

ГЛИНИСТЫЕ ПОРОДЫ СУИРОВСКОЙ СВИТЫ ВЕРХНЕГО ПРОТЕРОЗОЯ ЗАПАДНОГО СКЛОНА ЮЖНОГО УРАЛА: ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЛИТОХИМИИ

А. В. Маслов

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2, E-mail: amas2004@mail.ru*

Рассмотрены литохимические особенности глинистых пород суировской свиты верхнего протерозоя западного склона Южного Урала. Исходя из распределения точек состава аргиллитов на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Fe}_2\text{O}_3^*+\text{MgO})/\text{SiO}_2$, сделан вывод, что исследованные породы представляют смесь каолинитовых, смектитовых с примесью каолинита и иллита, и хлорит-смектит-иллитовых глин. В составе аргиллитов преобладает петрогенный материал. Аргиллиты не подверглись воздействию К-метасоматоза, а также процессов окремнения. По величине гидролизатного модуля (ГМ) глинистые породы суировской свиты принадлежат преимущественно нормогидролизатам ($\text{ГМ}_{\text{среднее}} 0.41\pm 0.06$). Средняя величина индекса химического изменения для аргиллитов равна 74 ± 4 . По всей видимости, формирование тонкой алюмосиликокластики на палеоводосборах во время накопления отложений суировской свиты происходило в условиях теплого гумидного климата или же указанные палеоводосборы были сложены породами, в составе которых преобладали продукты такого выветривания. Распределение фигуративных точек аргиллитов на ряде диаграмм, позволяющих судить о составе размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород, не дает возможности сделать определенный вывод. На разных дискриминатных палеогеодинамических диаграммах точки состава аргиллитов суировской свиты также тяготеют к разным полям, поэтому для выбора «наиболее правильного» из них необходимо привлечение дополнительных данных.

Ключевые слова: суировская свита, верхний протерозой, Южный Урал, глинистые породы, литохимия

CLAYEY ROCKS OF THE UPPER PROTEROZOIC SUIROVO FORMATION, WESTERN SLOPE OF THE SOUTHERN URALS: THE MAIN FEATURES OF LITHOCHEMISTRY

A. V. Maslov

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS,
16/2, K. Marx St., Ufa, 450077, Russia, E-mail: amas2004@mail.ru*

The lithochemical features of clayey rocks of the Upper Proterozoic Suirovo Formation of the western slope of the Southern Urals are considered. Based on the distribution of mudstone data points on the $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Fe}_2\text{O}_3^*+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ diagram, it was concluded that the studied rocks are a mixture of kaolinite, smectite with an admixture of kaolinite and illite, and chlorite-smectite-illite clays. The composition of mudstones is dominated by petrogenic material. Mudstones were not affected by K-metasomatism and silicification processes. In terms of the hydrolyzate modulus (HM), the clayey rocks of the Suirovo Formation are predominantly normohydrolysates ($\text{HM}_{\text{average}}$ is 0.41 ± 0.06). The average value of the CIA for mudstones is 74 ± 4 . Apparently, the formation of thin-grained aluminosilicoclastics on paleo-catchments during the accumulation of deposits of the Suirovo Formation took place in a warm humid climate, or the indicated paleo-catchments were composed of rocks dominated by the products

Для цитирования: Маслов А.В. Глинистые породы суировской свиты верхнего протерозоя западного склона Южного Урала: основные черты литохимии // Геологический вестник. 2021. № 2. С. 31–45. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-2-3.

For citation: Maslov A.V. (2021) Clayey rocks of the Upper Proterozoic Suirovo Formation, western slope of the Southern Urals: the main features of lithochemistry. *Geologicheskii vestnik*. No. 2. P. 31–45. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-2-3.

© А.В. Маслов, 2021

of such weathering. The distribution of the data points of mudstones on a number of diagrams, which make it possible to judge the composition of rock complexes eroded in paleo-catchment areas, does not make it possible to draw a definite conclusion. On different paleogeodynamic diagrams, the data points of the mudstones of the Suirvo Formation also located in the different fields, therefore, to select the “most correct” of them, additional data are needed.

Keywords: Suirvo Formation, Upper Proterozoic, Southern Urals, clayey rocks, lithochemistry

Введение

Под литохимическими особенностями осадочных пород мы понимаем те, что определяются содержанием в них основных породообразующих оксидов [Маслов, 2005]. Анализ их позволяет с определенной долей успеха реконструировать палеоклиматические и палеогеодинамические обстановки формирования осадочных образований, а также установить состав пород-источников сноса и, иногда, палеогеографические характеристики конечных водоемов стока. Примеров работ подобного рода много как в отечественной, так и зарубежной литературе (обзор и анализ см., например, [Маслов, 2005; Маслов и др., 2018б, 2020 и др.]).

