

Литогеохимия обломочных пород машакской свиты (западный склон Южного Урала): в поисках «камуфлированной» пирокластики*

А. В. Маслов^{1, 2, 3}, Э. З. Гареев³, В. Н. Подковыров⁴, С. Г. Ковалев³

¹ Институт геологии и минералогии СО РАН,
Российская Федерация, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 3

² Геологический институт РАН,
Российская Федерация, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7

³ Институт геологии — обособленное структурное подразделение
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
Российская Федерация, 450077, Уфа, ул. Карла Маркса, 16/2

⁴ 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. (2020). Литогеохимия обломочных пород машакской свиты (западный склон Южного Урала): в поисках «камуфлированной» пирокластики. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (1), 121–145. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107>

В статье сделана попытка на основании лито- и геохимических методов и подходов решить вопрос о присутствии «камуфлированной» пирокластики в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты среднего рифея Южного Урала. В результате исследований установлено, что на диаграмме НКМ–ГМ поле состава алевроглинистых пород машакской свиты сопоставимо с несколькими кластерами юрских аспидных сланцев Большого Кавказа, содержащих примесь вулканогенного материала, тогда как кластеры палеогеновых туфов Украинских Карпат и громашорской свиты Пай-Хоя имеют иное расположение. На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ –ГМ в указанном поле размещены два из четырех кластеров метатуффоидов и смешанных вулканогенно-осадочных пород стрельнинской серии Кольского полуострова, один из двух кластеров туфов редкинского горизонта венда Восточно-Европейской платформы. Это же характерно и для ряда других примеров. На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ –ФМ в поле алевроглинистых пород машакской свиты не вписывается ни один из четырех кластеров туфов и туфопелитов ордовика Арга-Тасской зоны Момского горст-антиклинория и ни один из шести кластеров кислых туфов и туффитов Украинских Карпат и т. д. Следовательно, локализация полей состава алевроглинистых пород машакской свиты на перечисленных и ряде других диаграмм показывает, что кластеры разнообразных вулканотерригенных пород, метатуфоалевролитов, метатуффоидов, аспидных сланцев и тому подобных образований, содержащих определенную примесь продуктов вулканизма, совпадают с ними в половине или меньшем числе случаев. Таким образом, анализ присутствующих песчаникам и глинистым породам значений абсолютных содержаний и индикаторных отношений ряда редких и рассеянных элементов, величин петрохимических

* Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-17-00099, А. В. Маслов, анализ и интерпретация результатов).

модулей и систематика редкоземельных элементов не позволяет с уверенностью утверждать, что процессы магматизма, в том числе субсинхронные осадконакоплению, были основным источником слагающего их материала.

Ключевые слова: Южный Урал, средний рифей, машакская свита, песчаники, тонкозернистые обломочные породы, литогеохимия, «камуфлированная» пирокластита.

1. Введение

Машакская свита (мощность 1600–3000 м), залегающая в центральной части Башкирского мегантиклинория (Ямантауский антиклинорий, западный склон Южного Урала) в основании юрматинской серии¹ (тип среднего рифея Северной Евразии) (рис. 1), была выделена А. И. Ивановым (1937) на хр. Машак и горе Ямантау. Южнее на хр. Бол. Шатак (Баштау) аналогичные отложения были названы шатакской свитой (Львов, 1936). В результате крупномасштабных геологосъемочных работ (Ротарь, 1974; Ротарь и Ротарь, 1975; 1982) установлено, что шатакская и машакская свиты суть одно и то же и могут рассматриваться как единая машакская свита, сформированная в период среднерифейского рифтогенеза. Свита 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; Ernst et al., 2006; Ковалев, 2008; Пучков, 2010; Маслов и др., 2018а).

Для машакской свиты характерны значительные различия в соотношении магматических и осадочных пород и последовательности их залегания от разреза к разрезу. Так, на хребтах Машак и Юша в Ямантауском антиклинории магматические породы составляют до 80 % объема свиты, а южнее — на хр. Бол. Шатак примерно в 2 раза меньше, см. (Ковалев и Высоцкий, 2008; Савельев и др., 2009) и ссылки там. На хр. Бол. Шатак пачки базальтов и конгломератов неоднократно чередуются в разрезе, тогда как в северных районах конгломераты образуют, по видимому, один горизонт примерно в средней части свиты. Риолиты в Ямантауском антиклинории образуют мощную толщу в основании свиты, которая иногда подстилается маломощными горизонтами базальтов или конгломератов; на хр. Бол. Шатак кислые магматические породы залегают выше базальт-конгломератовой толщи (Ковалев и Высоцкий, 2008). Как полагают многие авторы, ассоциация магматических пород с терригенными отложениями указывает на континентальную природу магматизма машакского времени. В. П. Парначев с соавторами (1986) показали, что на территории Ямантауского антиклинория присутствуют магматические породы, принадлежащие к эффузивной/покровной, жерловой, субвулканической и дайковой фациям. В целом считается, что Машакская

¹ Здесь машакская свита с размывом и угловым несогласием залегает на породах юшинской свиты (аналог бакальской свиты) нижнего рифея и согласно перекрыта кварцитовидными песчаниками зигальгинской свиты. На северо-востоке мегантиклинория (Тараташский антиклинорий) машакская свита отсутствует и кварцитовидные песчаники зигальгинской свиты с размывом перекрывают породы бакальской свиты бурзянской серии (Стратотип..., 1983).

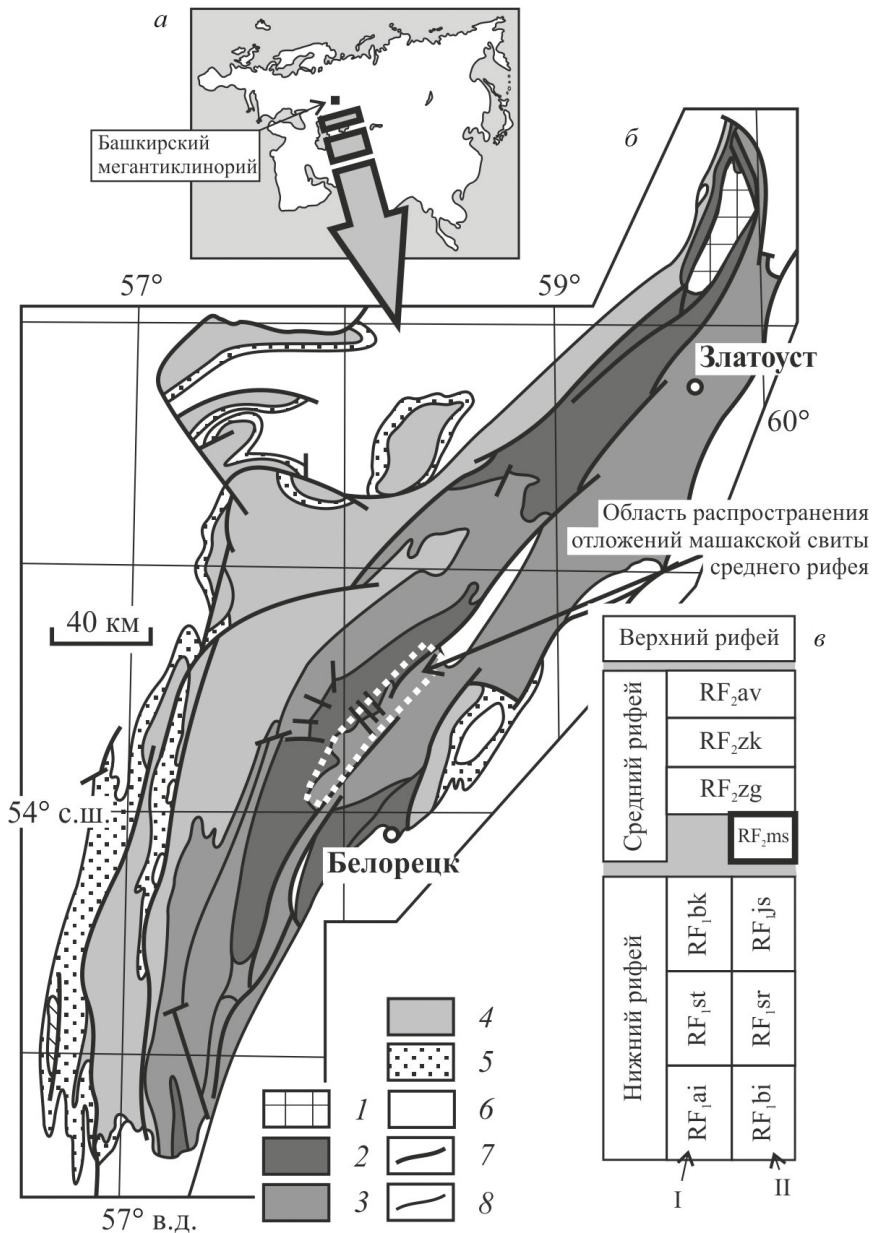


Рис. 1. Обзорная схема (а), схематическая геологическая карта Башкирского мегантиклинория (б) и положение машакской свиты в стратотипическом разрезе нижнего и среднего рифея (в).

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_{1bi} — большеинзерская; RF_{1sr} — суранская; RF_{1js} — юшинская; RF_{2ms} — машакская; RF_{2zg} — зигальгинская; RF_{2zk} — зигазино-комаровская; RF_{2av} — авзянская.

I — северо-восточные районы Башкирского мегантиклинория; II — центральная часть той же структуры. Серым фоном обозначены стратиграфические перерывы.

палеорифтовая структура сопоставима с такой типичной сводово-вулканической рифтовой зоной, как Кенийская (Восточная Африка), магматические породы которой являются продуктом эволюционного развития (дифференциации) расплава в едином промежуточном очаге.

В разрезах машакской свиты / машакского комплекса в Ямантауской структуре наряду с магматическими (до 50 % объема свиты) и осадочными (~25 %, в том числе примерно 5 % приходится на долю алевролитов и алевропелитовых сланцев) породами присутствуют, по данным (Парначев и др., 1986), также пирокластические (туфы основного и кислого состава) и вулканогенно-осадочные (туффиты / серицит-кварцевые сланцы, до 6 %) образования. Последние обладают желтовато- и зеленовато-серой окраской и встречаются «... в тесном переслаивании с нормально осадочными породами ... образуют гамму постепенных переходов с ними» (там же, с. 26). Их диагностика, как подчеркнуто авторами цитируемой работы, в связи с метаморфическими преобразованиями и заметной карбонатизацией в существенной степени затруднена. Алевропелитовые сланцы и алевролиты обладают преимущественно сланцевой текстурой, что в значительной мере затушевывает большинство их первичных структурных особенностей, кроме крайне неравномернозернистой алевритовой структуры.

