вакки до кварцевых аренинов. Присутствие последних, а также относительно небольшая доля аркозов и субаркозов среди псаммитов отличают вторую синрифтовую ассоциацию от первой (айская свита бурзянской серии Южного Урала). На диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (Петтиджон и др., 1976) перекрытие между областями составов псаммитов машакской и айской свит отсутствует, что указывает на существенные различия питающих их провинций и общих особенностей накопления обломочных толщ указанных литостратиграфических подразделений. Глинистые породы машакской свиты по валовому химическому составу принадлежат к смектитовым (с примесью каолинита и иллита) глинам, а также их хлорит-смектит-иллитовым разностям. От глинистых пород айской свиты они отличаются меньшими значениями общей нормативной щелочности ($0,27 \pm 0,06$ против $0,42 \pm 0,07$). Установлено, что песчаники и глинистые породы машакской свиты содержат существенную долю петрогенного материала, т. е. сложены в основном продуктами, прошедшими один седиментационный цикл. Для песчаников первой синрифтовой ассоциации, напротив, характерна существенная доля литогенной кластики. Высокие (более 20) значения соотношения $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, свойственные примерно половине исследованных нами образцов тонкозернистых обломочных пород машакской свиты, указывают на то, что они испытали определенное влияние процессов калиевого метасоматоза. Распределение точек терригенных пород машакской свиты на диаграмме F1—F2 (Roser and Korsch, 1988) показывает, что они сложены продуктами размыва магматических и/или метаморфических пород кислого, среднего и основного состава. На диаграмме DF1—DF2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) индивидуальные точки составов терригенных пород машакской свиты, так же как и средняя точка состава песчаников, сосредоточены в полях рифтогенных и коллизионных обстановок. Это не позволяет сделать определенный вывод о принадлежности их

к какой-либо палеогеодинамической обстановке, и решающая роль здесь традиционно остается за общегеологическими данными и петрогеохимическими характеристиками магматических пород.

Ключевые слова: Южный Урал, средний рифей, машакская свита, песчаники, тонкозернистые обломочные породы, литохимия.

1. Введение

В верхнедокембрийско-палеозойской последовательности осадочных толщ западного склона Южного Урала несколько раз повторяются сходные по палеогеодинамическим обстановкам формирования крупные комплексы отложений — рифтогенные (базальные уровни бурзянской и юрматинской серий рифея, верхнекембрийско-нижнеордовикские образования), орогенные/коллизийные/молассовые (верхненевендские и верхнепермско-триасовые отложения) и др. Они достаточно хорошо изучены с позиций стратиграфии, литологии, петрографии, петрологии, минералогии и т. п., однако с позиций литохимических особенностей слагающих их осадочных пород, многие вопросы еще требуют обсуждения (Маслов и др., 2018b). Связано это с тем, что валовый химический состав осадочных образований многие годы не воспринимался исследователями как сколько-нибудь информативный, в отличие от пород магматических, однако, как понятно сейчас, это далеко не так.

В 1980–1990-х гг. Э. З. Гареевым (1989 и др.) выполнен крупный комплекс региональных геохимических исследований осадочных пород эталонного разреза рифея и ашинской серии венда. Анализ собранных при этом коллекций каменного материала актуален до настоящего времени и позволяет с успехом решать самые разнообразные задачи (Маслов и др., 2018b). В настоящей публикации систематизированы общие литохимические особенности терригенных пород среднерифейской синрифтовой осадочной ассоциации Башкирского мегантиклинория — машакской свиты, возраст риолитов и риодацитов в нижней части которой составляет 1383 ± 3 млн лет (U—Pb, SHRIMP-II) (Krasnobaev, et al., 2013), и проведено их сопоставление с аналогичными характеристиками раннерифейской синрифтовой ассоциации Башкирского мегантиклинория (айская свита).

2. Фактический материал

В основу статьи положено исследование выборки валовых химических анализов песчаников (85 образцов), а также тонкозернистых обломочных пород — глинистых сланцев и мелкозернистых глинистых алевролитов (31 образец) машакской свиты юрматинской серии среднего рифея Башкирского мегантиклинория, составленное по данным Банка «PrecSed» (ИГГД РАН, Санкт-Петербург, собранного А. В. Сочавой и В. Н. Подковыровым) и коллекций Э. З. Гареева и С. Г. Ковалева (ИГ БФ АН СССР/УНЦ РАН, Уфа), собранных в гипостратотипической местности (хр. Большой Шатак). Эти материалы получены в разные годы методами классической «мокрой химии» и рентгеноспектральным флуоресцентным, в различных исследовательских организациях, в том числе в Институте геологии БФ АН СССР/УНЦ РАН и Институте геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург) и центральной лаборатории ПГО «Севзапгеология» (Санкт-Петербург). Учтены только анализы

с потерями при прокаливании (ППП) менее 5%. Средние арифметические, минимальные и максимальные содержания основных породообразующих оксидов в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах исследованной выборки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Среднее, минимальное и максимальное содержание основных породообразующих оксидов в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты среднерифейской юрматинской серии

Компонент, % масс.	Песчаники	Глинистые сланцы и алевролиты
TiO ₂	$\frac{0,40 \pm 0,26}{0,07-1,18}$	$\frac{0,96 \pm 0,25}{0,58-1,62}$
Al ₂ O ₃	$\frac{6,99 \pm 5,71}{0,66-23,45}$	$\frac{19,27 \pm 2,23}{14,45-23,94}$
Fe ₂ O ₃ *	$\frac{3,52 \pm 1,94}{1,05-11,50}$	$\frac{7,68 \pm 2,26}{1,83-12,17}$
MnO	$\frac{0,02 \pm 0,01}{0,001-0,05}$	$\frac{0,03 \pm 0,02}{0,01-0,11}$
MgO	$\frac{0,81 \pm 0,74}{0,001-3,82}$	$\frac{2,13 \pm 1,04}{0,82-4,90}$
CaO	$\frac{0,29 \pm 0,35}{0,01-1,50}$	$\frac{0,39 \pm 0,31}{0,06-1,20}$
Na ₂ O	$\frac{0,14 \pm 0,22}{0,001-1,92}$	$\frac{0,40 \pm 0,34}{0,09-1,27}$
K ₂ O	$\frac{1,60 \pm 1,54}{0,04-6,76}$	$\frac{4,83 \pm 1,39}{2,47-6,87}$
P ₂ O ₅	$\frac{0,06 \pm 0,10}{0,001-0,86}$	$\frac{0,10 \pm 0,05}{0,01-0,20}$
ппп	$\frac{0,79 \pm 0,73}{0,02-2,59}$	$\frac{2,79 \pm 1,42}{0,70-4,80}$
Сумма	$\frac{100,25 \pm 0,50}{99,10-101,10}$	$\frac{100,39 \pm 0,64}{99,22-101,18}$

Примечание: числитель — среднее арифметическое и стандартное отклонение, знаменатель — минимальное и максимальное значения.

* Суммарное железо.

3. Литостратиграфия стратотипа рифея

Стратотипический разрез рифея объединяет три крупные седиментационные серии — бурзянскую, юрматинскую и каратаускую (Стратотип..., 1983; Семихатов и др., 1991; Семихатов, 2008; Семихатов и др., 2015; Маслов и др., 2002 и др.). Бурзянская серия (типичное подразделение нижнего рифея) включает в северо-восточных районах мегантиклинория айскую (первая синрифтовая осадочная ассоциация), саткинскую и бакальскую свиты (рис. 1). В нижней части айской свиты преобладают песчаники с линзами гравелитов и конгломератов и покровами