В настоящей публикации рассмотрены литохимические особенности глинистых пород суировской свиты верхнего протерозоя западного склона Южного Урала. Единственный район, где известны ее представительные обнажения, находится в окрестностях д. Толпарово (бассейн р. Зилим, обрывы правого берега р. Мал. Толпар и крупные выемки здесь же вдоль недостроенной автодороги в сторону д. Куюково) (рис. 1, 2).

Общая характеристика объекта исследований

Впервые суировская свита выделена как самостоятельное литостратиграфическое подразделение в работе [Келлер и др., 1984]. Б.М. Келлер считал, что отложения толпаровской и суировской свит выполняют крупную эрозионную долину в образованиях верхнего рифея; амплитуда ее вреза оценивалась им более чем в 600–700 м [Стратотип..., 1983]. Суировская свита объединяет песчано-алевролитовые микститы с валунами осадочных и магматических пород, алевролиты и аргиллиты [Келлер и др., 1984; Маслов и др., 2001]. Мощность свиты составляет ориентировочно около 350 м. Модельный Rb-Sr возраст фракции менее 0.001 мм, выделенной из аргиллитов суировской свиты, равен 638 ± 70 млн лет [Горожанин, 1995]. Точная стратиграфическая принадлежность свиты все еще дискуссионна; одни

авторы считают ее верхнерифейской, другие нижневендской. Меняющиеся с течением времени оценки возраста нижней границы венда вносят в этот вопрос все больше неопределенности.

Сопоставление разрезов раннего венда Южного и Среднего Урала (соответственно толпаровской и суировской, танинской, гаревской, койвинской, бутонской и керносской свит) с фациальными моделями гляциального осадконакопления [Powell, 1984; Anderson, Molnia, 1989; Brodzikowski, Van Loon, 1991; и др.] показало, что относительно маломощные марино-гляциальные последовательности Южного Урала с микститамы, тяготеющими к их нижним частям, достаточно хорошо соответствуют типу собственно шельфовых осадочных ассоциаций [Маслов, 2000]. Был сделан вывод, что накопление осадочных последовательностей толпаровской и суировской свит происходило, скорее всего, в «кратонно-шельфовой» обстановке с активной переработкой ранее накопившихся гляциальных и марино-гляциальных отложений и сохранением их от полного уничтожения в ряде глубоких врезанных долин.

Наиболее подробная характеристика крупных обнажений суировской свиты в ее типовом районе приведена в публикации [Горожанин и др., 2015, с. 33]. Детальное их исследование позволило установить присутствие среди отложений свиты множества подводноползневых текстур с характерными «рулетами» и каналов-промоин. С последними ассоциируют конгломераты, слагающие быстро выклинивающиеся тела. Предполагается, что они либо формировались в этих каналах, либо сползали(?) в них. Сказанное позволяет думать, что «...горизонт тиллитовидных конгломератов [в разрезе суировской свиты — А.М.] далеко не единичен». В то же время генезис конгломератов остался для авторов неясным; одна из гипотез их генезиса — это «...сгруженный тилль, который концентрировался при оползании в каналы-промоины».

В.М. Горожаниным с соавторами [2015] обосновывается также вывод о том, что «...Фациальный профиль осадконакопления в целом — от низов толпаровской свиты до верхов суировской, показы-

вает резкое углубление бассейна, наступившее в условиях трансгрессии, возможно, связанное с таянием ледника ... формирование подводно-оползневых структур указывает на увеличивающуюся крутизну склонов бассейна...». Предполагается также, что во время накопления отложений суировской и подстилающей ее толпаровской свиты

«...произошла смена от мелководных прибрежно-морских обстановок до глубоководных условий авандельты или шельфа. Изменились окислительно-восстановительные условия. Воды, обогащенные кислородом на начальном этапе развития прибрежного шельфа, с углублением бассейна сменились бескислородными или эвксинными...».