На хр. Бол. Шатак (по данным работы этих же авторов) в разрезах шатакского комплекса наряду с туфами основного и кислого состава туффиты являются самым распространенным типом вулканогенно-осадочных образований. Они обладают характерными зеленоватыми, лиловатыми и желтоватыми тонами окраски. Для туффитов кислого состава свойственно присутствие серицита и гидрослюд, для основных туффитов — хлорита и эпидота. Собственно в тонкозернистых осадочных породах/алевропелитах присутствие той или иной доли туфового материала можно предполагать, по мнению (Парначев и др., 1986), по специфическим тонам окраски (лиловым, фиолетовым, бурым или желтовато-зеленым). В целом следует подчеркнуть, что свойственные «камуфлированной» пирокластике специфические текстурные признаки при микропетрографических исследованиях (Парначев и др., 1986) осадочных пород машакского и шатакского комплексов не выявлены.

Наше предыдущее исследование литохимических особенностей песчаников и глинистых пород машакской свиты (Маслов и др., 2018а) позволило показать, что песчаники характеризуются широкими вариациями валового химического состава. На диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ Ф. Дж. Петиджона с соавторами (1976) фигуративные точки псаммитов свиты локализованы в полях от вакк до кварцевых аренитов (рис. 2, а). На классификационной диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}^2 + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (Юдович и Кетрис, 2000) точки тонкозернистых обломочных пород машакской свиты сосредоточены в основном в зоне перекрытия областей I (преимущественно каолинитовые глины) и II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и иллита глины) и области V (хлорит-смектит-иллитовые глины) (рис. 2, б). На 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) точки состава тонкозернистых обломочных пород свиты сосредоточены в областях сланцев и вакк, а точки песчаников

² Здесь $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$ — суммарное железо как Fe_2O_3 .

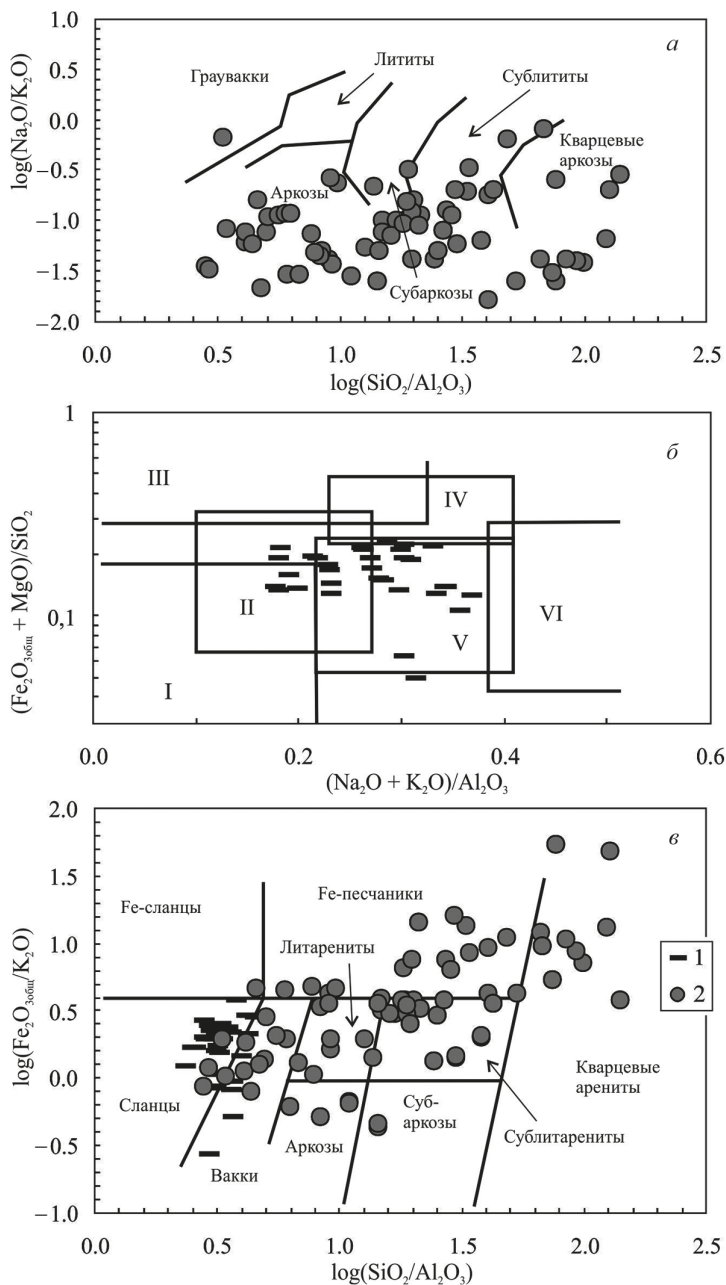


Рис. 2. Положение точек состава тонкозернистых обломочных пород и песчаников машакской свиты на классификационных диаграммах $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (а), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (б) и $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{K}_2\text{O})$ (в).

1 — тонкозернистые обломочные породы; 2 — песчаники.

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

локализованы в областях вакк, литаренитов, Fe-песчаников, сублитаренитов, аркозов и кварцевых аренитов (рис. 2, в). На диаграмме DF1–DF2 (Verma and Armstrong-Altrin, 2013) индивидуальные точки составов терригенных пород машакской свиты сосредоточены в полях рифтогенных и коллизионных обстановок (Маслов и др., 2018а).

Цель данной работы — решение вопроса о присутствии вулканогенного/пирогенного материала («камуфлированной» пирокластики³) в составе песчаников и тонкозернистых обломочных/глинистых пород машакской свиты, тесно ассоциирующих в разрезах названного литостратиграфического подразделения типового разреза рифея, как показано выше, с породами вулканогенными, на основании лито- и геохимических методов и подходов.

2. Фактический материал и методы исследования

В основу статьи положена выборка валовых химических анализов песчаников (89 образцов), а также тонкозернистых обломочных пород (глинистых сланцев и мелкозернистых глинистых алевролитов, 34 образца) машакской свиты, составленная по данным банка «PrecSed» (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург, А. В. Сочава и В. Н. Подковыров) и коллекций Э. З. Гареева и С. Г. Ковалева (ИГ БФ АН СССР/УНЦ РАН, г. Уфа), собранных в гипостратотипической местности (хр. Бол. Шатак, западный склон Южного Урала). Учтены также данные работы В. П. Парначева с соавторами (1986).

Эти материалы получены в разные годы методами классической «мокрой химии» и рентгеноспектральным флуоресцентным, в том числе в Институте геологии БФ АН СССР/УНЦ РАН и Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург), Ильменском государственном заповеднике УНЦ АН СССР (г. Миасс) и центральной лаборатории ПГО «Севзапгеология» (г. Санкт-Петербург). Содержание в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах редких и рассеянных элементов установлено методом ICP-MS в ИГГ УрО РАН. Средние, минимальные и максимальные содержания основных породообразующих оксидов, а также элементов-примесей приведены в табл. 1 и 2. При всех построениях использованы только данные для образцов, значения потерь при прокаливании (ппп) в которых составляли менее 5%.

Известно, что вулканизм в существенной степени влияет на процессы осадко-накопления (Страхов, 1963; Дзоценидзе, 1965; Юдович и Кетрис, 2010; 2011), при этом «...помимо явного проявления вулканизма в литогенезе... [он] оказывает многообразное скрытое влияние на осадочное породо- и рудообразование, которое часто вовсе не очевидно. Для распознавания такого влияния решающими оказываются геохимические методы диагностики, основанные на содержаниях и соотношениях породообразующих и малых элементов, а также на изотопных отношениях» (Юдович и Кетрис, 2010, с. 6).

³ В соответствии с представлениями, изложенными в публикации (Коссовская, 1975), «камуфлированная» пирокластика — пепловый материал вулканических эксплозий, преобразованный в более устойчивые минеральные компоненты. Мы понимаем этот термин несколько шире: «камуфлированная» пирокластика — это не только пепловый материал, но и материал более крупный по размерности.

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

Компоненты, мас. %	Песчаники	Тонкозернистые обломочные породы
SiO ₂	$86,09 \pm 8,85$ 61,11–97,53	$61,49 \pm 3,79$ 53,79–69,25
TiO ₂	$0,39 \pm 0,25$ 0,07–1,18	$0,93 \pm 0,24$ 0,58–1,62
Al ₂ O ₃	$6,63 \pm 5,38$ 0,70–21,88	$19,15 \pm 2,09$ 14,45–23,94
Fe ₂ O ₃ общ	$3,54 \pm 2,11$ 1,05–11,50	$7,91 \pm 2,12$ 1,83–12,17
MnO	$0,02 \pm 0,01$ 0,01–0,05	$0,03 \pm 0,03$ 0,01–0,11
MgO	$0,81 \pm 0,72$ 0,01–3,82	$2,16 \pm 0,97$ 0,82–4,90
CaO	$0,31 \pm 0,37$ 0,01–1,50	$0,35 \pm 0,30$ 0,06–1,20
Na ₂ O	$0,13 \pm 0,21$ 0,01–1,92	$0,44 \pm 0,32$ 0,09–1,27
K ₂ O	$1,49 \pm 1,42$ 0,04–6,76	$4,64 \pm 1,35$ 2,47–6,87
P ₂ O ₅	$0,07 \pm 0,13$ 0,01–0,86	$0,11 \pm 0,05$ 0,01–0,26
ппп	$0,78 \pm 0,71$ 0,02–2,59	$3,15 \pm 1,54$ 0,70–5,32
<i>n</i>	89	34

Примечание: здесь и в табл. 2 *n* — число проанализированных образцов.

Диагностика вулканогенной примеси в осадочных породах, по мнению Я.Э.Юдовича и М.П.Кетрис (1998; 2000), является одной из наиболее актуальных задач глобальной литохимии. Для ее решения предложено много лито- и геохимических инструментов/методов и подходов, среди которых в первую очередь называются повышенная магнезиальность ($MgO > 3$ мас. %) и щелочность осадочных пород ($(Na_2O + K_2O) > 8$ мас. %), позитивная корреляция между петрохимическими модулями⁴ ФМ и ТМ, а также ЖМ и ТМ, и негативная корреляция между НКМ и ФМ, высокие значения отношения MgO/CaO и щелочного модуля (ЩМ), весьма высокие величины ТМ и ЖМ и ряд других индикаторов (Юдович и Кетрис, 1988; 1998; 2000; 2010; Диагностика..., 2012). Присутствие фигуративных точек песчаников

⁴ Расшифровка значений перечисленных модулей и формулы для их расчета приведены в табл. 3.