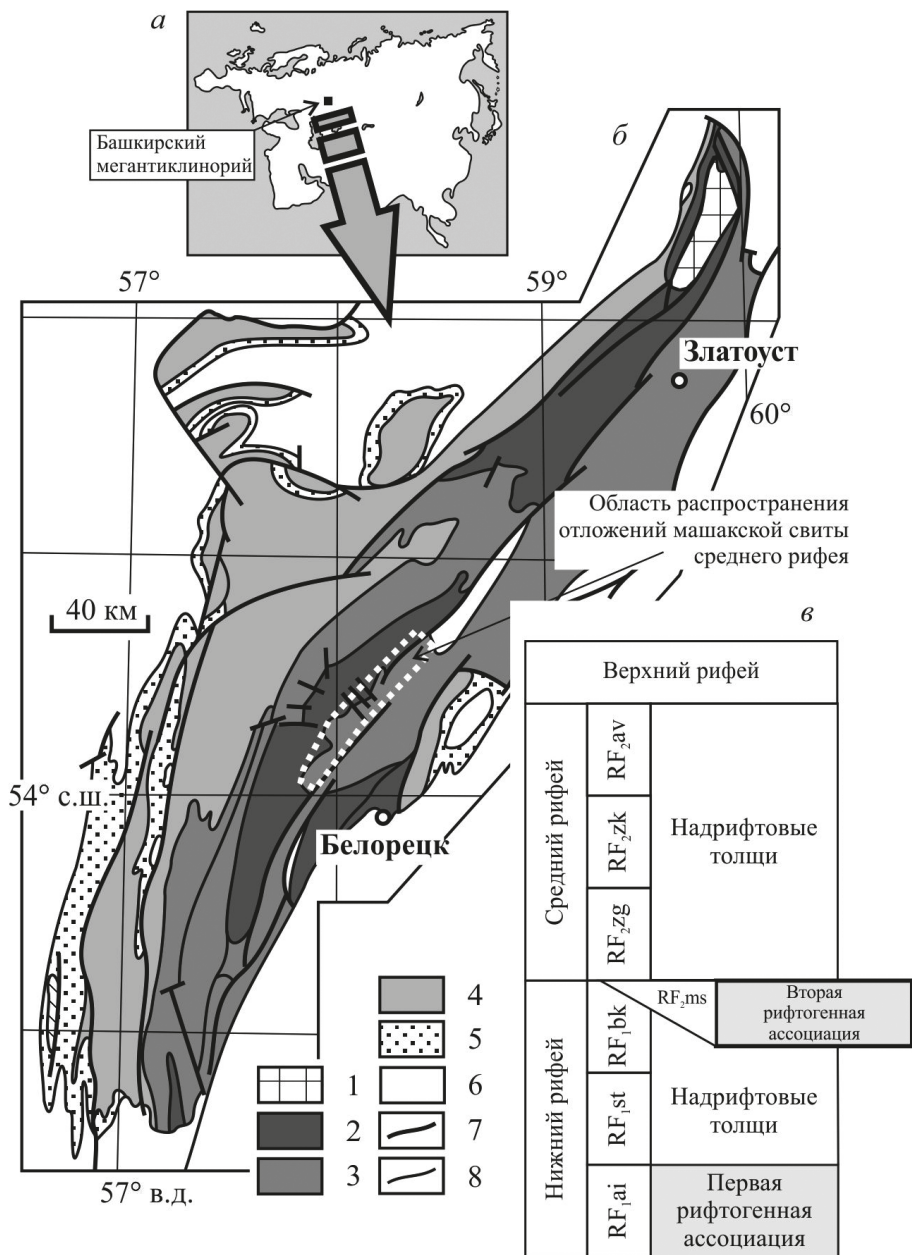


Рис. 1. Обзорная схема (а), схематическая геологическая карта Башкирского мегантиклинория (б) и распределение различных осадочных ассоциаций в разрезах нижнего и среднего рифея (в)

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: RF_{1ai} — айская; RF_{1st} — саткинская; RF_{1bk} — бакальская; RF_{2ms} — машакская; RF_{2zg} — зигальгинская; RF_{2zk} — зигазино-комаровская; RF_{2av} — авзянская

(потоками?) метабазальтов, а в верхней — низкоуглеродистые глинистые сланцы (НГС)¹ с прослоями песчаников и алевролитов. Общая мощность айской свиты составляет 1700–2500 м. Саткинская свита (до 3000–3500 м) сложена преимущественно доломитами; в средней ее части присутствует 180–200-метровая толща НГС с прослоями доломитов и алевролитов. Бакальская свита (1500–1650 м) представлена в нижней части в основном НГС, а в верхней — объединяет несколько силикокластических и карбонатных пачек.

Юрматинская серия (типовое подразделение среднего рифея) включает машакскую, зигальгинскую, зигазино-комаровскую и авзянскую свиты. 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 силлы долеритов, потоки и покровы базальтов и экструзивно-субвулканические тела кислых магматических пород. Это вторая синрифтовая ассоциация в эталонном разрезе рифея (Иванов, 1980; Формирование..., 1986; Парначев, 1988; Пучков, 2010). Зигальгинская свита (500–700 м) слагается преимущественно кварцевыми песчаниками. Зигазино-комаровская свита (750–1500 м) объединяет пачки неравномерного переслаивания НГС, алевролитов и песчаников. Авзянская свита (1600–2300 м) представлена несколькими карбонатными и терригенными толщами.

Машакская свита прослеживается почти непрерывной полосой (протяженностью примерно 270 км, шириной 5–10 км) от г. Златоуста на севере до широты п. Верхний Авзян на юге (Пучков, 2000; Ларионов и др., 2006). В центральной части Башкирского мегантиклинория (северная половина Ямантауского антиклинория) доля магматических пород в разрезах машакской свиты достигает 70–80 % (Ротарь, 1974; Стратотип..., 1983). Относительно стратиграфического расчленения этой свиты существуют разные точки зрения (Ротарь, 1974; Стратотип..., 1983; Парначев и др., 1986; Ларионов и др., 2006; Козлов и др., 2007 и др.). Не останавливаясь на них подробно, отметим только, что, по представлениям (Козлов и др., 2007; Краснобаев и др., 2013), машакская свита объединяет три подсвиты. Нижняя подсвита (мощность примерно 800–1000 м) включает метабазальты, риодациты, НГС, алевролиты, песчаники и конгломераты. В схеме расчленения машакской свиты (Ротарь, 1974) указанная подсвита соответствует кузьелгинской, казавдинской и быковской подсвитам. Средняя подсвита (мощность до 900 м) объединяет песчаники, метабазальты, кварцито-песчаники, туфопесчаники и туфоалевролиты. Подчиненную роль в ее составе играют алевролиты и конгломераты. Эта подсвита соответствует калпакской, куянтавской и каранской подсвитам (Ротарь, 1974). Верхняя подсвита (1100–1200 м) представлена песчаниками, алевролитами и НГС с прослоями туфоалевролитов и известковистых доломитов. В схеме А. Ф. Ротаря она соответствует шакитарской и ямантауской подсвитам. По ранее полученным данным, машакская свита может быть расчленена на четыре подсвиты, «...образующие на хр. Большой Шатак сдвоенный разрез. Первые три практически совпадают с ранее выделенными ... кузьелгинской, казавдинской и быковской подсвитами. Верхняя (четвертая) толща показана нами как нерасчлененные калпакская, куянтавская, каранская, ша-

¹ В соответствии с представлениями (Юдович и Кетрис, 1988), к ним относятся черные сланцы с содержанием $C_{орг}$ от 1 до 3 % масс.

китарская и ямантауская, хотя объем ее не вполне соответствует объему перечисленных подсвит» (Ларионов и др., 2006, с. 24, 25).

Каратауская серия (тип верхнего рифея) объединяет ряд терригенных (зильмердакская, инзерская, криволукская) и карбонатных (катавская, миньярская, укская) свит (Стратотип..., 1983; Маслов, 1988 и др.). На восточном крыле Башкирского мегантиклинория выше укской свиты в составе серии присутствует криволукская свита (400–500 м), сложенная песчаниками, филлитовидными сланцами и алевролитами с прослоями известняков. Синрифтовые осадочные ассоциации в разрезе каратауской серии отсутствуют.

4. Условия формирования осадочных ассоциаций стратотипа рифея (эволюция представлений)

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

Позднее получили распространение представления о том, что в раннем и среднем рифее в области сочленения современного западного склона Южного Урала и прилежащих к ней районов Восточно-Европейской платформы существовали относительно небольшие эпикратонные/надрифтовые 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.).

В последние годы были сформулированы предположения (Пучков, 2013; Пучков, 2016, и др.), что процессы внутриконтинентального рифтогенеза начала раннего и среднего рифея были связаны с несколькими субглобальными плюмовыми событиями. Именно они и привели к появлению в стратотипическом разрезе рифея нескольких синрифтовых вулканогенно-осадочных ассоциаций, объединяющих конгломераты, микститы, разнотерристые песчаники, НГС, основные и кислые вулканиты.

5. Результаты исследований и их обсуждение

На диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ (Herron, 1988) точки состава песчаников второй синрифтовой ассоциации присутствуют практически во всех ее классификационных областях — от вакк до кварцевых аренигов (рис. 2, а); основная масса их сосредоточена в областях вакк, литаренигов и сублитаренигов, Fe-песчаников. Точки состава тонкозернистых обломочных пород машакской свиты тяготеют к областям сланцев (преобладают) и вакк. Для сравнения на этом же графике показано поле составов терригенных пород первой синрифтовой ассоциации типового разреза рифея — айской свиты нижнего рифея. Оно также характеризуется существенной пестротой составов слагающих его пород, однако практически не содержит кварцевых аренигов, тогда как роль аркозов и субаркозов в разрезах айской свиты несколько выше, чем в разрезах машакского уровня.