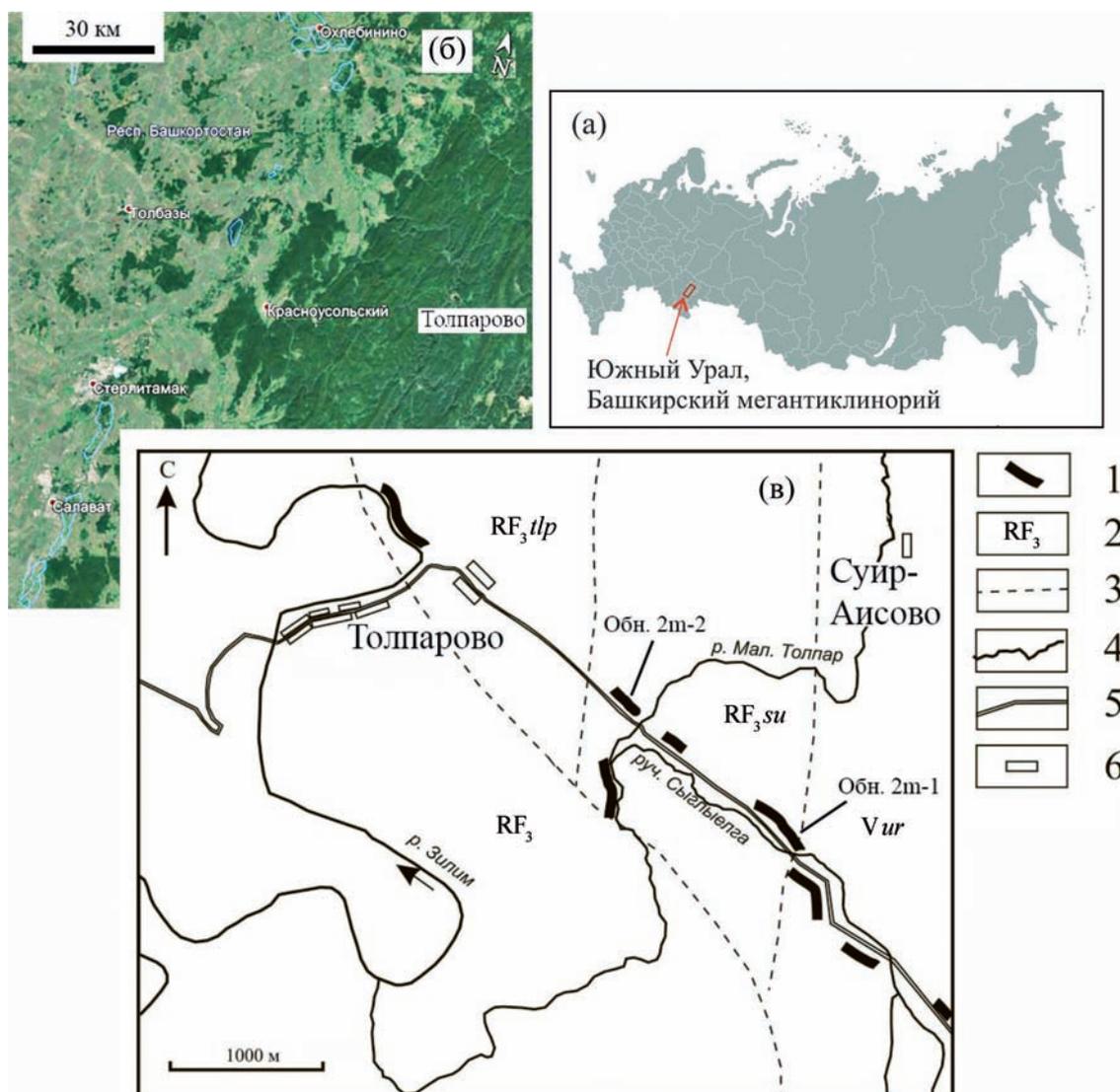


Рис. 1. Обзорные карты района работ (а, б) и схема положения исследованных обнажений суировской свиты в окрестностях д. Толпарово (в), по [Горожанин и др., 2015] с изменениями. Обзорная схема России заимствована с сайта <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>

Примечания: 1 — крупные обнажения; 2 — индексы стратиграфических подразделений (RF_3 — верхний рифей нерасчлененный, RF_{3tlp} — толпаровская свита, RF_{3su} — суировская свита, Vur — урюкская свита); 3 — границы свит; 4 — реки и речушки; 5 — дорога; 6 — населенные пункты.

Fig. 1. Overview maps of the study area (a, б) and a position of the studied outcrops of the Suirovo Formation in the vicinity of the Tolparovo village (в), after [Gorozhanin et al., 2015] with changes. The overview map of Russia is borrowed from the site <https://sklyarov.studio/projects/vector-map-russia>

Notes: 1 — large outcrops; 2 — indices of stratigraphic units (RF_3 — undivided Upper Riphean deposits, RF_{3tlp} — Tolparovo Fm., RF_{3su} — Suirovo Fm., Vur — Uryuk Fm.); 3 — the boundaries of the formations; 4 — rivers and streams; 5 — road; 6 — villages.



Рис. 2. Общий вид обнажений 2m-1 (а) и 2m-2 (б) и особенности распределения глинистых пород в них (в, г).
Фото Л.В. Бадиды и С.А. Дуба

Fig. 2. General view of outcrops 2m-1 (а) and 2m-2 (б) and peculiarities of distribution of clay rocks in them (в, г).
Photo by L.V. Badida and S.A. Dub

Предшествующие литохимические исследования

Пожалуй, единственной работой, в которой приводится валовый химический состав 1(!!!) образца глинисто-алевритовой породы суировской свиты, является публикация Э.З. Гареева [1998]. Содержание оксида алюминия в этом образце составляет около 15 мас. %, оксида калия — порядка 9 мас. % (см. колонку А в табл. 1). Рассчитанное нами значение индекса химического изменения ($CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$ [Nessbit, Young, 1982]) для указанного образца равно 47, что либо указывает на практически полное отсутствие влияния при формировании слагающего его тонкозернистого алюмосиликокластического материала процессов химического выветривания на субстрат, либо предполагает определенные аналитические несоответствия.