Таблица 2. Среднее, минимальное и максимальное содержание редких и рассеянных элементов в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты

Компоненты, г/т	Песчаники	Тонкозернистые обломочные породы
Li	$\frac{10,33 \pm 11,89}{0,70-40,00}$	$\frac{24,63 \pm 13,29}{3,00-40,00}$
Sc	$\frac{11,09 \pm 7,11}{1,90-34,00}$	$\frac{13,01 \pm 5,63}{4,10-20,00}$
V	$\frac{85,07 \pm 63,73}{12,00-280,00}$	$\frac{117,50 \pm 50,64}{40,00-180,00}$
Cr	$\frac{61,21 \pm 38,23}{15,00-170,00}$	$\frac{87,50 \pm 29,64}{40,00-120,00}$
Co	$\frac{9,14 \pm 10,69}{0,80-50,00}$	$\frac{12,40 \pm 5,01}{1,20-16,00}$
Ni	$\frac{30,11 \pm 23,75}{5,00-120,00}$	$\frac{37,25 \pm 7,87}{22,00-50,00}$
Cu	$\frac{12,26 \pm 9,70}{3,20-39,00}$	$\frac{21,06 \pm 11,66}{5,00-37,00}$
Zn	$\frac{24,84 \pm 24,42}{2,10-90,00}$	$\frac{43,38 \pm 24,49}{7,00-80,00}$
Ga	$\frac{11,37 \pm 7,20}{2,20-28,00}$	$\frac{18,00 \pm 7,89}{7,00-28,00}$
Rb	$\frac{39,42 \pm 26,35}{0,70-90,00}$	$\frac{26,75 \pm 4,89}{21,00-36,00}$
Sr	$\frac{12,58 \pm 11,72}{1,30-40,00}$	$\frac{27,13 \pm 14,30}{5,00-40,00}$
Y	$\frac{4,78 \pm 2,43}{1,10-13,00}$	$\frac{4,25 \pm 1,83}{3,00-8,00}$
Zr	$\frac{76,71 \pm 33,59}{23,50-150,00}$	$\frac{129,38 \pm 21,12}{95,00-150,00}$
Nb	$\frac{5,71 \pm 3,95}{1,00-15,00}$	$\frac{10,78 \pm 3,57}{5,20-16,00}$
Cs	$\frac{0,94 \pm 0,62}{0,03-2,40}$	$\frac{1,43 \pm 0,53}{0,70-2,20}$
Ba	$\frac{109,07 \pm 68,34}{8,00-260,00}$	$\frac{215,00 \pm 55,03}{130,00-280,00}$
La	$\frac{14,53 \pm 9,66}{1,50-33,00}$	$\frac{8,63 \pm 3,46}{5,00-14,00}$
Ce	$\frac{30,36 \pm 18,99}{4,20-70,00}$	$\frac{19,63 \pm 5,66}{13,00-29,00}$

Компоненты, г/т	Песчаники	Тонкозернистые обломочные породы
Pr	$\frac{4,18 \pm 2,83}{0,60-11,00}$	$\frac{2,71 \pm 0,78}{1,80-4,00}$
Nd	$\frac{16,44 \pm 10,77}{2,20-40,00}$	$\frac{11,25 \pm 2,92}{8,00-16,00}$
Sm	$\frac{3,20 \pm 2,03}{0,46-8,00}$	$\frac{2,33 \pm 0,71}{1,50-3,30}$
Eu	$\frac{0,68 \pm 0,37}{0,14-1,40}$	$\frac{0,55 \pm 0,12}{0,35-0,70}$
Gd	$\frac{2,17 \pm 1,07}{0,46-4,00}$	$\frac{1,89 \pm 0,60}{1,20-2,90}$
Tb	$\frac{0,22 \pm 0,11}{0,06-0,40}$	$\frac{0,25 \pm 0,08}{0,14-0,40}$
Dy	$\frac{1,17 \pm 0,59}{0,32-2,80}$	$\frac{1,44 \pm 0,41}{0,80-2,20}$
Ho	$\frac{0,22 \pm 0,11}{0,06-0,60}$	$\frac{0,28 \pm 0,07}{0,17-0,40}$
Er	$\frac{0,65 \pm 0,32}{0,12-1,70}$	$\frac{0,82 \pm 0,21}{0,48-1,20}$
Tm	$\frac{0,10 \pm 0,05}{0,02-0,24}$	$\frac{0,12 \pm 0,03}{0,07-0,17}$
Yb	$\frac{0,71 \pm 0,31}{0,12-1,50}$	$\frac{0,86 \pm 0,21}{0,50-1,20}$
Lu	$\frac{0,12 \pm 0,05}{0,02-0,23}$	$\frac{0,14 \pm 0,03}{0,08-0,18}$
Hf	$\frac{2,27 \pm 0,96}{0,70-4,00}$	$\frac{3,88 \pm 0,64}{3,00-5,00}$
Pb	$\frac{1,57 \pm 1,14}{0,70-5,00}$	$\frac{3,83 \pm 4,31}{1,00-14,00}$
Th	$\frac{4,75 \pm 2,47}{0,57-9,00}$	$\frac{4,70 \pm 0,84}{3,10-6,00}$
U	$\frac{1,18 \pm 0,64}{0,23-2,50}$	$\frac{2,03 \pm 0,62}{1,00-3,00}$
<i>n</i>	28	8

и тонкозернистых обломочных пород вне обычных областей классификационных диаграмм также часто может служить указанием на наличие в таких породах пирогенной примеси (Маслов и др., 20186).

Таблица 3. Среднее, минимальное и максимальное значения ряда петрохимических модулей и отношения K_2O/Al_2O_3 в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты

Модули и индикаторные отношения	Песчаники	Тонкозернистые обломочные породы
Гидролизатный, $ГМ = (TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_{3общ} + MnO)/SiO_2$	$0,13 \pm 0,11$ 0,02–0,48	$0,46 \pm 0,07$ 0,33–0,61
Титановый, $ТМ = TiO_2/Al_2O_3$	$0,080 \pm 0,047$ 0,018–0,333	$0,049 \pm 0,014$ 0,032–0,093
Железный. $ЖМ = (Fe_2O_{3общ} + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$	$0,81 \pm 0,63$ 0,13–2,80	$0,40 \pm 0,13$ 0,08–0,75
Фемический, $ФМ = (Fe_2O_{3общ} + MnO + MgO)/SiO_2$	$0,05 \pm 0,04$ 0,01–0,15	$0,17 \pm 0,04$ 0,05–0,23
Нормированной щелочности, $НКМ = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$	$0,25 \pm 0,09$ 0,03–0,57	$0,27 \pm 0,06$ 0,18–0,37
Алюмокремниевый, $АМ = Al_2O_3/SiO_2$	$0,08 \pm 0,08$ 0,01–0,36	$0,31 \pm 0,05$ 0,22–0,43
Щелочной, $ЩМ = Na_2O/K_2O$	$0,13 \pm 0,17$ 0,02–0,80	$0,11 \pm 0,10$ 0,02–0,35
K_2O/Al_2O_3	$0,22 \pm 0,08$ 0,03–0,44	$0,24 \pm 0,06$ 0,16–0,36

Определенную помощь в решении названной задачи может оказать, по всей видимости, и сопоставление особенностей распределения в терригенных породах редких и рассеянных, в том числе редкоземельных элементов (РЗЭ), хотя такая информация и не дает прямого ответа на вопрос, поступал ли вулканогенный материал в осадок непосредственно/субсинхронно с извержениями («горячий» пирогенный материал) или был заимствован при эрозии разнообразных более древних вулканогенных комплексов («холодная» вулканокластика).

Мы постарались использовать большинство из перечисленных выше подходов и методов для ответа на вопрос, присутствует ли вулканогенный/пирогенный материал в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты, переслаивающихся с многочисленными потоками массивных, миндалекаменных и шлаковидных базальтов, доля которых в некоторых разрезах названного литостратиграфического подразделения составляет, как указано выше, иногда до 80 % от объема свиты.

3. Результаты исследований и их обсуждение

3.1. Обломочные породы машакской свиты и «сиаллитовый стандарт»

Для характеристики «нормальных осадочных пород» Я. Э. Юдович и М. П. Кертрис (2000) предложили «сиаллитовый стандарт» — совокупность петрохимиче-

ских модулей (гидролизатный, титановый, фемический, нормированной щелочности и др.), позволяющую в достаточно полной мере описать особенности химического состава широкого круга пород. Формулы и средние значения названных и других модулей для песчаников и тонкозернистых обломочных пород машакской свиты приведены в табл. 1, а особенности распределения индивидуальных образцов глинистых пород внутри различных градаций этих модулей показаны на рис. 3. В последней колонке на этом рисунке приведено распределение в исследованной нами выборке тонкозернистых обломочных пород значений отношения K_2O/Al_2O_3 , являющегося, по (Cox and Lowe, 1995; Cox et al., 1995), индикатором их петрогенной или литогенной природы⁵. Большинство фигуративных точек на этой колонке сосредоточено в области K_2O/Al_2O_3 , характерной для пород, прошедших несколько циклов седиментации.

Важно и то, что «сиаллитовый стандарт» дает возможность диагностировать породы вулканогенно-осадочные и вулканогенные, т.е. в той или иной мере позволяет решить проблему присутствия в казалось бы «нормальных» осадочных породах «камуфлированной» пирокластики. Рассмотрим это на конкретных примерах, используя информацию, имеющуюся в работах (Юдович и Кетрис, 2000; 2010) и данные по содержанию различных редких и рассеянных элементов в тонкозернистых обломочных породах машакской свиты.

Так, на диаграмме НКМ–ГМ (рис. 4, а) фигуративные точки состава алевроглинистых/тонкозернистых обломочных пород машакской свиты образуют поле, описываемое значениями $0,18 < НКМ < 0,37$ и $0,33 < ГМ < 0,61$. Этому же полю соответствует точка постархейского австралийского сланца⁶ (PAAS (Taylor and McLennan, 1985)) и несколько кластеров юрских аспидных сланцев Большого Кавказа⁷ и каролиновской свиты верхнего карбона — нижней перми Пай-Хоя. Кластеры палеогеновых туфов Украинских Карпат и громашорской свиты Пай-Хоя расположены существенно ниже него.