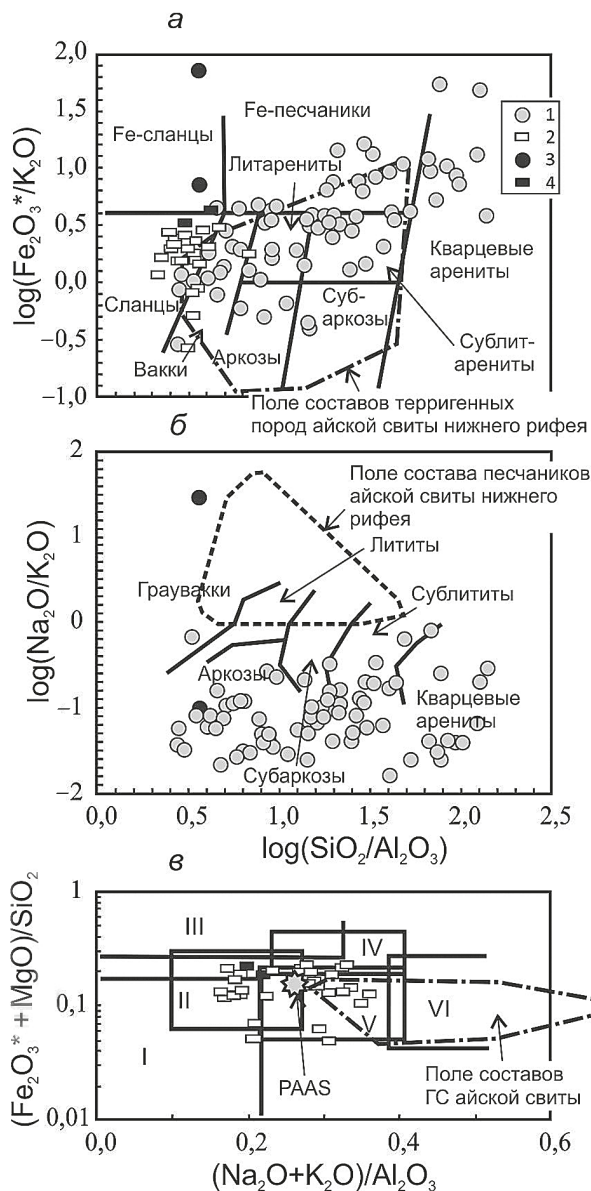


Рис. 2. Положение точек состава песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской свиты на классификационных диаграммах $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ (а), $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (б) и $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (в)

1 — песчаники; 2 — глинистые породы; 3 — туфопесчаники (?); 4 — туфоаргиллиты (?)

Поля глин: I — преимущественно каолиновых; II — преимущественно смектитовых с примесью каолинита и иллита; III — преимущественно хлоритовых с примесью Fe-иллитов; IV — хлорит-иллитовых; V — хлорит-смектит-иллитовых; VI — иллитовых со значительной примесью дисперсных полевых шпатов; ГС — глинистые сланцы

По данным микропетрографических исследований, в разрезах машакской свиты присутствуют кварцевые, полевошпато- и литокласто-кварцевые песчаники (Ротарь, 1976; Парначев и др., 1986; Маслов, 1995). Наряду с зернами кварца и полевых шпатов в их каркасе наблюдаются фрагменты алевролитов, микрокварцитов, «зеленых» сланцев, гематитизированные обломки основных эффузивов и, редко, карбонатных пород. Присутствующие среди песчаников пласты и линзы конгломератов сложены довольно бедной гаммой обломков. По данным (Ротарь, 1976; Парначев и др., 1986) и нашим наблюдениям, среди них преобладают кварцито-песчаники; в конгломератах нижних уровней разреза машакской свиты иногда можно видеть обломки филлитовидных сланцев, сходных с теми, что типичны для подстилающей юшинской свиты. Для конгломератов средних и верхних уровней характерны также обломки хлоритизированных и эпидотизированных основных эффузивов (Ротарь, 1976).

На классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (Петтиджон и др., 1976) распределение точек составов песчаников машакской и айской свит несколько иное (см. рис. 2, б). Песчаники машакской свиты присутствуют здесь преимущественно в полях аркозов, сублититов и кварцевых аренитов и характеризуются значениями $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) < 0$, тогда как песчаники айской свиты, для которых $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) > 0$, тяготеют к полям граувакк, лититов и субаркозов. Перекрытие между областями составов песчаников второй и первой синрифтовых ассоциаций эталонного разреза рифея на указанной диаграмме отсутствует.

Так как в случае с осадочными образованиями машакской свиты мы имеем дело с синрифтовыми образованиями, то логично ожидать, что они должны быть представлены в основном слабо преобразованным при перемещении и быстро накапливавшимся материалом. В работе (Юдович и Кетрис, 2000) показано, что в петрогенных (прошедших один цикл седиментации) осадочных породах, как правило, сохраняются исходные корреляционные связи между литохимическими модулями:

- между титановым (ТМ) и железным (ЖМ) модулями наблюдается положительная корреляция,
- между модулем общей щелочности (НКМ) и гидролизатным (ГМ²) корреляция отсутствует.

Для песчаников машакской свиты корреляция между ТМ и ЖМ положительная ($r = 0,59$), а между НКМ и ГМ она отсутствует ($r = -0,03$) (рис. 3, а и б). Исходя из сказанного, псаммиты второй синрифтовой ассоциации в стратотипическом разрезе рифея Южного Урала можно рассматривать, по всей видимости, как породы с заметной долей петрогенного материала. Песчаники первой синрифтовой ассоциации (айская свита) к этой категории не принадлежат (Маслов и др., 2018б).

На классификационной диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (Юдович и Кетрис, 2000) точки глинистых сланцев и алевролитов машакской свиты сосредоточены в основном в зоне перекрытия областей I (преимущественно каолиновые глины) и II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и иллита глины) и области V (хлорит-смектит-иллитовые глины) (см. рис. 2, в). Поле

² Перечисленные модули рассчитываются по содержаниям основных породообразующих оксидов:

$$\text{ТМ} = \text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3, \text{ ЖМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3), \\ \text{НКМ} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3, \text{ ГМ} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / \text{SiO}_2.$$

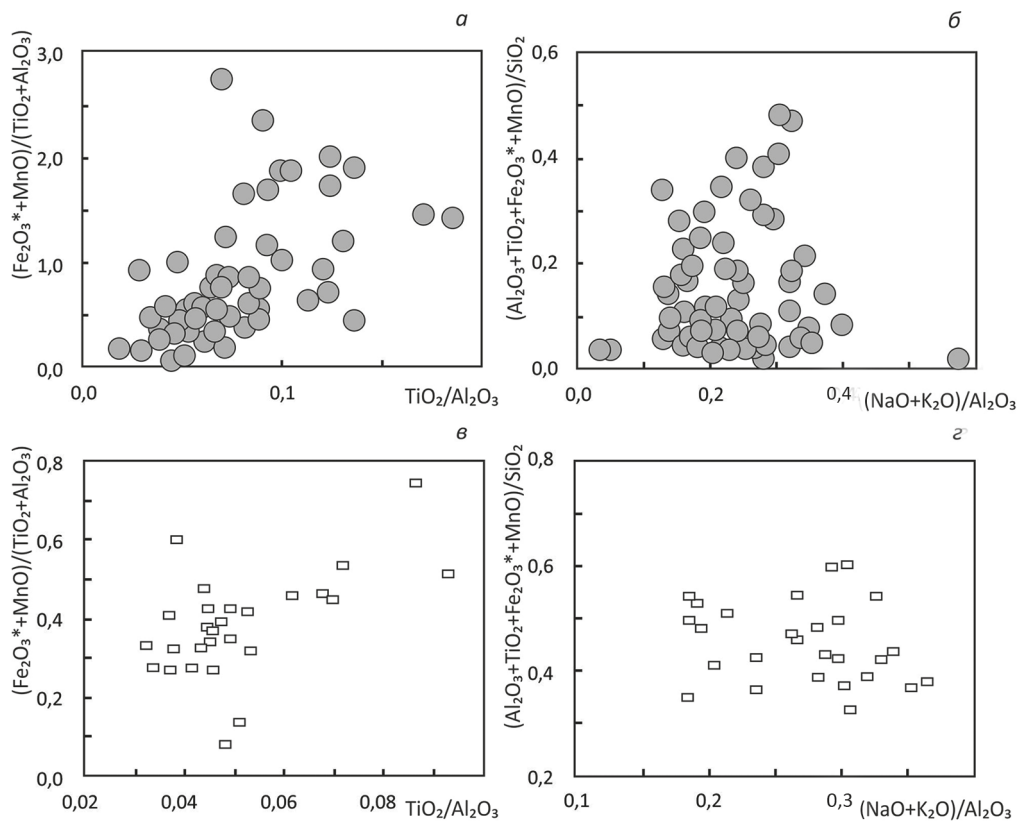


Рис. 3. Корреляция модулей ТМ и ЖМ и НКМ и ГМ в песчаниках (а, б) и глинистых породах (в, г) машакской свиты

Условные обозначения см. рис. 2

составов синрифтовых тонкозернистых обломочных пород айской свиты смещено относительно поля аналогичных по гранулометрическому составу пород машакской свиты в область больших значений параметра $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Среднее содержание MgO в тонкозернистых обломочных породах машакской свиты составляет $2,1 \pm 1,0$ % масс. (минимум и максимум — соответственно 0,8 и 4,9 % масс.). Из 31 образца глинистых сланцев и алевролитов только для 5 характерно содержание MgO более 3 % масс. (по этому значению разделяют «обычные» глинистые породы и породы с примесью так называемой камуфлированной пирокластики, по (Юдович и Кетрис, 2000)). По всей видимости, в составе тонкозернистых обломочных пород машакской свиты камуфлированная пирокластика отсутствует.