Фактический материал

Для реконструкции особенностей формирования глинистых пород суировской свиты использованы данные полных химических анализов 20 образцов (ИГГ УрО РАН, рентгеноспектральный флуоресцентный метод, СРМ-35 и EDX-8000, аналитики — Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, И.А. Желунин, А.А. Некрасова) аргиллитов, отобранных в обнажениях 2м-1 и 2м-2 (см. рис. 1в). Степень выветрелости аргиллитов в указанных обнажениях несколько различается, поэтому на большинстве построенных нами диаграмм намечаются два кластера фигуративных точек. Содержание основных породообразующих оксидов для ряда представительных образцов аргиллитов, а также значения некоторых литохимических модулей и индексов выветривания представлены в табл. 1.

Среднее содержание SiO_2 в образцах аргиллитов суировской свиты из нашей выборки составляет 61.58 ± 3.06 мас. % (минимум — 57.44, максимум — 65.64 мас. %). Среднее содержание оксида титана равно 0.91 ± 0.13 мас. % (минимум — 0.71, максимум — 1.10 мас. %). Минимальное содержание Al_2O_3 во всей выборке составляет 15.03 мас. %, максимальное достигает 19.73 мас. %. Среднее содержание $Fe_2O_3^{*1}$ составляет соответственно 6.56 ± 1.52 мас. % (мин. — 4.67, макс. — 10.42 мас. %). Содержание MgO в аргиллитах варьирует от 1.20

до 2.41 мас. % (среднее — 1.86 ± 0.38 мас. %). Разброс минимального и максимального содержания оксида кальция невелик (0.20...0.66 мас. %). Минимальное содержание Na_2O составляет 0.35 мас. %, максимальное достигает 0.94 мас. % (среднее содержание — 0.63 ± 0.23 мас. %). Средние содержания K_2O и P_2O_5 равны соответственно 3.97 ± 0.43 и 0.07 ± 0.02 мас. %.

Сопоставление со средним постархейским австралийским глинистым сланцем (PAAS [Taylor, McLennan, 1985]) показывает, что аргиллиты суировской свиты обладают сходными с ним содержаниями оксидов кремния, титана, алюминия, общего двухвалентного железа и калия (рис. 3). Заметно более низкими в них являются содержания CaO , Na_2O и P_2O_5 . Аргиллиты укской свиты верхнего рифея обладают по сравнению с глинистыми породами суировской свиты несколько более высокой концентрацией оксида кальция и варьирующим содержанием $FeO_{общ}$ и Na_2O . Содержание остальных породообразующих оксидов в них сопоставимо с их содержанием в аргиллитах суировской свиты. Глинистые породы бакеевской свиты (образцы отобраны на восточной окраине г. Усть-Катав, Челябинская область) характеризуются несколько более высоким, чем это свойственно аргиллитам суировского уровня, содержанием оксидов кальция и натрия, а также P_2O_5 .

На классификационной диаграмме $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MgO) / SiO_2$ (диаграмма НКМ–ФМ [Юдович, Кетрис, 2000]) фигуративные точки аргиллитов суировской свиты локализованы в области

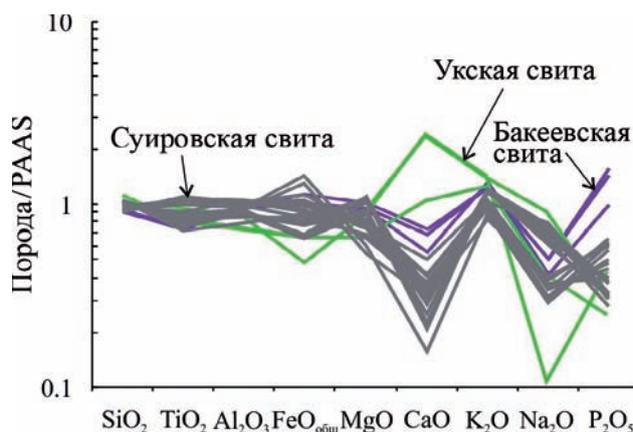


Рис. 3. Нормированное на PAAS распределение основных породообразующих оксидов в глинистых породах укской, суировской и бакеевской свит

Fig. 3. PAAS-normalized distribution of main rock-forming oxides in clayey rocks of the Uk, Suirvo and Bakeevo formations

¹ $Fe_2O_3^*$ — суммарное железо в виде Fe_2O_3 .