На диаграмме $(Na_2O + K_2O) - ГМ$ (рис. 4, б) точки глинистых пород машакской свиты образуют поле между значениями $(Na_2O + K_2O)$ 3,50...7,50 мас. % и ГМ — 0,33...0,61. В этом же поле можно видеть два из четырех кластеров метатуффоидов и смешанных литотипов стрельнинской серии Кольского полуострова, один из двух кластеров туфов редкинского горизонта венда Восточно-Европейской платформы и также один из двух кластеров метатуфов и метатуфоалевролитов Алданского щита. При этом в указанное поле практически не попадает ни один из кластеров метавулканитов и смеси их литотипов томингской серии Кольского полуострова. Кластеры обломочных пород кечпельской свиты Приполярного Урала расположены в области существенно меньших величин $(Na_2O + K_2O)$. Два из шести кластеров, выделенных в работе (Юдович и Кетрис, 2010) для варгашорской свиты Лемвинской зоны, также отвечают полю распространения фигуративных точек глинистых

⁵ По данным названных авторов многократно переотложенные тонкозернистые обломочные породы характеризуются значениями $K_2O/Al_2O_3 < 0,3$. В «first cycle» петрогенных глинах калий содержится преимущественно в тонкодисперсных полевых шпатах и благодаря этому величина K_2O/Al_2O_3 составляет в указанных образованиях более 0,3.

⁶ Это же можно видеть и на других диаграммах, изображенных на данном рисунке.

⁷ Здесь и далее при характеристике объектов, с которыми сравнивается распределение на разных модульных диаграммах (рис. 4 и 5) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород машакской свиты, использованы их наименования из публикаций (Юдович и Кетрис, 2000; 2010).

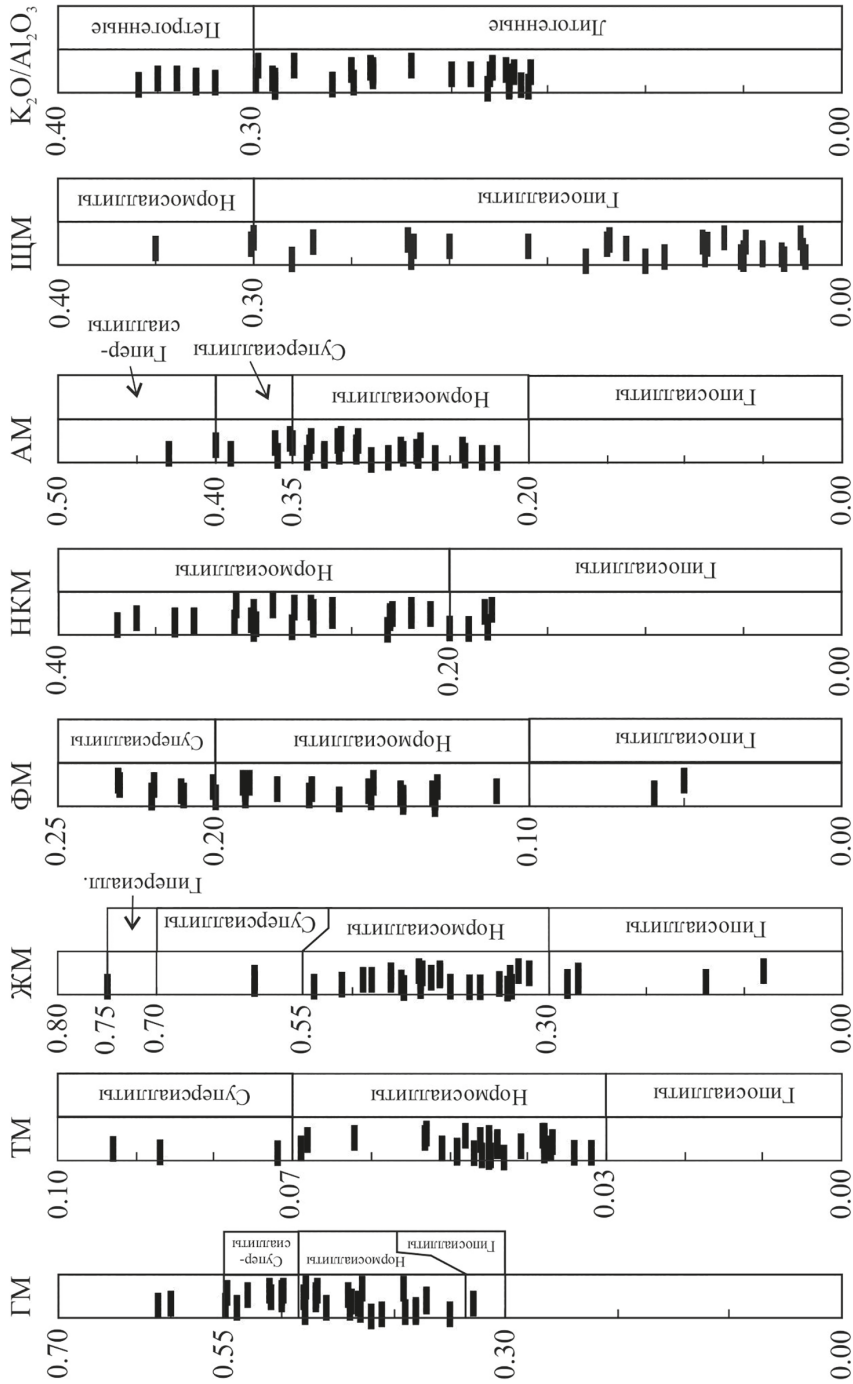


Рис. 3. Распределение значений различных петрохимических модулей в тонкозернистых обломочных породах машакской свиты. Модули: GM — гидролизатный; TM — титановый; ЖМ — железный; ФМ — железный; НКМ — фемический; ЩМ — нормированной щелочности; АМ — алюмокремниевый; ЩМ — щелочной.

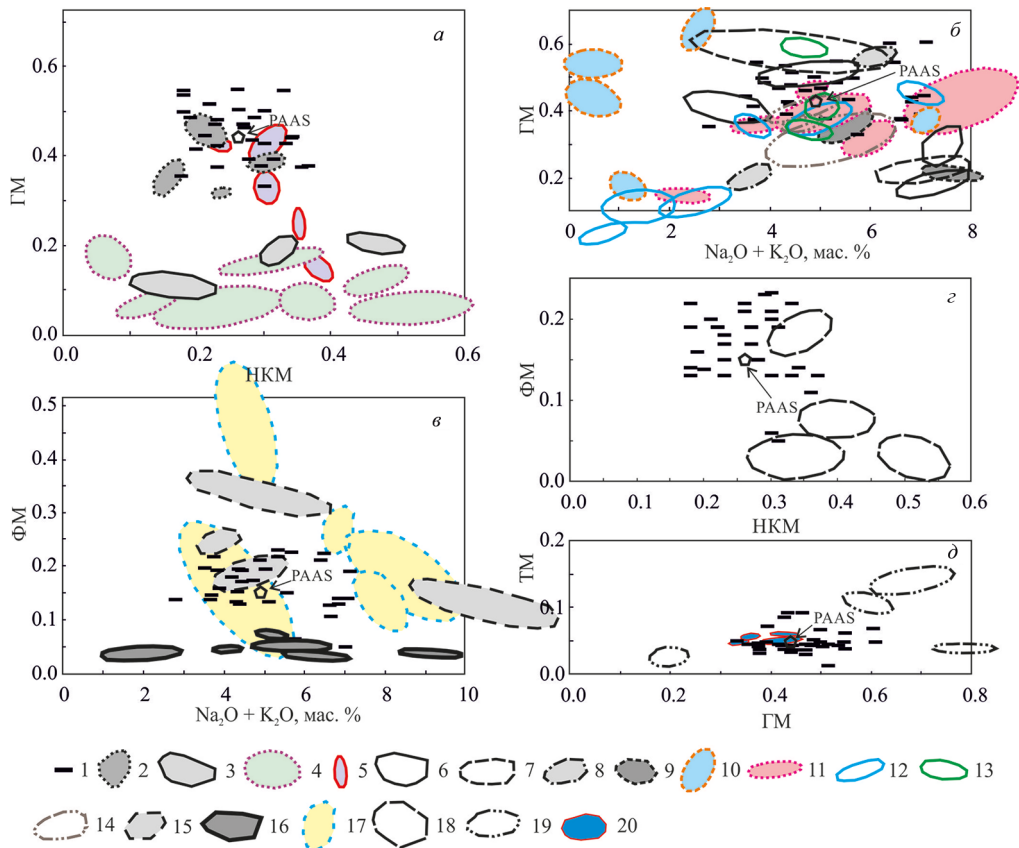


Рис. 4. Положение точек состава индивидуальных образцов глинистых пород машакской свиты и кластеров составов терригенных пород с вулканогенной примесью (все по Юдович и Кетрис, 2000; 2010) на модульных диаграммах НКМ–ГМ (а), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ –ГМ (б), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ –ФМ (в), НКМ–ФМ (г) и ГМ–ТМ (д).

1 — глинистые породы машакской свиты; 2–20 — кластеры составов: 2 — юрские аспидные сланцы Большого Кавказа; 3 — палеогеновые туфы Украинских Карпат; 4 — громашорская свита Пай-Хоя; 5 — черносланцевые отложения карбона-нижней перми каро-силловской свиты Пай-Хоя; 6 — метатуффоиды и смесь литотипов стрельнинской серии Кольского полуострова; 7 — метавулканисты и смесь литотипов томингской серии Кольского полуострова; 8 — туфы редкинского горизонта венда Восточно-Европейской платформы; 9 — метатуфы и метатуфоалевролиты Алданского щита; 10 — кечпельская свита Приполярного Урала; 11 — воргашорская свита Лемвинской зоны; 12 — няньворгинская свита Лемвинской зоны; 13 — пагинская свита; 14 — бескарбонатные породы щекуринской свиты; 15 — малокурульская свита; 16 — кислые туфы и туффиты Украинских Карпат; 17 — ордовикская флишевая вулканогенно-осадочная формация Арга-Тасской зоны Момского горст-антиклинория; 18 — кислые и основные метатуфы Кавказа; 19 — михайловская серия КМА; 20 — метатуфоалевролиты, метатуффоиды и смесь литотипов серии Мойн.

пород машакской свиты. Почти аналогичным образом распределены на графике три из восьми кластеров няньворгинской свиты Лемвинской зоны. Полю машакских алевроглинистых пород отвечают два из трех кластеров пагинской свиты и один из двух кластеров бескарбонатных пород щекуринской свиты.