Тонкозернистые обломочные породы машакской свиты характеризуются выраженной положительной корреляцией между ТМ и ЖМ ($r=0,54$) и слабой отрицательной корреляцией между НКМ и ГМ ($r=-0,17$) (см. рис. 3, в и г). Вместе с приведенными выше аналогичными данными для песчаников это дает основание предполагать, что глинистые породы исследованной нами выборки имеют в своем составе заметную долю петрогенного материала. В то же время среднее значение

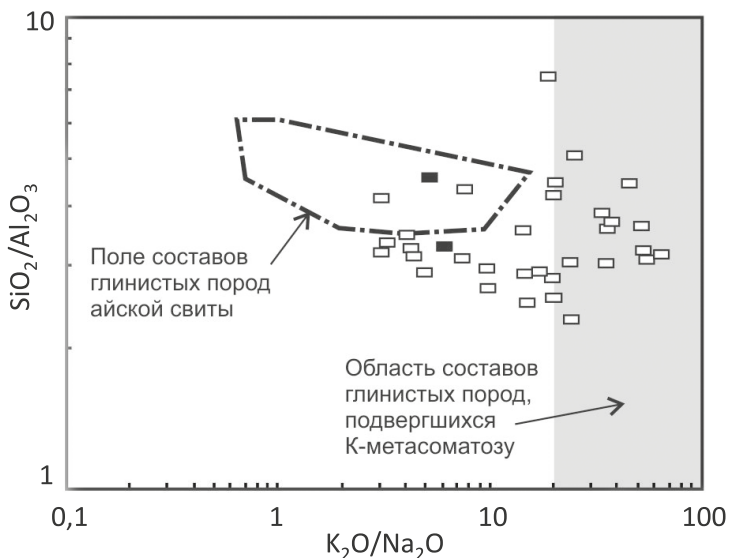


Рис. 4. Положение точек тонкозернистых обломочных пород машакской свиты на диаграмме $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$
 Условные обозначения см. рис. 2

K_2O/Al_2O_3 составляет для них $0,25 \pm 0,07$, при этом в 5 образцах из 31 данный параметр равен или выше 0,30 — порогового значения, разделяющего, по мнению (Сох, et al., 1995), литогенные и петрогенные глинистые породы.

На диаграмме $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ примерно половина точек, соответствующих тонкозернистым обломочным породам машакской свиты, расположена в области со значениями K_2O/Na_2O более 20 (рис. 4), рассматривающейся как область составов, для которой можно предполагать проявление калиевого метасоматоза (Bolnar, et al., 2005). Среднее значение K_2O/Na_2O для всей выборки составляет $22,5 \pm 17,9$ (минимум — 2,8, максимум — 61,0). При этом для проб с $K_2O/Na_2O < 20$ среднее значение данного параметра равно $9,3 \pm 5,6$. Таким образом, примерно половина образцов тонкозернистых обломочных пород машакской свиты из нашей выборки демонстрирует признаки влияния К-метасоматоза, тогда как для глинистых пород первой синрифтовой ассоциации (айская свита) это в целом не характерно (Маслов и др., 2018b). В песчаниках машакской свиты явно выраженных признаков К-метасоматоза не наблюдается.

Для тонкозернистых обломочных образований машакской свиты среднее значение химического индекса изменения (CIA^3) составляет 75 ± 4 , что заметно выше, чем для глинистых пород айской свиты (для них $CIA = 63 \pm 4$). Это может указывать на относительно хорошо проявленное химическое выветривание пород-источников тонкой алюмосиликокластики.

³ Химический индекс изменения рассчитывается по формуле

$$CIA = 100 \cdot (Al_2O_3) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O),$$

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

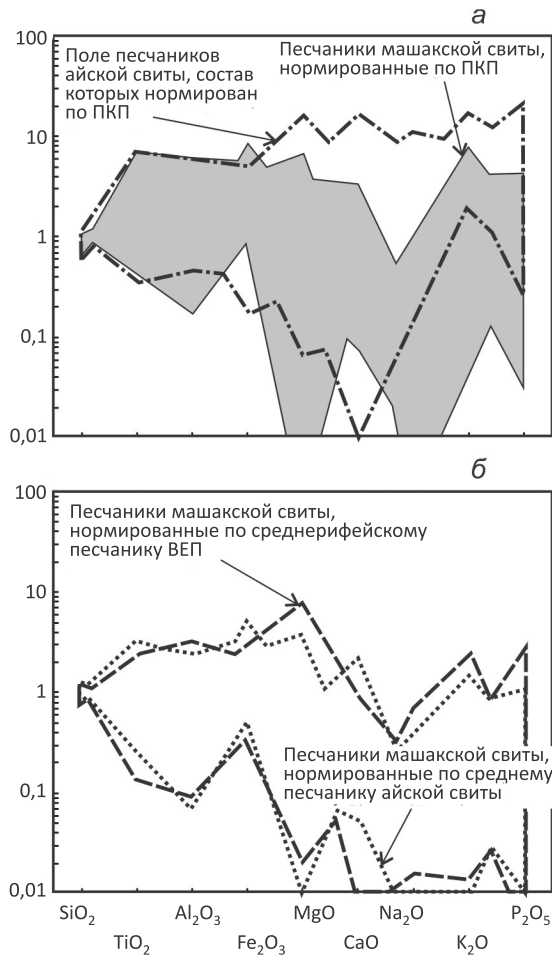


Рис. 5. Распределение основных породообразующих оксидов в песчаниках машакской свиты, нормированных по ПКП (а), алевропесчаным породам среднего рифея Восточно-Европейской плиты (Ронов и др., 1995) и среднему песчанику айской свиты (первая синрифтовая ассоциация) (б)

Сравнение валового химического состава песчаников машакской синрифтовой ассоциации с составом среднего протерозойского кратонного песчаника (ПКП) (Condie, 1993) показывает наличие в них достаточно широких вариаций содержаний ряда основных породообразующих оксидов (рис. 5, а). При этом только среднее содержание оксида кремния примерно сопоставимо с содержанием данного компонента в ПКП ($0,9 \times$ ПКП, минимум — $0,7$, максимум — $1,1$) (табл. 2, графа А). Средние содержания оксидов титана и железа варьируют соответственно примерно от $2,3 \times$ ПКП до $2,6 \times$ ПКП. Средние содержания оксидов алюминия, магния, калия и фосфора составляют от $1,5 \times$ ПКП до $1,8 \times$ ПКП. Распределение основных породообразующих оксидов в песчаниках первой синрифтовой ассоциации (айская свита) несколько иное (см. рис. 5, а).

Таблица 2. Средние значения и пределы изменения содержаний основных породообразующих оксидов в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты, нормированные по составу ряда референтных геологических объектов

Компонент, % масс.	А	Б	В	Г	Д
SiO ₂	$\frac{0,93 \pm 0,10}{0,66-1,06}$	$\frac{1,06 \pm 0,11}{0,75-1,20}$	$\frac{1,09 \pm 0,12}{0,78-1,24}$	$\frac{1,01 \pm 0,09}{0,86-1,29}$	$\frac{0,97 \pm 0,09}{0,82-1,24}$
TiO ₂	$\frac{2,33 \pm 1,54}{0,41-6,94}$	$\frac{0,80 \pm 0,53}{0,14-2,36}$	$\frac{1,05 \pm 0,69}{0,18-3,11}$	$\frac{0,94 \pm 0,25}{0,55-1,62}$	$\frac{1,31 \pm 0,35}{0,76-2,25}$
Al ₂ O ₃	$\frac{1,77 \pm 1,46}{0,17-6,06}$	$\frac{0,92 \pm 0,75}{0,09-3,09}$	$\frac{0,72 \pm 0,59}{0,07-2,43}$	$\frac{0,99 \pm 0,15}{0,58-1,27}$	$\frac{1,17 \pm 0,17}{0,68-1,49}$
Fe ₂ O ₃ *	$\frac{2,64 \pm 1,46}{0,80-8,71}$	$\frac{1,01 \pm 0,56}{0,30-3,30}$	$\frac{1,56 \pm 0,86}{0,46-5,09}$	$\frac{1,04 \pm 0,33}{0,26-1,70}$	$\frac{1,57 \pm 0,49}{0,39-2,58}$
MnO	—	—	—	$\frac{0,23 \pm 0,20}{0,09-1,00}$	$\frac{0,83 \pm 0,72}{0,33-3,67}$
MgO	$\frac{1,46 \pm 1,35}{0,001-6,95}$	$\frac{1,77 \pm 1,54}{0,02-7,96}$	$\frac{0,84 \pm 0,73}{0,01-3,78}$	$\frac{0,92 \pm 0,48}{0,17-2,23}$	$\frac{0,89 \pm 0,47}{0,16-2,16}$
CaO	$\frac{0,64 \pm 0,78}{0,02-3,33}$	$\frac{0,18 \pm 0,22}{0,01-0,94}$	$\frac{0,43 \pm 0,52}{0,01-2,24}$	$\frac{0,27 \pm 0,24}{0,04-0,92}$	$\frac{0,56 \pm 0,48}{0,09-1,88}$
Na ₂ O	$\frac{0,27 \pm 0,43}{0,002-3,77}$	$\frac{0,22 \pm 0,35}{0,002-3,05}$	$\frac{0,11 \pm 0,17}{0,001-1,54}$	$\frac{0,31 \pm 0,28}{0,06-1,06}$	$\frac{0,19 \pm 0,17}{0,04-0,65}$
K ₂ O	$\frac{1,78 \pm 1,72}{0,05-7,68}$	$\frac{0,56 \pm 0,54}{0,01-2,36}$	$\frac{0,35 \pm 0,34}{0,01-1,48}$	$\frac{1,25 \pm 0,41}{0,59-1,86}$	$\frac{0,94 \pm 0,31}{0,45-1,40}$
P ₂ O ₅	$\frac{1,81 \pm 3,17}{0,03-28,67}$	$\frac{0,17 \pm 0,30}{0,003-2,69}$	$\frac{0,46 \pm 0,80}{0,01-7,17}$	$\frac{0,63 \pm 0,30}{0,08-1,25}$	$\frac{0,59 \pm 0,28}{0,08-1,18}$

Примечание. А — по составу ПКП (Condie, 1993); Б — по составу ССП ВЕП (Ронов и др., 1995); В — по среднему составу песчаников айской свиты бурзянской серии (первая синрифтовая ассоциация); Г — по РААС; Д — по среднему составу глинистых пород айской свиты. Прочерк — нет данных.