Таблица. Содержание основных породообразующих оксидов (мас. %) и значения некоторых модулей и индексов в представительных образцах аргиллитов суировской свиты

Table. The content of the main rock-forming oxides (wt. %) and the values of some modules and indices in representative samples of mudstones of the Suirovo Formation

Компоненты. модули, индексы	А (n = 1)	Образцы										Б (n = 20)
		20m-1-1	20m-1-4	20m-1-7	20m-1-8	20m-1-10	20m-2-1	20m-2-3	20m-2-6	20m-2-8	20m-2-10	
SiO ₂	62.85	60.81	58.05	57.51	59.67	65.64	63.80	65.11	63.84	64.11	61.58±3.06 57.44-65.64	
TiO ₂	0.73	0.90	1.04	1.05	0.91	0.81	0.79	0.71	0.80	0.85	0.91±0.13 0.71-1.10	
Al ₂ O ₃	11.98	17.57	19.06	19.26	19.73	16.69	16.39	15.03	17.65	16.61	17.80±1.44 15.03-19.73	
Fe ₂ O ₃ *	4.87	9.36	7.18	7.62	6.80	4.67	5.87	6.43	4.77	5.70	6.56±1.52 4.67-10.42	
MnO	0.10	0.02	0.03	0.08	0.02	0.04	0.24	0.27	0.11	0.19	0.10±0.10 0.02-0.27	
MgO	1.36	1.20	1.80	1.74	1.43	1.94	2.28	2.23	2.28	2.06	1.86±0.38 1.20-2.41	
CaO	0.78	0.40	0.54	0.53	0.46	0.37	0.44	0.46	0.39	0.29	0.41±0.11 0.20-0.66	
Na ₂ O	1.23	0.38	0.41	0.42	0.44	0.82	0.87	0.94	0.84	0.72	0.63±0.23 0.35-0.94	
K ₂ O	9.07	3.54	3.88	3.80	3.57	4.39	4.34	3.77	4.52	4.39	3.97±0.43 3.04-4.52	
P ₂ O ₅	0.05	0.10	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07±0.02 0.04-0.10	
ппп	3.99	7.10	7.70	7.81	6.82	4.52	4.54	4.78	4.38	4.93	5.89±1.34 4.38-7.81	
Сумма	99.86	99.71	99.81	99.87	99.90	99.95	99.62	99.77	99.64	99.90	—	
ГМ	0.32	0.42	0.47	0.49	0.46	0.34	0.37	0.34	0.37	0.36	0.41±0.06 0.34-0.51	
ТМ	0.048	0.051	0.055	0.054	0.046	0.048	0.048	0.047	0.045	0.051	0.051±0.004 0.045-0.057	
НКМ	0.69	0.21	0.23	0.22	0.2	0.31	0.32	0.31	0.30	0.31	0.26±0.05 0.20-0.32	
ФМ	0.07	0.13	0.15	0.16	0.14	0.1	0.13	0.13	0.11	0.12	0.14±0.03 0.10-0.20	
НМ	0.69	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.04±0.02 0.02-0.06	
ЦМ	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.19	0.2	0.25	0.19	0.16	0.16±0.05 0.10-0.25	
ЖМ	0.31	0.32	0.36	0.38	0.33	0.27	0.36	0.43	0.27	0.34	0.36±0.07 0.27-0.55	
СІА		78	76	77	78	71	70	70	72	72	74±4 70-80	
ІСV		0.71	0.78	0.79	0.69	0.78	0.89	0.97	0.77	0.84	0.81±0.08 0.69-0.97	

Примечания к таблице: n — число проанализированных образцов. В колонке Б в числителе — среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе — минимальное и максимальное значение. Прочерк — значение не рассчитывалось. ппп — потери при прокаливании. Значения модулей рассчитаны в соответствии с [Юдович, Кетрис, 2000], значения индексов CIA и ICV — согласно [Nesbitt, Young, 1982; Cox et al., 1995].

Notes to the table: n is the number of analyzed samples. Column Б: in the numerator — the arithmetic mean and standard deviation, in the denominator — the minimum and maximum values. Dash — the value was not calculated. ппп — loss on ignition. The values of the modules were calculated in accordance with [Yudovich, Ketris, 2000], the values of the CIA and ICV indices, according to [Nesbitt, Young, 1982; Cox et al., 1995].

перекрытия полей I (преимущественно каолини-
товые глины), II (преимущественно смектитовые
с примесью каолинита и иллита глины) и V (хло-
рит-смектит-иллитовые глины), а также в поле V
(рис. 4).

По величине гидролизатного модуля ($GM = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO) / SiO_2$)¹ глинистые породы суировской свиты принадлежат преимущественно нормогидролизатам (рис. 5). Среднее значение ГМ для них составляет 0.41 ± 0.06 (минимум — 0.34, максимум — 0.51). Для сравнения — величина ГМ в PAAS составляет 0.43. Средняя величина титанового модуля ($TM = TiO_2 / Al_2O_3$) равна 0.051 ± 0.004 , максимальная достигает 0.057. Значения модуля нормированной щелочности ($HKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$) для аргиллитов суировской свиты изменяются от 0.20 до 0.32. Фемический ($FM = (Fe_2O_3^* + MgO) / SiO_2$) модуль варьирует от 0.10 до 0.20; его средняя величина составляет 0.14 ± 0.03 . Среднее значение натриевого модуля ($NM = Na_2O / Al_2O_3$) равно 0.04 ± 0.02 . Щелочной модуль ($ЩМ = Na_2O / K_2O$) варьирует от 0.10 до 0.25, его среднее значение составляет 0.16 ± 0.05 . Наконец, средняя величина железного модуля ($JM = (Fe_2O_3^* + MnO) / (Al_2O_3 + TiO_2)$) равна 0.36 ± 0.07 .