На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ –ФМ (рис. 4, в) распределение точек тонкозернистых обломочных пород машакской свиты описывается следующими значени-

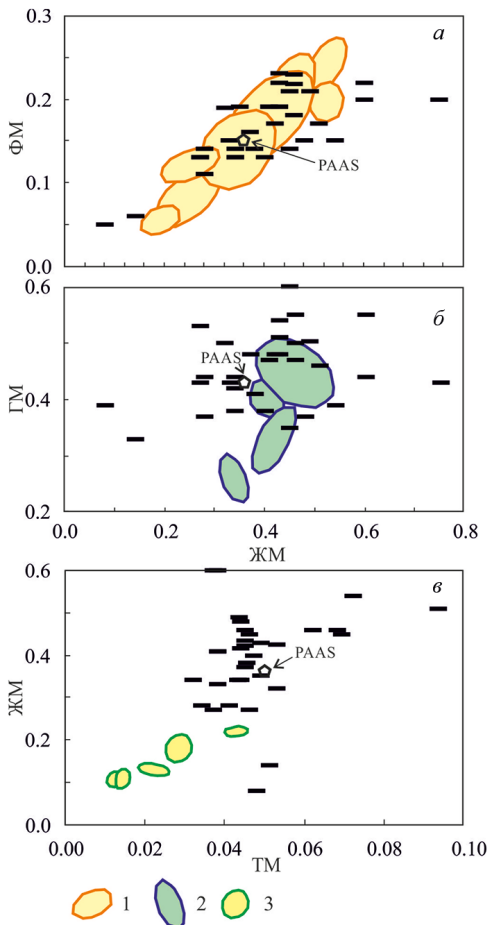


Рис. 5. Положение точек состава индивидуальных образцов глинистых пород машакской свиты и кластеров составов терригенных пород с вулканогенной примесью (все по Юдович и Кетрис, 2010) на модульных диаграммах ЖМ–ФМ (а), ЖМ–ГМ (б) и ГМ–ЖМ (в).

1 — оюяхинская свита; 2 — вулканогенно-осадочные породы энганэпейской свиты; 3 — эксеняхская свита Предверхоаянского прогиба. Остальные условные обозначения см. на рис. 4

На диаграмме ЖМ–ФМ (рис. 5, а) из восьми кластеров пород оюяхинской свиты четыре отвечают полю фигуративных точек глинистых пород машакской свиты. На диаграмме ЖМ–ГМ (рис. 5, б) половина из четырех кластеров вулканогенно-осадочных пород энганэпейской свиты соответствует полю машакских тонкозернистых обломочных пород. В то же время на графике ТМ–ЖМ (рис. 5, в) ни один из пяти кластеров эксеняхской свиты Предверхоаянского прогиба не вписывается в поле, образуемое фигуративными точками глинистых пород машакской свиты. Таким образом, и в этой ситуации примерно в половине случаев

ями параметров ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) и ФМ: 3,50...7,50 мас. % и 0,05...0,23. В это поле не вписывается ни один из четырех кластеров туфов и туфопелитов ордовика Арга-Тасской зоны Момского горст-антиклинория и ни один из шести кластеров кислых туфов и туффитов Украинских Карпат. Из четырех кластеров вулканогенно-терригенных пород малокурильской свиты Малых Курил в указанное выше поле алевропелитов машакской свиты попадает только один.

На диаграмме НКМ–ФМ (рис. 4, з) в поле машакских алевропелитов локализован один из трех кластеров кислых и основных метатуфов Кавказа. На диаграмме ГМ–ТМ (рис. 4, д) тонкозернистые обломочные породы машакской свиты образуют поле, описываемое следующими значениями ГМ и ТМ: 0,33...0,61 и 0,03...0,09. В этом поле можно видеть все четыре кластера метатуфоалевролитов, метатуффоидов и смеси литотипов серии Мойн и ни одного из четырех кластеров метапорфиров и метабазитов михайловской серии Курской магнитной аномалии.

Локализация полей состава тонкозернистых обломочных пород машакской свиты на перечисленных диаграммах показывает, что примерно в половине случаев с ними совпадают те или иные кластеры разнообразных вулканогенно-терригенных пород, метатуфоалевролитов, метатуффоидов, аспидных сланцев и тому подобных образований, содержащих определенную примесь продуктов вулканизма.

состав тонкозернистых обломочных пород машакской свиты может рассматриваться как вполне сопоставимый с составом вулканогенно-осадочных образований.

3.2. Распределение редких и рассеянных элементов в обломочных породах, метабазах и риолито-дацитах машакской свиты

В разделе 1, посвященном общей характеристике строения разрезов машакской свиты, было показано, что обломочные породы в них переслаиваются с потоками и покровами метабазов и их туфов, а также более кислыми разностями вулканитов. Если осадконакопление шло на фоне интенсивной магматической деятельности, то вулканогенный материал должен был в той или иной форме участвовать в формировании вещественного и микроэлементного состава песчаников и тонкозернистых обломочных пород. Так ли это на самом деле, мы рассмотрим ниже.

В песчаниках машакской свиты по сравнению с метабазами этого же литостратиграфического подразделения (Ernst et al., 2006; Ковалев и др., 2013) существенно выше среднее содержание Rb, Th и U соответственно в ~3,5, 2,2 и 2,3 раза (рис. 6, а). Средние содержания Zn и Cs сопоставимы, а содержания большинства других редких и рассеянных элементов в заметной степени ниже, чем в метабазах (например, среднее содержание Cr составляет около 0,6, а Nb — порядка 0,4 от содержания названных элементов в метабазах). Наблюдаются также более низкие средние содержания тяжелых РЗЭ (ТРЗЭ) (0,2...0,4), тогда как содержания легких РЗЭ (ЛРЗЭ) варьируют от 0,7 до 0,9. Все это позволяет предполагать, что доля субсинхронного магматического/вулканогенного материала основного состава в песчаниках не столь велика.

Относительно риолито-дацитов⁸ в песчаниках существенно выше средние содержания V (3,3), Cu (2,4), Zn (4,5), Cs (2,2) и Pb (2,2), несколько повышены средние содержания Cr (1,3) и Co (1,8), сопоставимы содержания Ni (1,1) и Rb (0,9). Средние содержания большинства других элементов, включая все РЗЭ, напротив, заметно ниже, чем в риолито-дацитах (рис. 6, б). Из сказанного можно сделать вывод, что риолито-дациты не являлись тем субстратом, за счет разрушения которого шло формирование песчаников.

Сравнение содержаний микроэлементов в песчаниках машакской свиты и среднем протерозойском кратонном песчанике (СПКП), по (Condie, 1993), показывает, что в последних существенно повышены средние содержания V, Cr, Co и Ni, несколько повышены средние содержания Nb, ЛРЗЭ и Gd, тогда как Rb, Tb, Th и U присутствуют в сопоставимых концентрациях (рис. 6, в). Следовательно, песчаники машакской свиты в заметной степени отличаются по своим геохимическим характеристикам и от СПКП.

Тонкозернистые обломочные породы машакской свиты характеризуются сопоставимыми с метабазами средними содержаниями Cr (0,9), Ga (0,9) и Hf (1,0). Заметно повышены в них относительно метабазов средние концентрации

⁸ Сведения о распределении редких и рассеянных элементов в них любезно предоставлены Ю. Л. Ронкиным.

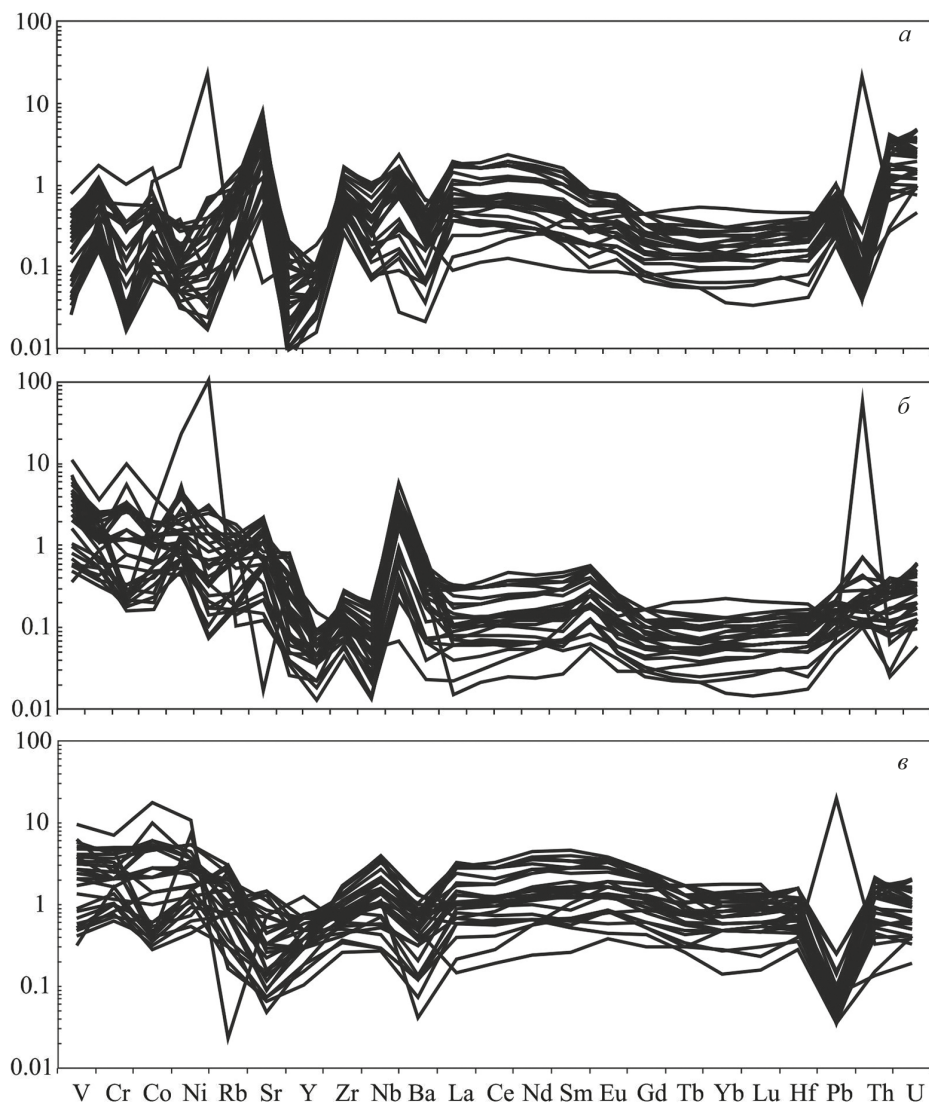


Рис. 6. Содержание редких и рассеянных элементов в песчаниках машакской свиты, нормированное на их содержание в метабазальтах (а) и риолито-дацитах (б) этой же свиты и среднем протерозойском кратонном песчанике (в)

Rb (2,4), Th (2,2) и U (4,0), тогда как среднее содержание Zr и Cs составляет соответственно 1,5 и 1,4 (рис. 7, а). Среднее содержание подавляющего числа других элементов примесей в глинистых сланцах заметно ниже, чем в переслаивающихся с ними метабазальтах. Это позволяет предполагать, что материал основных магматических пород, скорее всего, не участвовал в формировании тонкозернистых обломочных пород машакской свиты.