При сопоставлении распределения основных породообразующих оксидов в песчаниках машакской свиты и среднем среднерифейском алевропесчанике (ССП) Восточно-Европейской плиты (Ронов и др., 1995) (см. рис. 5, б) можно видеть, что оба объекта характеризуются близкими средними содержаниями оксидов кремния, алюминия и железа (см. табл. 2, графа Б). Средние содержания оксида титана в песчаниках машакской свиты несколько ниже, а оксидов кальция, натрия, калия и фосфора существенно ниже, чем в ССП (Ронов и др., 1995), тогда как среднее содержание MgO составляет примерно 1,8 × ССП.

Наконец, сравнение средних содержаний основных породообразующих компонентов в песчаниках первой и второй синрифтовых ассоциаций показывает, что они сопоставимы по SiO₂ и TiO₂ (см. рис. 5, б, и табл. 2, графа В), но существенно различаются по средним содержаниям оксидов кальция, натрия, калия и фосфора.

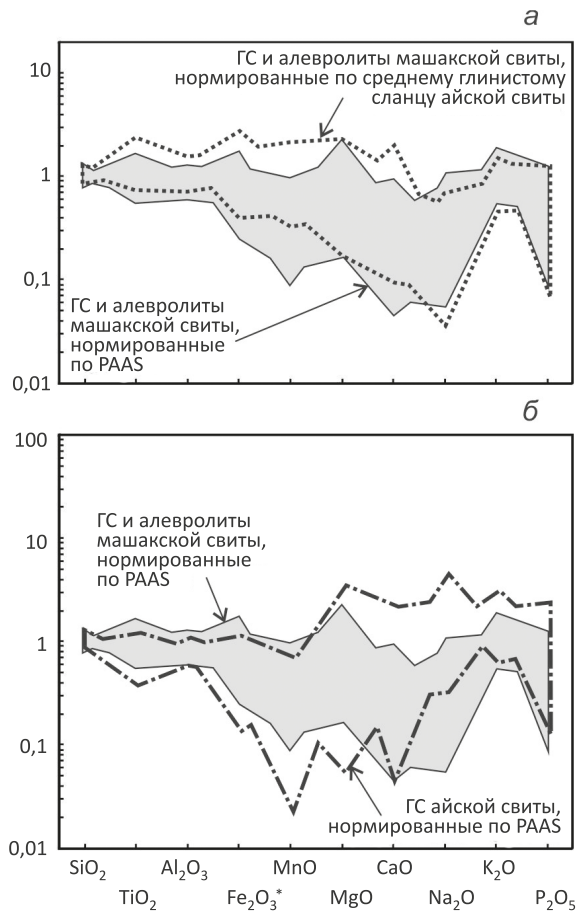


Рис. 6. Распределение основных породообразующих оксидов в тонкозернистых обломочных породах машакской свиты, нормированных по PAAS и среднему глинистому сланцу айской свиты (а) и сопоставление составов глинистых пород машакской и айской свит, нормированных к PAAS (б)

ГС — глинистые сланцы

Концентрации последних в песчаниках машакской свиты составляют менее половины от их содержаний в псаммитях айского уровня.

Тонкозернистые обломочные породы машакской свиты характеризуются близкими к PAAS⁴ средними содержаниями оксидов кремния, титана, алюминия, железа и магния (см. табл. 2, графа Г, рис. 6, а); глинистые сланцы айской свиты, напротив, сопоставимы с PAAS только по средним концентрациям трех оксидов — кремния, магния и фосфора (Маслов и др., 2018b). Средние содержания оксидов марганца, кальция, натрия и фосфора в глинистых породах машакского уровня заметно ниже, чем в PAAS, а оксида калия — немного выше ($1,25 \times$ PAAS). Распре-

⁴ Post Archean Australian Average Shale — средний постархейский австралийский глинистый сланец (Taylor and McLennan, 1985).

деление перечисленных элементов в тонкозернистых обломочных породах айской свиты несколько иное (см. рис. 6б).

Если же сопоставить средние содержания основных породообразующих оксидов в тонкозернистых обломочных породах первой и второй синрифтовых осадочных ассоциаций стратотипа рифея, то мы увидим следующее. Средние содержания оксидов кремния, алюминия, магния и калия в обоих объектах статистически не отличаются (см. табл. 2, графа Д, рис. 6, а). Значения TiO_{2cp} и $Fe_2O_3^*_{cp}$ в породах машакской свиты в той или иной степени выше, чем в глинистых сланцах айского уровня, а средние содержания оксидов марганца, кальция, натрия и фосфора ниже (так, значение CaO_{cp} составляет только примерно 0,6, а Na_2O_{cp} — всего 0,2 концентрации указанных оксидов в глинистых породах айской свиты). Это можно интерпретировать и как отражение присутствия в источниках сноса пород с повышенными содержаниями оксидов титана и железа (см. ниже), и как следствие влияния выветривания с выводом из системы оксидов кальция и натрия.

Исходя из валового химического состава осадочных пород, в определенной мере можно судить как о составе пород-источников обломочного материала для них, так и о палеогеодинамических обстановках накопления осадочных последовательностей. Для реконструкции состава пород на палеоводосборах обычно используется ряд диаграмм, в том числе диаграмма F1—F2⁵ (Roser and Korsch, 1988). Распределение фигуративных точек песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской и айской свит на этом графике показано на рис. 7. Первые локализованы в основном в областях состава, представляющих продукты размыва магматических и/или метаморфических пород кислого, среднего и основного состава; примерно также позиционировано на диаграмме F1—F2 поле составов терригенных пород надрифтовых образований среднего рифея Башкирского мегантиклинория — зигаино-комаровской и авзянской свит. Вторые тяготеют к областям, характерным для обломочного материала, образованного за счет эрозии кислых магматических/метаморфических и осадочных пород.

К числу более или менее уверенно распознаваемых по валовому химическому составу осадочных пород палеогеодинамических обстановок относятся пассивные и активные, в том числе с островными дугами разных типов, континентальные окраины, а также области проявления коллизионных и рифтогенных процессов. Последние обрели свою область только на недавно опубликованных дискриминантных диаграммах DF1—DF2⁶ для терригенных пород с низким (35–63%) и вы-

⁵ Здесь

$$F1 = 30,638(TiO_2/Al_2O_3) - 12,541(Fe_2O_3^*/Al_2O_3) + 7,329(MgO/Al_2O_3) + 12,031(Na_2O/Al_2O_3) + 35,402(K_2O/Al_2O_3) - 6,382, F_2 = 56,5(TiO_2/Al_2O_3) - 10,879(Fe_2O_3^*/Al_2O_3) + 30,875(MgO/Al_2O_3) - 5,404(Na_2O/Al_2O_3) + 11,112(K_2O/Al_2O_3) - 3,89.$$

⁶ Здесь

$$DF1 = [-0,263\ln(TiO_2/SiO_2)_{adj}] + [0,604\ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj}] + [-1,725\ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj}] + [0,660\ln(MnO/SiO_2)_{adj}] + [2,191\ln(MgO/SiO_2)_{adj}] + [0,144\ln(CaO/SiO_2)_{adj}] + [-1,304\ln(Na_2O/SiO_2)_{adj}] + [0,054\ln(K_2O/SiO_2)_{adj}] + [-0,330\ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj}] + 1,588, DF_2 = [-1,196\ln(TiO_2/SiO_2)_{adj}] + [1,064\ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj}] + [0,303\ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj}] + [0,436\ln(MnO/SiO_2)_{adj}] + [0,838\ln(MgO/SiO_2)_{adj}] + [-0,407\ln(CaO/SiO_2)_{adj}] + [1,021\ln(Na_2O/SiO_2)_{adj}] + [-1,706\ln(K_2O/SiO_2)_{adj}] + [-0,126\ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj}] - 1,068.$$

Подиндекс adj означает, что расчет ведется по содержаниям оксидов, приведенных к 100% сухого вещества. В то же время нами показано (Маслов и др., 2018а), что значения DF можно определять и без такого пересчета.



Рис. 7. Распределение точек состава песчаников и глинистых пород машакской свиты на диаграмме F1—F2

Условные обозначения см. рис. 2. Поле составов песчаников и глинистых пород айской свиты — по (Маслов и др., 2018b), поле составов терригенных пород надрифтовых толщ среднего рифея Башкирского мегантиклинория — оригинальные авторские данные

соким (63–95 %) содержанием SiO_2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013). Так как в составе проанализированной нами коллекции терригенных пород машакской свиты присутствуют пробы и с низкими, и высокими содержаниями оксида кремния, то для решения вопроса об их палеогеодинамической природе использованы обе диаграммы.