Для аргиллитов суировской свиты характерна слабая положительная корреляция между модулями ТМ и ЖМ ($r = 0.34$), а между модулями НКМ и ГМ она сильная отрицательная ($r = -0.92$). В соответствии с представлениями [Юдович, Кетрис, 2000, 2015 и др.] это позволяет считать, что в составе глинистых пород рассматриваемого нами уровня верхнего протерозоя преобладает петрогенный материал, т.е. материал, прошедший только один седиментационный цикл.

На диаграмме $K_2O / Na_2O - SiO_2 / Al_2O_3$ (рис. 6) фигуративные точки аргиллитов расположены вне области значений K_2O / Na_2O , указывающих, в соответствии с представлениями [Bolnar et al., 2005], на воздействие на породы К-метасоматоза, а также характеризуются величинами SiO_2 / Al_2O_3 , не типич-

ными для пород, испытывавших влияние процессов окремнения.

Все сказанное позволяет использовать обычный арсенал приемов и подходов к реконструкции условий формирования глинистых пород суировской свиты верхнего протерозоя западного склона Южно-Урала [Юдович, Кетрис, 2000; Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005; Маслов и др., 2018б].

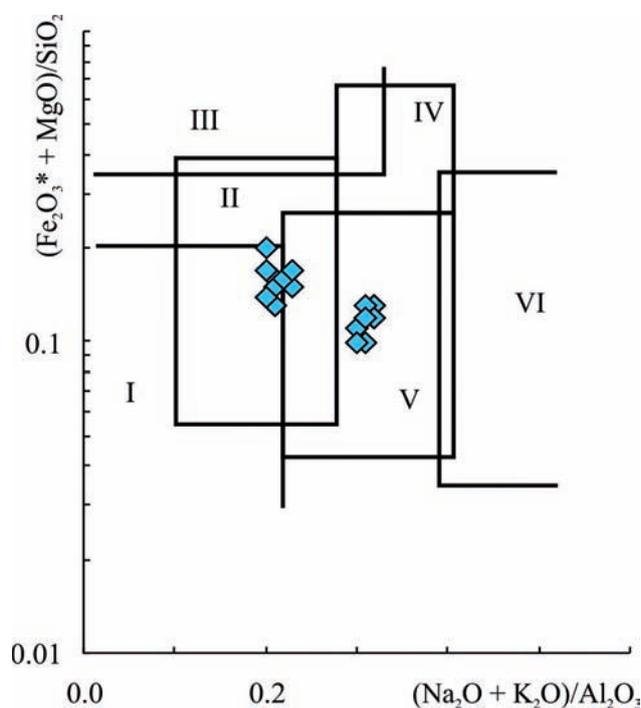


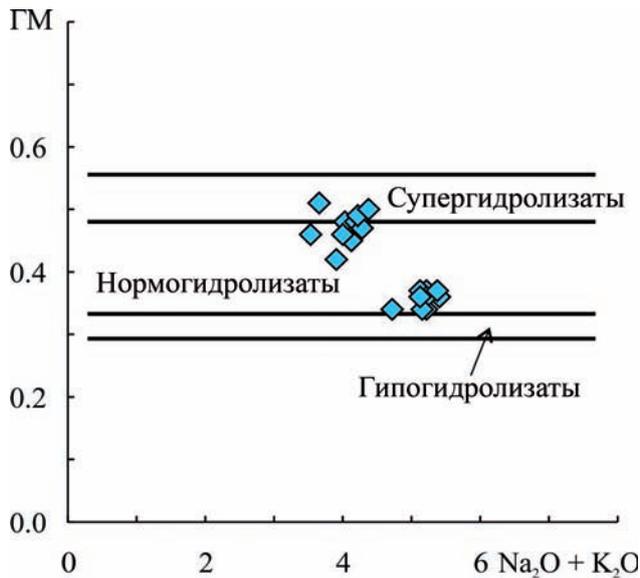
Рис. 4. Положение фигуративных точек глинистых пород суировской свиты на диаграмме $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MgO) / SiO_2$

Поля состава глинистых пород: I — преимущественно каолини-
товых; II — преимущественно смектитовых с примесью каолинита
и иллита; III — преимущественно хлоритовых с примесью Fe-
иллита; IV — хлорит-иллитовых; V — хлорит-смектит-иллитовых;
VI — иллитовых со значительной примесью дисперсных полевых
шпатов.

Fig. 4. Position of the data points of clayey rocks of the Suirvo Formation on the $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MgO) / SiO_2$ diagram

Fields of clay rocks: I — mainly kaolinite; II — mainly smectite with an admixture of kaolinite and illite; III — mainly chlorite with an admixture of Fe-illite; IV — chlorite-illite; V — chlorite-smectite-illite; VI — illite with a significant admixture of dispersed feldspars.