При нормировании на PAAS сопоставимым средним содержанием в тонкозернистых обломочных породах характеризуется только Ga (0,9 PAAS), средние

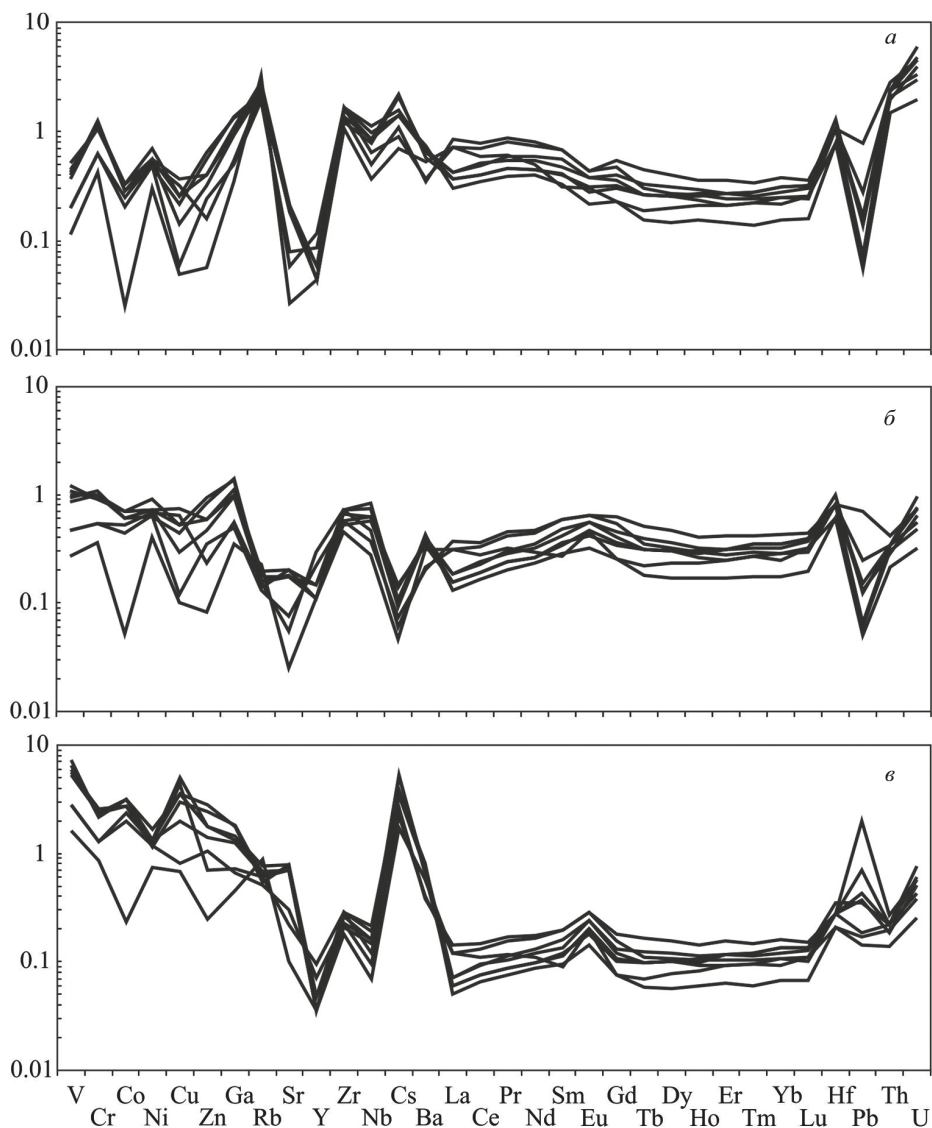


Рис. 7. Содержание редких и рассеянных элементов в глинистых породах машакской свиты, нормированное на содержание этих же элементов в метабазальтах (а), ПААС (б) и риолито-дацитах (в) этой же свиты

концентрации остальных элементов-примесей в глинистых сланцах меньше, чем в ПААС (от ~0,8 для Sr и V до ~0,2 для La и 0,1 для Cs) (рис. 7, б). Распределение РЗЭ в этом случае типично для большинства обычных глинистых пород и в некоторой степени обусловлено разбавляющим эффектом неглинистых компонентов пород.

Сопоставление спектров распределения редких и рассеянных элементов в риолито-дацитах и тонкозернистых обломочных породах показывает, что последние существенно обогащены V (4,7), Co (2,5), Cu (2,9) и Cs (3,5). Среднее содержание

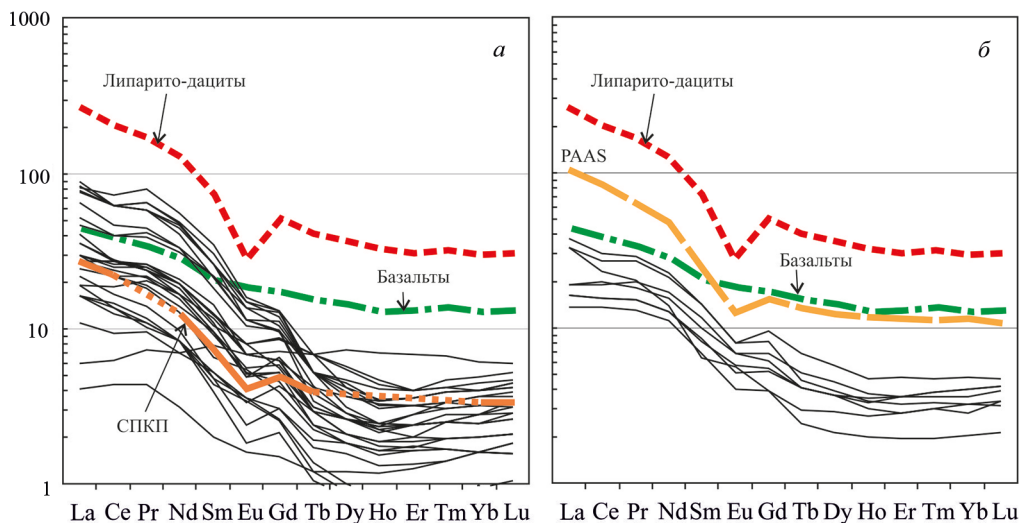


Рис. 8. Содержание РЗЭ в песчаниках (а) и тонкозернистых обломочных породах (б) машакской свиты, нормированное на их содержание в хондрите

Zn в них составляет порядка 1,5, а средние концентрации Ni и Ga практически сопоставимы с теми, что характерны для риолито-дацитов. Остальные элементы-примеси в тонкозернистых обломочных породах характеризуются существенно более низкими средними концентрациями, чем те, что присущи для риолито-дацитов машакской свиты (рис. 7, в). Можно думать, что и вклад последних в формирование геохимического облика глинистых пород если и был, то весьма небольшим.

Нормирование содержания РЗЭ в песчаниках и тонкозернистых обломочных породах машакской свиты на хондрит (Taylor and McLennan, 1985) позволяет видеть несколько иную картину. Средняя величина $(La/Yb)_N$ в песчаниках составляет $\sim 15,2$ (рис. 8, а). При этом максимальное значение данного параметра достигает $\sim 33,8$, а минимальное равно $\sim 1,0$ (значения $(La/Yb)_N < 6,0$ характерны всего для трех образцов — 802-5-2, 802-4-3 и 802-1-6). Одновременно для них практически не выражены отрицательные европиевые аномалии (Eu/Eu^* соответственно равны 0,81, 0,92 и 0,93)). Из 29 образцов песчаников, проанализированных нами методом ICP-MS, только для восьми не наблюдается деплетирование ТРЗЭ, поэтому средняя величина $(Gd/Yb)_N$ для всей их выборки составляет около 2,6. Среднее значение Eu/Eu^* также довольно небольшое ($\sim 0,8$). Все это позволяет, в отличие от сделанных выше выводов, предполагать присутствие в составе песчаников машакской свиты определенной доли продуктов размыва основных магматических пород. При этом несомненно, что основной вклад в формирование песчаников внесли породы кислого состава, хотя и не обязательно субсинхронные с ними риолито-дациты (для последних значения основных параметров нормированных на хондрит спектров следующие: $(La/Yb)_N = 8,94$, $(Gd/Yb)_N = 1,72$ и $Eu/Eu^* = 0,46$). В целом же практически все песчаники машакской свиты отличаются и от чередующихся с ними риолито-дацитов и метабазальтов, и от СПКП заметным деплетированием тяжелых лантаноидов.

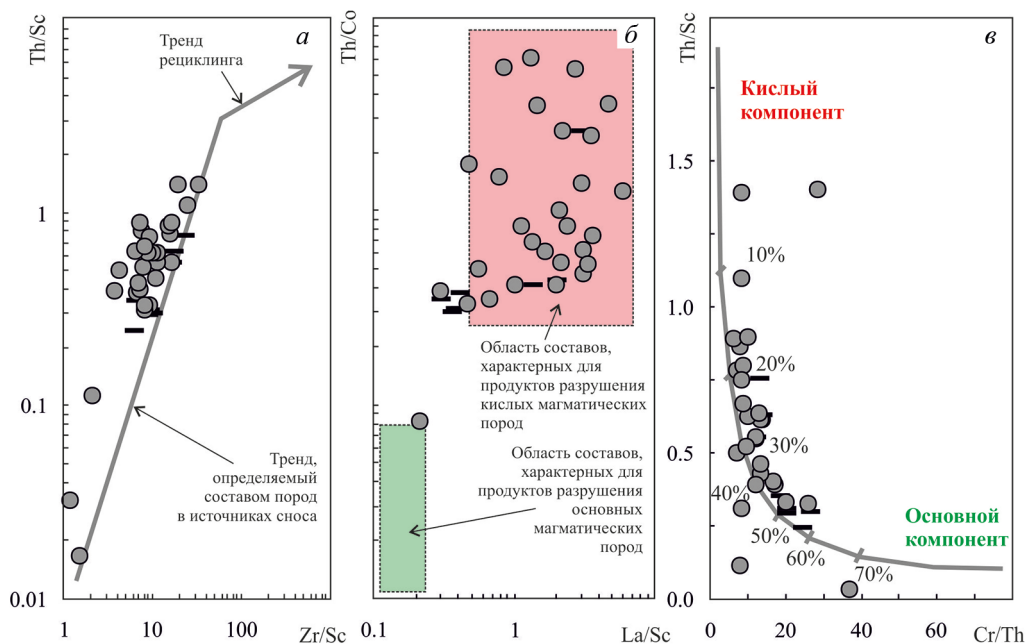


Рис. 9. Положение фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород и песчаников машакской свиты на диаграммах Zr/Sc–Th/Sc (а), La/Sc–Th/Co (б) и Cr/Th–Th/Sc (в)

Распределение РЗЭ в тонкозернистых обломочных породах, напротив, указывает на заметное влияние на формирование их геохимического облика основных магматических образований. Так, среднее значение $(La/Yb)_N$ для глинистых сланцев составляет 7,36 (в шести из восьми проанализированных образцов величина этого параметра варьирует от 4,05 до 6,76, и только в двух она заметно выше — 11,83 и 16,22) (рис. 8, б). Деплетирование ТРЗЭ практически не наблюдается, среднее значение Eu/Eu^* составляет 0,82 (минимум — 0,69, максимум — 1,12; последняя величина характерна для образца 805-3-7, для которого свойственно и максимальное значение $(La/Yb)_N$). Это указывает, по всей видимости, на присутствие в глинистых породах материала как кислых, так и основных пород.