Точки состава песчаников и глинистых пород машакской свиты распределены на низкокремнистой диаграмме DF1—DF2 в основном в области составов, характерных для осадочных пород коллизионных обстановок. Небольшое число их присутствует также в области, типичной для рифтогенных образований (рис. 8, а). Примерно так же распределены здесь терригенные породы зигазино-комаровской и авзянской свит юрматинской серии, относимые по геологическим данным к осадочным толщам «надрифтовой природы». На высококремнистой диаграмме DF1—DF2 (см. рис. 8, б) точки песчаников машакской синрифтовой ассоциации локализованы примерно поровну в областях составов, типичных для коллизионных и рифтогенных обстановок, тогда как точки тонкозернистых обломочных пород тяготеют в большей степени к последней области. Очевидно, что такое распределение, как и в случае терригенных пород первой синрифтовой ассоциации (Маслов и др., 2018b), не позволяет сделать какого-либо определенного вывода о принадлежности песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской свиты к какой-либо палеогеодинамической обстановке. Средняя точка песчаников машакской свиты расположена вблизи линии, разграничивающей области составов, характерных для рифтогенных и коллизионных обстановок (см. рис. 8, в), что также не позволяет сделать корректный вывод. Большая часть поля составов терриген-

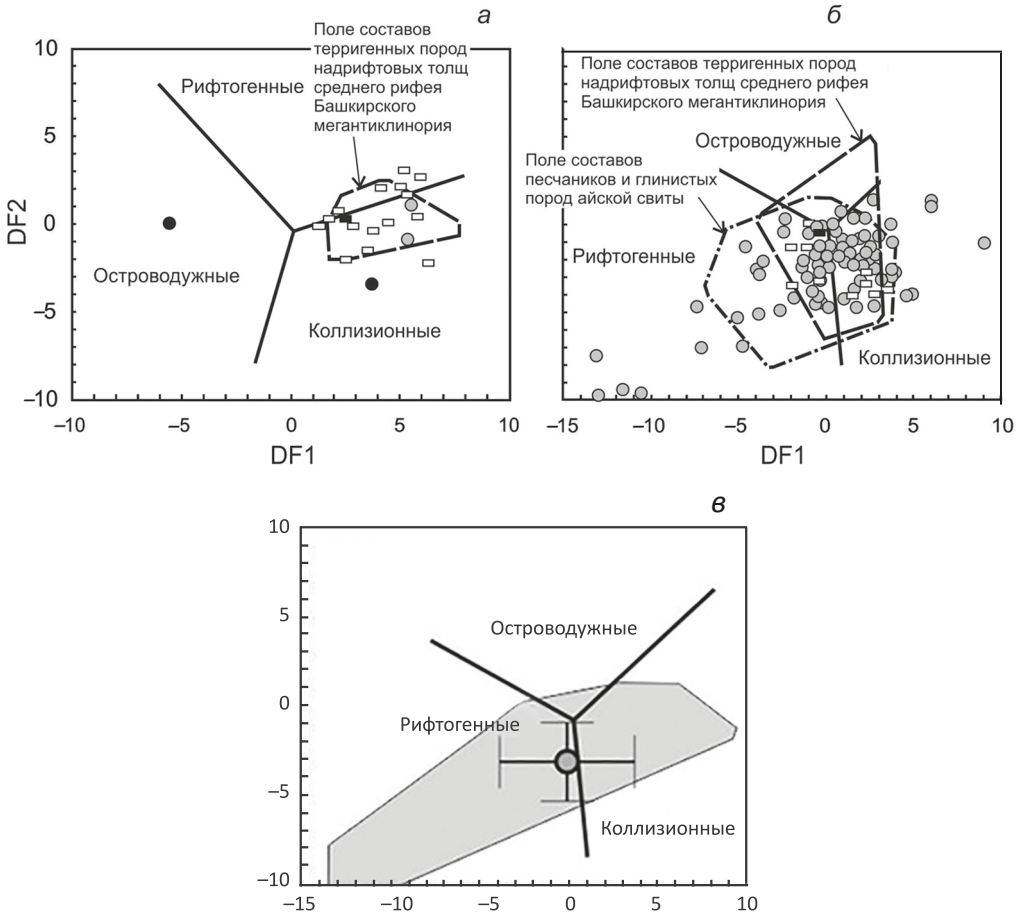


Рис. 8. Распределение частных (а, б) фигуративных точек состава песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской свиты и положение средней точки состава песчаников той же свиты (в) на диаграмме DF1—DF2 (серый фон — общее поле терригенных пород машакской свиты)

Условные обозначения см. рис. 2. Поле составов песчаников и глинистых пород айской свиты — по (Маслов и др., 2018b), поле составов терригенных пород надрифтовых толщ среднего рифея Башкирского мегантиклинория — оригинальные авторские данные

ных образований айской свиты (первая синрифтовая ассоциация) на этом графике соответствует области составов, характерных для рифтогенных обстановок, тогда как поле составов надрифтовых образований среднерифейской юрматинской серии (без пород зигальгинской свиты) тяготеет к точке схождения линий, разграничивающих классификационные области данной диаграммы. Исходя из сказанного, можно констатировать, что сделать какой-либо определенный вывод о палеогеодинамической природе терригенных пород машакской свиты из расположения их точек состава на диаграмме DF1—DF2 невозможно.

6. Заключение

Песчаники машакской свиты (вторая синрифтовая ассоциация стратотипического разреза рифея Южного Урала) характеризуются широкими вариациями

валового химического состава. На классификационных диаграммах их точки распределены в полях от вакк до кварцевых аренигов. Последние практически не характерны для первой синрифтовой ассоциации стратотипа рифея (айская свита), тогда как роль аркозов и субаркозов в ее разрезах несколько выше, чем в разрезах машакской свиты. Перекрывание между областями составов песчаников машакской и айской свит на диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (Петтиджон и др., 1976) отсутствует, что предполагает существенные различия питавших их провинций и общих особенностей накопления.

Тонкозернистые обломочные породы машакской свиты по валовому химическому составу близки к преимущественно смектитовым с примесью каолинита и иллита глинам, а также их хлорит-смектит-иллитовым разностям. От аналогичных по гранулометрическому составу пород айской свиты они отличаются меньшими значениями параметра $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ (общей нормативной щелочности). В их составе отсутствует так называемая камуфлированная пирокластика, что согласуется с общей геологической ситуацией (преобладание в разрезах свиты потоков/покровов метабазальтов, излияния которых не сопровождалось взрывными процессами).

Песчаники и тонкозернистые обломочные породы машакской свиты содержат существенную долю петрогенного материала, т. е. сложены в основном продуктами, прошедшими всего один седиментационный цикл. Песчаники первой синрифтовой ассоциации имеют, напротив, существенную долю литогенной кластики. Значительная часть глинистых сланцев машакской свиты испытала, по всей видимости, определенное влияние процессов калиевого метасоматоза (для глинистых пород айской свиты это не характерно).

Распределения основных породообразующих оксидов в песчаниках машакской и айской несколько различаются. Они сопоставимы по средним содержаниям SiO_2 и TiO_2 , но различаются по средним содержаниям CaO , Na_2O , K_2O и P_2O_5 . Ассоциирующие с ними тонкозернистые обломочные породы характеризуются близкими к PAAS средними содержаниями SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3^* и MgO , тогда как глинистые сланцы айской свиты сопоставимы с PAAS только по средним содержаниям SiO_2 , MgO и P_2O_5 .

Распределение фигуративных точек песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской и айской свит на диаграмме F1—F2 (Roser and Korsch, 1988), позволяющей судить о составе пород-источников обломочного материала, показывает, что терригенные породы машакского уровня стратотипа рифея сложены продуктами размыва магматических и/или метаморфических пород кислого, среднего и основного состава. Примерно такой же набор пород на палеоводоразделах сохраняется до конца среднего рифея. Терригенные породы первой синрифтовой ассоциации представлены, напротив, продуктами эрозии кислых магматических/метаморфических и осадочных образований.

На низко- и высококремнистой диаграммах DF1—DF2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) индивидуальные точки составов терригенных пород машакской свиты сосредоточены в основном (и часто примерно поровну) в полях рифтогенных и коллизионных обстановок. Средняя точка состава песчаников тяготеет к линии, разделяющей указанные поля. Это не позволяет сделать по литохимическим данным вывод о принадлежности осадочных образований машакской свиты к какой-либо конкретной палеогеодинамической обстановке. Решающее слово остается здесь за

традиционными общегеологическими аргументами (наличие столбчатой отдельности в базальтах, присутствие протяженных линз конгломератов, маркирующих бывшее положение береговых линий (?), заметная изменчивость строения близкорасположенных разрезов, тесная ассоциация фалаховых и красноцветных формаций, приуроченность мощных толщ обломочных пород к узким депрессиям и др.) (Формирование..., 1986; Пучков, 2000, 2010; Ларионов и др., 2006 и др.) и петрогеохимическими характеристиками магматических образований (Ernst, et al., 2006 и др.).

* * *

Авторы искренне признательны С. В. Мичурину и его коллегам (ИГ УНЦ РАН) за выполнение аналитических работ. Иллюстрации к статье подготовлены Н. С. Глушковой. Исследования проведены при финансовой поддержке РФФ, грант 16-17-10192 (А. В. Маслов, С. Г. Ковалев; сбор дополнительного каменного материала, подбор новых проб песчаников и тонкозернистых обломочных пород, анализ и обсуждение аналитических данных). Обработка аналитических материалов В. Н. Подковыровым и Л. Н. Котовой проведена в рамках темы НИР ИГГД РАН № 0153-2018-0011.