¹ Все формулы модулей здесь и далее по [Юдович, Кетрис, 2000].



Пис. 5. Положение фигуративных точек глинистых пород суировской свиты на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{--GM}$

Fig. 5. The position of the data points of the clayey rocks of the Suirvo Formation on the $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{--GM}$ diagram

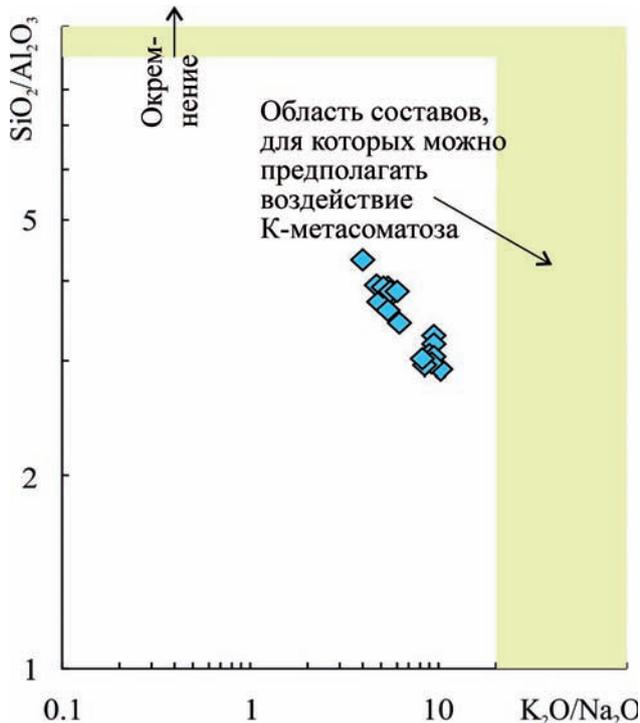


Рис. 6. Распределение фигуративных точек глинистых пород суировской свиты на диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 6. Distribution of the data points of clayey rocks of the Suirvo Formation on the $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram

Источники тонкой алюмосиликокластики для глинистых пород свиты

Реконструкции состава пород-источников тонкой алюмосиликокластики по валовым химическим анализам могут быть выполнены несколькими разными способами. Так, на диаграммах F1–F2¹ и F3–F4² [Roser, Korsch, 1988] фигуративные точки аргиллитов суировской свиты расположены в основном в полях составов, сформированных из продуктов размыва осадочных пород и магматических пород среднего состава. Несколько точек попадает в поле продуктов размыва магматических пород основного состава (рис. 7а, б). На диаграмме ICV³–CIA [Potter et al., 2005] все точки состава аргиллитов тяготеют к линии тренда, берущей начало у средней точки среднепротерозойских базальтов по [Condie, 1993] (см. рис. 7в), т.е. в последнем случае источниками тонкой алюмосиликокластики являлись основные субстраты. Очевидно, что по распределению фигуративных точек аргиллитов суировской свиты на представленных трех диаграммах однозначного вывода о составе размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород сделать нельзя. Для решения этого вопроса, по всей видимости, необходимо привлекать данные о содержании и соотношении в аргиллитах редких и рассеянных элементов [Маслов и др., 2018б, 2020].

Интенсивность химического выветривания на палеоводосборах во время формирования глинистых пород свиты

Судить о палеоклимате, точнее об интенсивности химического выветривания на палеоводосборах, по данным о валовом химическом составе глинистых пород можно на основе анализа величин ряда индикаторов — гидролизатного модуля [Юдович, Кетрис, 2000], химического индекса изменения (CIA)⁴

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

² $F3 = -1.773 \times \text{TiO}_2 + 0.607 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.76 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^* - 1.5 \times \text{MgO} + 0.616 \times \text{CaO} + 0.509 \times \text{Na}_2\text{O} - 1.224 \times \text{K}_2\text{O} - 9.09$; $F4 = 0.445 \times \text{TiO}_2 + 0.07 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^* - 1.142 \times \text{MgO} + 0.438 \times \text{CaO} + 1.475 \times \text{Na}_2\text{O} + 1.426 \times \text{K}_2\text{O} - 6.861$.

³ ICV — индекс изменения состава $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$ [Cox et al., 1995].

⁴ Значение CIA=70 считается пороговым для разграничения отложений, формировавшихся в обстановках холодного и теплого климата [Visser, Young, 1990].

[Nesbitt, Young, 1982], индекса изменения состава (ICV) [Cox et al., 1995] и ряда других показателей. Предпосылки и методические аспекты применения перечисленных индикаторов палеоклимата обсуждались в литературе неоднократно, и здесь на них мы не останавливаемся.

Среднее значение ГМ для аргиллитов суировской свиты, как уже было отмечено выше, составляет 0.41 ± 0.06 , и почти в точности сопоставимо с величиной гидролизатного модуля для PAAS (0.43). Это позволяет предполагать, что глинистые породы рассматриваемого нами уровня верхнего протерозоя западного склона Южного Урала сформированы за счет преимущественно умеренно выветрелого материала.