Присущие песчаникам и тонкозернистым обломочным породам машакской свиты значения отношений Zr/Sc и Th/Sc указывают, в соответствии с представлениями (McLennan et al., 1993), на то, что в их составе доминирует материал первого цикла седиментации, т. е. такой, геохимические характеристики которого позволяют делать корректные генетические выводы (рис. 9, а). Распределение фигуративных точек обломочных пород машакской свиты на диаграмме La/Sc – Th/Co (Cullers, 2002) (рис. 9, б) дает основание думать, что они содержат преимущественно материал кислых магматических пород или близких к ним образований. Несколько иной вывод позволяет сделать локализация фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород и песчаников на диаграмме Cr/Th – Th/Sc в редакции (Bracciali et al., 2007) (рис. 9, в). Максимальная доля продуктов разрушения основных пород в составе рассматриваемых нами образований может быть оценена для отдельных образцов как 60 %, но, как правило, она заметно меньше:

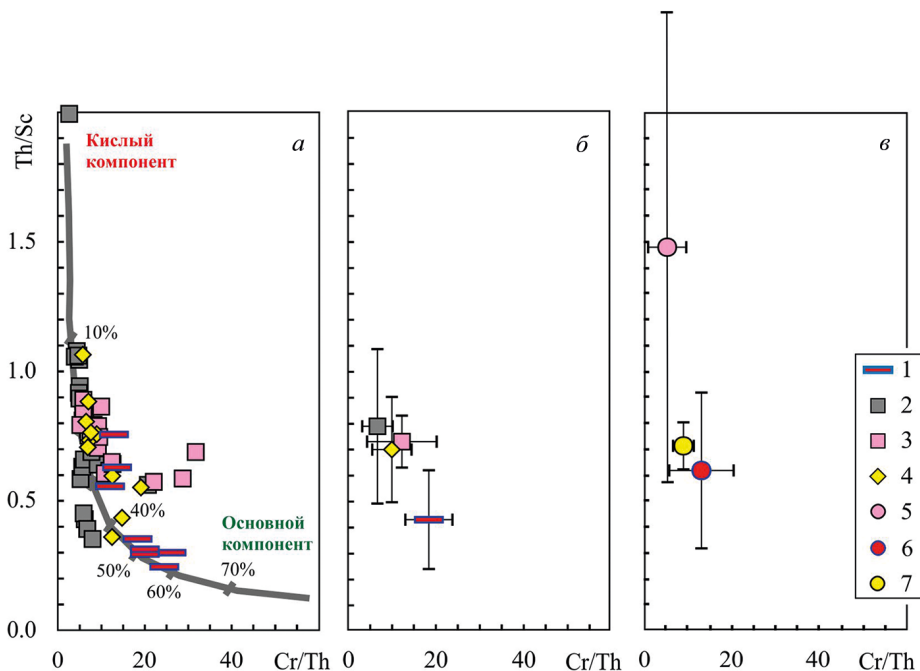


Рис. 10. Положение индивидуальных и средних фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород и песчаников бакальской, юшинской, машакской и зигазино-комаровской свит Башкирского мегантиклинория на диаграмме Cr/Th–Th/Sc

1–4 — тонкозернистые обломочные породы (1 — машакской свиты; 2 — бакальской свиты; 3 — юшинской свиты; 4 — зигазино-комаровской свиты); 5–7 — песчаники (5 — юшинской свиты; 6 — машакской свиты; 7 — зигазино-комаровской свиты). Линии с торцевыми ограничениями — величины стандартных отклонений

для девяти образцов (24% всей выборки песчаников) она составляет менее 20%, для восьми образцов (22%) — менее 30%.

4. Заключение

Все сказанное выше дает основание сделать вывод о том, что ни систематика РЗЭ, ни присущие песчаникам и тонкозернистым обломочным породам машакской свиты значения индикаторных отношений ряда редких и рассеянных элементов, ни свойственные им величины петрохимических модулей не позволяют с полной уверенностью считать, что процессы магматизма, приведшие к появлению в разрезах названной свиты чередующихся с ними потоков и покровов метабазальтов, туфов и экструзивно-субвулканических тел кислых магматических пород, были основным источником слагающего их материала.

Если сделанный выше вывод верен, то литогеохимические особенности песчаников и глинистых пород машакской свиты должны быть в принципе сопоставимы с характеристиками как подстилающих (юшинская и бакальская свиты нижнего рифея), так и перекрывающих осадочных ассоциаций (зигазино-комаровская сви-

та⁹), в образовании которых роль магматизма была по геологическим данным ничтожна.

Однако, как показывает распределение и индивидуальных, и средних фигуративных точек глинистых пород бакальской и юшинской¹⁰ свит нижнерифейской бурзянской серии, а также машакской и зигазино-комаровской свит среднерифейской юрматинской серии на диаграмме Cr/Th–Th/Sc (рис. 10, а, б), тонкозернистые обломочные образования машакской свиты обладают отличающимися от сходных по гранулометрическому составу пород подстилающих и перекрывающих свит особенностями. Положение средней точки песчаников машакской свиты на этом же графике весьма отлично от положения средней точки песчаников подстилающей юшинской свиты, но сопоставимо с положением песчаников вышележащей зигазино-комаровской свиты (рис. 10, в).

Как и положение точек глинистых пород свиты на разнообразных модульных диаграммах, это склоняет нас к представлению о том, что в составе осадочных пород машакской свиты присутствует заметная доля материала магматических пород основного состава. В то же время, был ли этот материал «горячим» пирогенным или «холодным» вулканокластическим, судить по имеющемуся фактическому материалу, к сожалению, невозможно.

Литература

- Дзюценидзе, Г. С. (1965). *Влияние вулканизма на образование осадков*. Москва: Недра.
- Диагностика вулканогенных продуктов в осадочных толщах*. (2012). Сыктывкар: Геопринт.
- Иванов, А. И. (1937). *К стратиграфии и древнему орогенезу западного склона Южного Урала*. Уфа: Башгосиздат, 1–28.
- Иванов, С. Н. (1980). О доордовикской истории Урала и предгеосинклинальном развитии земной коры вообще. В: *Доордовикская история Урала. Вып. 1*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 3–28.
- Ковалев, С. Г. (2008). Позднедокембрийский рифтогенез в истории развития западного склона Южного Урала. *Геотектоника*, 2, 68–79.
- Ковалев, С. Г., Высоцкий, И. В. (2008). Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала). *Литология и полезные ископаемые*, 3, 280–289.
- Ковалев, С. Г., Высоцкий, И. В., Пучков, В. Н., Маслов, А. В., Гареев, Э. З. (2013). *Геохимическая специализация структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория*. Уфа: ДизайнПресс.
- Коссовская, А. Г. (1975). Генетические типы цеолитов стратифицированных формаций. *Литология и полезные ископаемые*, 2, 23–44.
- Львов, К. А. (1936). К тектонике западного склона Южного Урала. *Ученые записки Казанского государственного университета*, 96(102/3), 27–32.
- Маслов, А. В., Гареев, Э. З., Подковыров, В. Н., Ковалев, С. Г., Котова, Л. Н. (2018а). Синрифтовые осадочные образования машакской свиты среднего рифея Южного Урала (краткая литохимическая характеристика). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 63(3), 303–325. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.304>

⁹ В центральной части Башкирского мегантиклинория машакская свита перекрыта кварцевидными песчаниками зигальгинской свиты юрматинской серии. Глинистых пород в ее разрезах практически нет, поэтому нам приходится сравнивать состав глинистых пород машакской свиты с составом тонкозернистых обломочных пород вышележащей зигазино-комаровской свиты.

¹⁰ Юшинская свита, породы которой распространены в центральной части Башкирского мегантиклинория (Ямантауский антиклинорий), является стратиграфическим аналогом бакальской свиты северо-восточных районов мегантиклинория (Стратотип..., 1983).