Литература

- Гарань, М. И., 1969. Верхний докембрий (рифей): Стратиграфия, в: Геология СССР. Т. 12. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. 1. Недр, Москва, 149–200.
- Гареев, Э. З., 1989. Геохимия осадочных пород стратотипического разреза рифея. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000016736> (дата обращения: 14.03.2018).
- Дымкин, А. М., Иванов, К. С., Иванов, С. Н., Краснобаев, А. А., Полтавец, Ю. А., Пумпянский, А. И., Пучков, В. Н., Русин, А. И., Самаркин, Г. И., Семенов, И. В., 1986. Формирование земной коры Урала. Наука, Москва.
- Иванов, С. Н., 1980. О доордовикской истории Урала и предгеосинклинальном развитии земной коры вообще, в Доордовикская история Урала. Вып. 1. УНЦ АН СССР, Свердловск, 3–28.
- Иванов, С. Н., 1981. О байкалидах Урала и Сибири. Геотектоника 5, 47–65.
- Козлов, В. И., Сергеева, Н. Д., Генина, Л. А., 2007. К вопросу о строении и расчленении машакской свиты среднего рифея Южного Урала. Геологический сборник 6, 21–32. URL: <http://ig.ufaras.ru/publikatsii/geologicheskie-sborniki/geologicheskii-sbornik-6-2007-g/> (дата обращения: 09.08.2018).
- Ларионов, Н. Н., Бергазов, И. Р., Генина, Л. А., Грановская, Н. В., Захаров, А. А., Нигматуллина, А. М., Цветкова, А. А., 2006. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:200 000. Серия Южноуральская. Лист N-40-XXXI (Тузан). Объяснительная записка. Изд. ОАО «Башкиргеология», Уфа.
- Маслов, А. В., 1988. Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. Наука, Москва.
- Маслов, А. В., 1995. Типы источников сноса песчаных ассоциаций эталона рифея, в: Ежегодник-1994. ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 41–44.
- Маслов, А. В., Гареев, Э. З., Котова, Л. Н., Подковыров, В. Н., 2018a. Литохимические особенности песчаников машакской свиты (средний рифей, Южный Урал), в: Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Материалы научных чтений памяти П. Н. Чирвинского 21, 153–161.
- Маслов, А. В., Гареев, Э. З., Подковыров, В. Н., Котова, Л. Н., 2018b. Синрифтовые осадочные образования основания эталонного разреза рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика). Вестник СПбГУ. Науки о Земле 63(1), 36–55.
- 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. URL: <http://lithosphere.uran.ru/index.php/lith/article/view/1703> (дата обращения: 09.08.2018).
- 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).

- Парначев, В. П., Ротарь, А. Ф., Ротарь, З. М., 1986. Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского антиклинория. Свердловск: УНЦ АН СССР, 103 с.
- Петтиджон, Ф., Поттер, П., Сивер, Р., 1976. Пески и песчаники. Мир, Москва.
- Пучков, В. Н., 2000. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. ГИЛЕМ, Уфа.
- 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 88(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, 17–21.
- 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.
- Ротарь, А. Ф., 1974. Машакская свита (рифей) на Южном Урале. Советская геология 4, 116–123.
- Ротарь, А. Ф., 1976. К вопросу о составе и стратиграфическом положении конгломератов машакской свиты на Южном Урале, в: Конгломераты и их роль в познании геологической истории Урала. УНЦ АН СССР, Свердловск, 14–20.
- Семихатов, М. А., 2008. Хроностратиграфия и хронометрия: конкурирующие концепции общего расчленения докембрия. Бюллетень МОИП. Отдел геологический 83(5), 36–58.
- Семихатов, М. А., Шуркин, К. А., Аксенов, Е. М., Беккер, Ю. Р., Бибилова, Е. В., Дук, В. Л., Есипчук, К. Е., Карсаков, Л. П., Киселев, В. В., Козлов, В. И., Лобач-Жученко С. Б., Негруца, В. З., Робонен, В. И., Сезько, А. И., Филатова, Л. И., Хоментовский, В. В., 1991. Новая стратиграфическая шкала докембрия СССР. Известия АН СССР. Серия геологическая 4, 3–13.
- Смирнов, Ю. Д., 1964. История развития Уральской складчатой области в докембрии, в: Геология докембрия. Доклады советских геологов. МГК XXII сессия. Недр, Москва, 195–207.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология, 1983. Келлер, Б. М., Чумаков, Н. М. (под ред.). Наука, Москва.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П., 1988. Геохимия черных сланцев. Наука, Ленинград.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П., 2000. Основы литохимии. Наука, Санкт-Петербург.
- 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.09.023>
- 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 820–829. URL: <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Ernst, R. E., Pease, V., Puchkov, V. N., Kozlov, V. I., Sergeeva, N. D., Hamilton, M., 2006. Geochemical Characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia. *Geological Digest* 5, 119–161.
- Krasnobayev, A. A., Busharina, S. V., Kozlov, V. I., Puchkov, V. N., Sergeeva, N. D., Paderin, I. P., 2013. Zircon geochronology of the Mashak volcanic rocks and the problem of the age of the lower-middle Riphean boundary (Southern Urals). *Stratigraphy and Geological Correlation* 21(5), 465–481. URL: <https://doi.org/10.1134/S0869593813050055>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717.
- 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- 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. URL: <https://doi.org/10.1134/S0869593815060088>

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.

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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>

Статья поступила в редакцию 3 марта 2018 г.

Статья рекомендована в печать 4 июля 2018 г.

Контактная информация:

Маслов Андрей Викторович — amas2004@mail.ru

Гареев Эмир Зуфарович — emirgareev2015@yandex.ru

Подковыров Виктор Николаевич — vpodk@mail.ru

Ковалев Сергей Григорьевич — kovalev@ufaras.ru

Котова Людмила Николаевна — l.n.kotova@ipgg.ru

Synrift deposits of the Middle Riphean Mashak Formation, Southern Urals (a short lithochemical characterization)

A. V. Maslov^{1, 2}, E. Z. Gareev², V. N. Podkovyrov³,
S. G. Kovalev², L. N. Kotova³

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

² Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of RAS,
16/2, ul. Karla Marxa, Ufa, 450077, Russian Federation

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

For citation: Maslov A. V., Gareev E. Z., Podkovyrov V. N., Kovalev S. G., Kotova L. N. Synrift deposits of the Middle Riphean Mashak Formation, Southern Urals (a short lithochemical characterization). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 3, pp. 303–325. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.304> (In Russian)

The article briefly describes the lithochemical features of sandstones and clayey rocks of Mashak Formation (Southern Urals), a second synrift volcano-sedimentary association in Riphean stratotype. It is shown that the sandstones of the Mashak Formation are characterised by wide variations in the bulk chemical composition (from greywacke to quartz arenite). The presence of the latter, as well as a relatively small proportion of arkoses and subarkoses, distinguishes the second synrift association from the first one (the Ai Formation, Lower Riphean). There is no overlap in between the Mashak's and Ai's psammities on the diagram $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ of F. J. Pettijon and co-authors. It indicates significant differences in provenances and common features of accumulation of the Mashak and Ai formations. On the basis of bulk chemical composition, the clayey rocks of the Mashak Formation are related to smectite (with kaolinite and illite admixture) clays and their chlorite-smectite-illite varieties. The clayey rocks of the Ai Formation differ by lower values of total normative alkalinity (0.27 ± 0.06 vs. 0.42 ± 0.07). It is established that sandstones and clayey rocks of the Mashak Formation contain a significant proportion of the “first-cycle material”, i.e. they are composed mainly by products that have passed one sedimentation cycle. As opposite, there is a significant proportion of “second-cycle/lithogenic material” of the first synrift sandstones

association (the Ai Formation). The high K_2O/Na_2O values, which are characterised for a half studied samples of the Mashak Formation, indicate that they were influenced by processes of potassium metasomatism. The distribution of data points of terrigenous rock of the Mashak Formation on diagram F1—F2 (Roser and Korsch, 1988) displays that they are composed by products of erosion of acid, average or mafic igneous and/or metamorphic rocks. The individual data points of Mashak Formation terrigenous rocks, as well as sandstone composition midpoint, are localised in the areas of riftogenic and collisional settings on the DF1—DF2 diagram (Verma and Armstrong-Altrin, 2013). It does not allow us to define their paleogeodynamic settings. In such a manner, the a critical role, traditionally, remains on general geological data and petrogeochemical characteristics of igneous rocks.

Keywords: Southern Urals, Middle Riphean, Mashak Formation, sandstones, clay rocks, lithochemistry.