- Маслов, А. В., Школьник, С. И., Летникова, Е. Ф., Вишневская, И. А., Иванов, А. В., Страховенко, В. Д., Черкашина, Т. Ю. (20186). *Ограничения и возможности литогеохимических и изотопных методов при изучении осадочных толщ*. Новосибирск: ИГМ СО РАН.
- Парначев, В. П. (1988). *Магматизм и осадконакопление в позднедокембрийской истории Южного Урала*. Диссертация доктора геол.-минерал. наук.
- Парначев, В. П., Ротарь, А. Ф., Ротарь, З. М. (1986). *Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского антиклинория*. Свердловск: УНЦ АН СССР.
- Петтиджон, Ф., Потгер, П., Сивер, Р. (1976). *Пески и песчаники*. Москва: Мир.
- Пучков, В. Н. (2010). *Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении)*. Уфа: ДизайнПолиграфСервис.
- Ротарь, А. Ф. (1974). Машакская свита (рифей) на Южном Урале. *Советская геология*, 4, 116–124.
- Ротарь, А. Ф., Ротарь, З. М. (1975). *Особенности метаморфизма пород района горы Яман-Тау на Южном Урале. Геология и условия образования месторождений меди на Южном Урале*. Уфа: БФАН СССР, 153–161.
- Ротарь, А. Ф., Ротарь, З. М. (1982). Машакская свита рифея хребта Большой Шатак (Южный Урал). *Известия АН СССР. Сер. геологическая*, 4, 119–124.
- Савельев, Д. Е., Пучков, В. Н., Ардисламов, Ф. Р., Сначев, В. И. (2009). Вулканогенные породы машакской свиты среднего рифея: геология и петрогеохимия. *Литосфера*, 4, 3–26.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология*. (1983). Москва: Наука.
- Страхов, Н. М. (1963). *Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли*. Москва: Госгеолтехиздат.
- Формирование земной коры Урала*. (1986). Москва: Наука.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (2011). *Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия)*. Сыктывкар: Геопринт.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (2010). *Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах*. Екатеринбург: УрО РАН.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (1988). *Геохимия черных сланцев*. Ленинград: Наука.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (1998). *Диагностика вулканогенного материала в осадочных и параметаморфических горных породах. Проблемы геохимии магматических и метаморфических пород*. Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (2000). *Основы литохимии*. Санкт-Петербург: Наука.
- Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S. (2007). Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. In: J. Arribas, S., Critelli, M. J., Johnsson, ed., *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. Geological Society of America, Special Paper, 420, 73–93. [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(06\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(06))
- Condie, K. C. (1993). Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104, 1–37. [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. (1995). Controls on sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *Journal of Sedimentary Research*, A65, 1–12.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Cullers, R. L. (2002). Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, 191(4), 305–327. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
- 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 no. 5. Ufa: DesignPoligraphService Publ., 119–161.
- Herron, M. M. (1988). Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- McLennan, S. M., Hemming, S. R., McDaniel, D. K., Hanson, G. N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: M. J., Johnsson, A., Basu, ed., Processes controlling the composition of clastic sediments. *Geological Society of America, Special Paper*, 284, 21–40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>

- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution. An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks*. Oxford: Blackwell Scientific, 312.
- Verma, S. P., Armstrong-Altrin, J. S. (2013). New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology*, 355, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>

Статья поступила в редакцию 15 августа 2019 г.
Статья рекомендована в печать 27 ноября 2019 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

Lithochemochemistry of clastic rocks of the Mashak Formation (western slope of the South Urals): In search of “camouflaged” pyroclastics*

A. V. Maslov^{1, 2, 3}, E. Z. Gareev³, V. N. Podkovyrov⁴, S. G. Kovalev³

¹ Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 3, Koptuyuga pr., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Geological Institute of Russian Academy of Sciences, 7, Pyzhevsky per., Moscow, 119017, Russian Federation

³ Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of Russian Academy of Sciences, 16/2, ul. Karla Marksa, Ufa, 450077, Russian Federation

⁴ Institute of Precambrian Geology and Geochronology of Russian Academy of Sciences, 2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Podkovyrov, V. N., Kovalev, S. G. (2020). Lithochemochemistry of clastic rocks of the Mashak Formation (western slope of the South Urals): In search of “camouflaged” pyroclastics. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (1), 121–145. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.107> (In Russian)

The article attempts to solve the problem of the presence of “camouflaged” pyroclastics in sandstones and fine-grained clastic rocks of the Middle Riphean Mashak Formation of the Southern Urals based on litho- and geochemical methods and approaches. As a result of the studies, it was established that in the NKM–GM diagram, the compositional field of silt-clayey rocks of the Mashak Formation is comparable with several clusters of Jurassic slates of the Greater Caucasus, containing volcanogenic material, while the clusters of Paleogene tuffs of the Ukrainian Carpathians and the Gromashor Formation (Pai-Khoi) have a different location. On the (Na₂O + K₂O) – GM diagram, in the indicated field, are situated two of four clusters of metatuffoids and mixed volcanic-sedimentary rocks of the Strelna Group (Kola Peninsula), and one of two clusters of tuffs of the Redkino horizon (Vendian of the East European Platform). The same is true for a number of other examples. In the diagram (Na₂O + K₂O) – FM, none of the four clusters of tuffs and tuffopelites of the Ordovician of the Arga-Tas zone of the Momsky horst-anticlinorium and none of the six clusters of acidic tuffs and tuffites of

* The studies were supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-17-00099, A. V. Maslov, analysis and interpretation of the results).

Ukrainian Carpathians fit in, etc. Consequently, the localization of the compositional field of silt-clayey rocks of the Mashak Formation in the above and a number of other diagrams shows that clusters of various volcanic-terrigenous rocks, metatuffosiltstones, metatuffoids, slates, etc., containing a certain admixture of volcanic products, coincide with the diagrams in half or fewer of the cases. Thus, the analysis of the absolute contents and indicator ratios of trace elements inherent in sandstones and clayey rocks, values of petrochemical modules and the systematics of rare-earth elements (REE) does not allow us to state with certainty that magmatic processes, including subsynchronous sedimentation, were the main source of their constituent material.

Keywords: Southern Urals, Middle Riphean, Mashak Formation, sandstones, clay rocks, litho-geochemistry.

References

- Braccialli, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S. (2007). Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. In: J. Arribas, S., Critelli, M.J., Johnsson, ed., *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. Geological Society of America, Special Paper, 420, 73–93. [https://doi.org/10.1130/2006.2420\(06\)](https://doi.org/10.1130/2006.2420(06))
- Condie, K. C. (1993). Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104, 1–37. [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. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Cox, R., Lowe, D. R. (1995). Controls on sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *Journal of Sedimentary Research*, A65, 1–12.
- Cullers, R. L. (2002). Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology*, 191(4), 305–327. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
- Diagnostics of volcanogenic products in sedimentary sequences*. (2012). Syktyvkar: Geoprint Publ. (In Russian)
- Dzotsenidze, G. S. (1965). *The effect of volcanism on the formation of sediments*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- 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 no. 5. Ufa: DesignPoligraphService Publ., 119–161.
- Formation of the Earth's crust of the Urals* (1986). Moscow: Nauka Publ. (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. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Ivanov, A. I. (1937). *Towards stratigraphy and ancient orogenesis of the western slope of the Southern Urals*. Ufa: Bashgosizdat Publ., 1–28. (In Russian)
- Ivanov, S. N. (1980). About the pre-Ordovician history of the Urals and the pre-geosynclinal development of the earth's crust in general. In: *Doordovikskaya istoriya Urala. Vol. 1.*, Sverdlovsk: Ural Scientific Centre AN USSR Publ., Sverdlovsk, 3–28. (In Russian)
- Kossovskaya, A. G. (1975). Genetic types of zeolites of stratified formations. *Litologiya i mineral'nye resursy*, 2, 23–44. (In Russian)
- Kovalev, S. G. (2008). Late Precambrian riftogenesis in the history of the development of the western slope of the Southern Urals. *Geotektonika*, 2, 68–79. (In Russian)
- Kovalev, S. G., Vysotsky, I. V. (2008). New data on the geology of the Shatak complex (western slope of the South Urals). *Litologiya i mineral'nye resursy*, 3, 280–289. (In Russian)
- Kovalev, S. G., Vysotsky, I. V., Puchkov, V. N., Maslov, A. V., Gareev, E. Z. (2013). *Geochemical specialization of structural-matter complexes of the Bashkir meganticlinorium*. Ufa: DesignPress Publ. (In Russian)
- Л'вов, К. А. (1936). On tectonics of the western slope of the Southern Urals. *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 96 (102/3), 27–32. (In Russian)

- Maslov, A. V., Gareev, E. Z., Podkovyrov, V. N., Kovalev, S. G., Kotova, L. N. (2018). Synrift deposits of the Middle Riphean Mashak Formation, Southern Urals (a short lithochemical characterization). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 63(3), 303–325. (In Russian) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.304>
- Maslov, A. V., Shkolnik, S. I., Letnikova, E. F., Vishnevskaya, I. A., Ivanov, A. V., Strakhovenko, V. D., Cherkashina, T. Yu. (2018). *Constraints and possibilities of lithochemical and isotopic methods in the study of sedimentary strata*. Novosibirsk: IGM SB RAS Publ. (In Russian)
- McLennan, S. M., Hemming, S. R., McDaniel, D. K., Hanson, G. N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: M. J., Johnsson, A., Basu, ed., *Processes controlling the composition of clastic sediments. Geological Society of America, Special Paper*, 284, 21–40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>
- Parnachev, V. P. (1988). *Magmatism and sedimentation in the Late Precambrian history of the Southern Urals*. Doctor of Science. (In Russian)
- Parnachev, V. P., Rotar, A. F., Rotar, Z. M. (1986). *Middle Riphean volcanic-sedimentary association of the Bashkir anticlinorium*. Sverdlovsk: Ural Scientific Centre AN USSR Publ. (In Russian)
- Pettijohn, F., Potter, P., Siver, R. (1976). *Sands and sandstones*. Moscow: Mir Publ. (In Russian)
- Puchkov, V. N. (2010). *Geology of the Urals and CisUrals (main problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)*. Ufa: DesignPolygraphService Publ. (In Russian)
- Rotar, A. F. (1974). Mashak Formation (Riphean) in the South Urals. *Sovetskaia geologiya*, 4, 116–124. (In Russian)
- Rotar, A. F., Rotar, Z. M. (1982). The Mashak Formation of the Riphean of the Bolshoi Shatak ridge (Southern Urals). *Izvestia USSR Academy of Sciences. Ser. geologicheskaya*, 4, 119–124. (In Russian)
- Rotar, A. F., Rotar, Z. M. (1975). *Features of metamorphism of rocks of the Yaman-Tau mountain region in the Southern Urals. Geology and conditions of formation of copper deposits in the South Urals*. Ufa: BFAN USSR Publ., 153–161. (In Russian)
- Saveliev, D. E., Puchkov, V. N., Ardislamov, F. R., Snachev, V. I. (2009). Volcanogenic rocks of the Mashak Formation of the Middle Riphean: geology and petrogeochemistry. *Litosfera*, 4, 3–26. (In Russian)
- Strakhov, N. M. (1963). *Types of lithogenesis and their evolution in the history of the Earth*. Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ. (In Russian)
- Stratotype of Riphean. Stratigraphy. Geochronology*. (1983). Moscow: Nauka Publ. (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*. Oxford: Blackwell Scientific, 312.
- Verma, S. P., Armstrong-Altrin, J. S. (2013). New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology*, 355, 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>
- Yudovich, Ya. E., Ketpuc, M. P. (1998). *Diagnostics of volcanogenic material in sedimentary and metamorphic rocks. Problems of geochemistry of igneous and metamorphic rocks*. St. Petersburg: St. Petersburg University Press. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P. (1988). *Geochemistry of black shale*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P. (2000). *Basics of lithochemistry*. St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P. (2010). Geochemical and mineralogical indicators of volcanic products in sedimentary sequences. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS Publ. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P. (2011). *Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)*. Syktyvkar: Geoprint Publ. (In Russian)

Received: August 15, 2019
Accepted: November 27, 2019

Contact 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