References

- 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.09.023>
- 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-E](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E)
- 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Garan, M. I., 1969. Verkhni dokembrii (rifei): Stratigrafiia [Upper Precambrian (Riphean): Stratigraphy], in *Geologiya SSSR [Geology of USSR]*. T. 12. Permskaia, Sverdlovskia, Cheliabinskia i Kurganskaia oblasti. Ch. 1 [V. 12. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan districts. Part 1]. Nedra Publ., Moscow, 149–200. (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)
- Dymkin, A. M., Ivanov, K. S., Ivanov, S. N., Krasnobayev, A. A., Poltavets, YU. A., Pumpyanskiy, A. I., Puchkov, V. N., Rusin, A. I., Samarkin, G. I., Semenov, I. V., 1986. Formirovanie zemnoi kory Urala [Formation of the Earth's crust of the Urals]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 820–829. URL: <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Ernst, R. E., Pease, V., Puchkov, V. N., Kozlov, V. I., Sergeeva, N. D., Hamilton, M., 2006. Geochemical Characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European Craton, Southern Urals, Russia. *Geological Digest* 5, 119–161.
- Ivanov, S. N., 1980. O doordovikskoi istorii Urala i predgeosinklinal'nom razvitiu zemnoi kory voobshche [About PreOrdovician history of the Urals and PreGeosynclinal development of the earth's crust in general], in: *Doordovikskia istoriia Urala [PreOrdovician history of the Urals]* 1. Ural Scientific Centre, USSR Academy of Sciences, Sverdlovsk, 3–28. (In Russian)
- Ivanov, S. N., 1981. O baikalidakh Urala i Sibiri [About the Baikalsides of the Urals and Siberia]. *Geotektonika [Geotectonics]* 5, 47–65. (In Russian)
- Kozlov, V. I., Sergeeva, N. D., Genina, L. A., 2007. K voprosu o stroenii i raschlenenii mashakskoi svity srednego rifeia Iuzhnogo Urala [On the question of the structure and dismemberment of the Middle Riphean Mashak Formation, Southern Urals]. *Geologicheskii sbornik [Geological digest]* 6, 21–32. URL: <http://ig.ufaras.ru/publikatsii/geologicheskie-sborniki/geologicheskii-sbornik-6-2007-g/> (accessed 09.08.2018). (In Russian)
- Krasnobaev, A. A., Busharina, S. V., Kozlov, V. I., Puchkov, V. N., Sergeeva, N. D., Paderin, I. P., 2013. Zircon geochronology of the Mashak volcanic rocks and the problem of the age of the lower-middle Riphean boundary (Southern Urals). *Stratigraphy and Geological Correlation* 21(5), 465–481. URL: <https://doi.org/10.1134/S0869593813050055>

- Larionov, N. N., Bergazov, I. R., Genina, L. A., Granovskaya, N. V., Zakharov, A. A., Nigmatullina, A. M., Tsvetkova, A. A., 2006. Gosudarstvennaia geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii masshtaba 1 : 200 000. Seriya Iuzhnouralskaya. List N-40-KhKhII (Tukan). Ob"yasitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 200 000. Series Yuzhnouralskaya. Sheet N-40-XXII (Tukan). Explanatory note]. Publ. Bashkirgeologiya Ltd, Ufa. (In Russian)
- Maslov, A. V., 1988. Litologiya verkhnerifeiskikh otlozhenii Bashkirskogo megantiklinorija [Lithology of Upper Riphean deposits of Bashkirian Meganticlinorium]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Maslov, A. V., 1995. Tipy istochnikov snosa peschanykh assotsiatsii etalona rifeia [Provenance types for sandstone associations of the Riphean stratotype], in: Ezhegodnik-1994 [Yearbook-1994]. IGG UrB RAS, Ekaterinburg, 41–44. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Kotova, L. N., Podkovyrov, V. N., 2018a. Litokhimicheskie osobennosti peschanikov mashakskoi svity (srednii rifei, Iuzhnyi Ural) [Lithochemical features of Mashak Formation sandstones, Southern Urals], in: Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Materialy nauchnykh chtenii pamiati P. N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Materials of scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky] 21. Publishing house of the Perm State National Research University, Perm, 153–161. (In Russian)
- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Podkovyrov, V. N., Kotova, L. N., 2018b. Sinriftovye osadochnye obrazovaniia osnovaniia etalonnogo razreza rifeia Iuzhnogo Urala (kratkaia litokhimicheskaya kharakteristika) [Synrift deposits of the lower part of the Riphean stratotype, Southern Urals (a short lithochemical characterization)]. Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle [Herald SPbGU. Earth Sciences] 63(1), 36–55. (In Russian)
- Maslov, A. V., Olovyanishnikov, V. G., Isherskaya, M. V., 2002. Rifei vostochnoi, severo-vostochnoi i severnoi periferii Russkoi platformy i zapadnoi megazonu Urala: litostratografiia, 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. URL: <http://lithosphere.uran.ru/index.php/lith/article/view/1703> (accessed: 09.08.2018). (In Russian)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717.
- 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)
- Parnachev, V. P., Rotar', A. F., Rotar', Z. M., 1986. Srednerifeiskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiia Bashkirskogo antiklinorija [The Middle Riphean volcanic-sedimentary association of the Bashkir anticlinorium]. Urals Branch of USSR Academy of Sciences, Sverdlovsk. (In Russian)
- Pettidzhon, F., Potter, P., Siver, R., 1976. Peski i peschaniki [Sands and sandstones]. Mir, Moscow. (In Russian)
- Puchkov, V. N., 2000. Paleogeodinamika Iuzhnogo i Srednego Urala [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. GILEM, Ufa, 146 p. (In Russian)
- Puchkov, V. N., 2010. Geologiya Urala i Priural'ia (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. DesignPoligraphService, Ufa. (In Russian)
- Puchkov, V. N., 2013. Pliumy v istorii Urala [Plumas in the history of the Urals]. Biulleten' MOIP. Otdel geologicheskii [Bulletin of the MSN. Geology] 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: Pliumovye protsessy na Urale. Metallogeniia drevnykh i sovremennykh okeanov-2016. Ot mineralogenezisa k mestorozhdeniiam [Plume processes in the Urals. Metallogeny of ancient and modern oceans-2016. From mineralogens to deposits]. IM, Urals Branch of RAS, Miass, 17–21. (In Russian)
- Romanov, V. A., 1973. Tipovye razrezy dokembriia Iuzhnogo Urala [Typical sections of the Precambrian of the Southern Urals]. Nauka, Moscow. (In Russian)
- Ronov, A. B., Migdisov, A. A., Khane, K., 1995. Kolichestvennye 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] 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. URL: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)

- Rotar', A. F., 1974. Rotar', A. F., 1974. Mashakskaya svita (rifei) na Iuzhnom Urale [Mashak Formation (Riphean) in the Southern Urals]. *Sovetskaya geologiya* [Soviet geology] 4, 116–123. (In Russian)
- Rotar', A. F., 1976. K voprosu o sostave i stratigraficheskom polozenii konglomeratov mashakskoi svity na Iuzhnom Urale [On the composition and stratigraphic position of conglomerates of the Mashak Formation in the Southern Urals], in: *Konglomeraty i ikh rol' v poznanii geologicheskoi istorii Urala* [Conglomerates and their role in the knowledge of the geological history of the Urals]. USC of the USSR Academy of Sciences, Sverdlovsk, 14–20. (In Russian)
- Semikhatov, M. A., 2008. Khronostratigrafiya i khronometriya: konkuriruiushchie kontseptsii obshchego raschleneniya dokembriya [Chronostratigraphy and chronometry: competing concepts of the general dismemberment of the Precambrian]. *Biulleten' MOIP. Otdel geologicheskii* [Bulletin of the MSN. Geology] 83(5), 36–58. (In Russian)
- 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. URL: <https://doi.org/10.1134/S0869593815060088>
- Semikhatov, M. A., Shurkin, K. A., Aksenov, E. M., Becker, Yu. R., Bibikova, E. V., Duk, V. L., Esipchuk, K. E., Karsakov, L. P., Kiselev, V. V., Kozlov, V. I., Lobach-Zhuchenko, S. B., Negrutsa, V. Z., Robonen, V. I., Sez'ko, A. I., Filatova, L. I., Khomentovsky, V. V., 1991. Novaya stratigraficheskaya shkala dokembriya SSSR [The new stratigraphic scale of the Precambrian of the USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geological series] 4, 3–13. (In Russian)
- Smirnov, Yu. D., 1964. Istoriya razvitiya Ural'skoi skladchatoi oblasti v dokembrii [History of development of the Ural fold region in the Precambrian]. *Geologiya dokembriya. Doklady sovetskikh geologov. MGK XXII sessiya* [Reports of Soviet geologists. IGC XXII session]. Nedra, Moscow, 195–207. (In Russian)
- Stratotip rifeia. Stratigrafiya. Geokhronologiya [Stratotype of Riphean. Stratigraphy. Geochronology], 1983. Keller, B. M., Chumakov, N. M. (Eds.). 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
- Verma, S. P., Armstrong-Altrin, J. S., 2013. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology* 355, 117–133. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014> (accessed 09.08.2018).
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P., 1988. *Geokhimiya chernykh slantsev* [Geochemistry of black shales]. Nauka, Leningrad. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P., 2000. *Osnovy litokhimii* [Basics of lithochemistry]. Nauka, St-Petersburg. (In Russian)

Received: March 3, 2018

Accepted: July 4, 2018

Author's information:

Andrey V. Maslov — amas2004@mail.ru

Emir Z. Gareev — emirgareev2015@yandex.ru

Victor N. Podkovyrov — vpodk@mail.ru

Sergey G. Kovalev — kovalev@ufaras.ru

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