Средняя величина индекса химического изменения для аргиллитов суировской свиты равна 74 ± 4 (пределы изменения значений CIA — 70...80). Основываясь на представлениях [Visser, Young, 1990], можно думать, что формирование тонкой алюмосиликокластики на палеоводосборах исследуемого нами интервала времени происходило в условиях теплого гумидного климата или же, что указанные палеоводосборы были представлены породами, в составе которых преобладали продукты такого выветривания. Для PAAS значение CIA составляет 69.

Ранее мы уже отмечали [Маслов, 2021], что ряд авторов сопоставляют величины CIA, свойственные глинистым породам древних осадочных последовательностей, со значениями, характерными для тонкозернистых осадков современных крупных речных систем, и соответственно делают выводы о климате эпох их формирования. Так, например, авторы работы [González-Álvarez, Kerrich, 2012] сделали вывод, что аргиллиты мезопротерозойской надсерии Белт-Перселл со средним значением CIA 72 ± 6 сопоставимы с осадками крупных рек, дренирующих области гумидного умеренного и тропического климата (рр. Ориноко, Нил, Амазонка и др.). Такой подход имеет, конечно, много подводных камней, но если все же считать, что он корректен, то можно предполагать, что формирование глинистых отложений суировского уровня западного склона Южного Урала происходило в обстановках, сходных с современными обстановками гумидного тропического климата (рис. 8). Очевидно, что такой вывод в корне противоречит представлениям о принадлежности отложений толпаровской и суировской свит к «диамиктитовой последовательности», основанным на присутствии в их разрезах тиллитовидных конгломератов и кэп-карбонатов [Келлер и др., 1984; Горожа-

нин, 1988; Горожанин и др., 2015], а также на исследовании особенностей строения разрезов нижней части ашинской серии [Маслов, 2000].

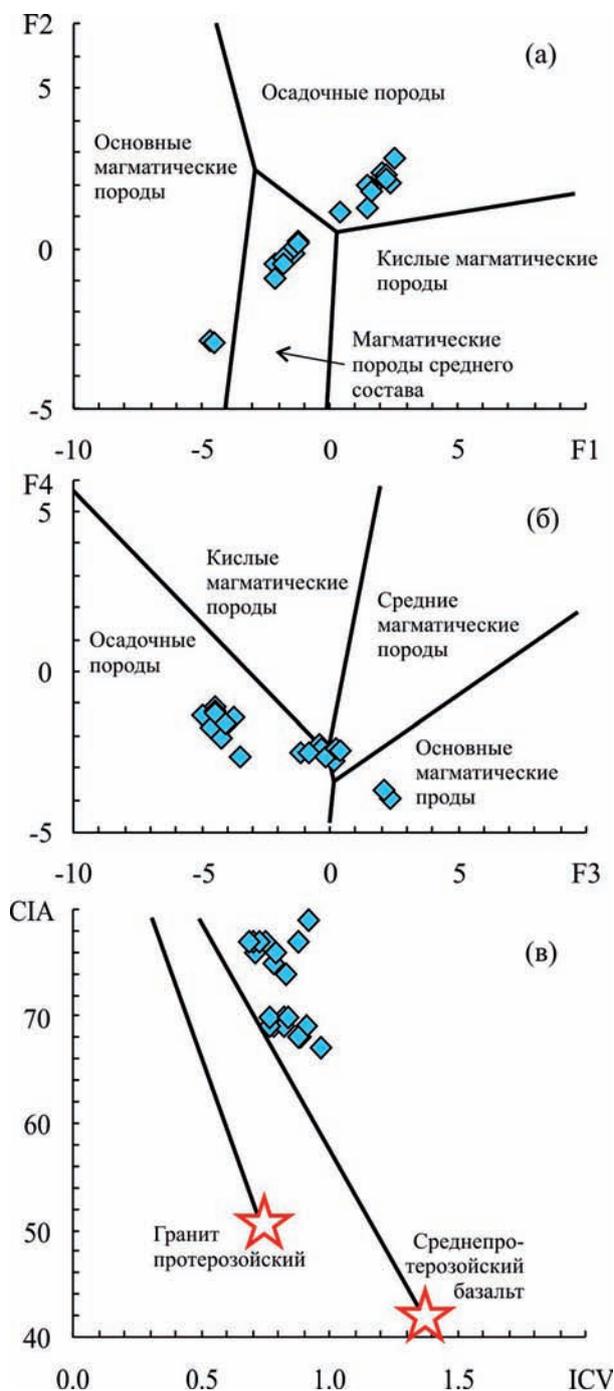


Рис. 7. Локализация фигуративных точек глинистых пород суировской свиты на диаграммах F1–F2 (а), F3–F4 (б) и ICV–CIA (в)

Fig. 7. Localization of the data points of clayey rocks of the Suirvo Formation on the F1–F2 (a), F3–F4 (б) and ICV–CIA (в) diagrams

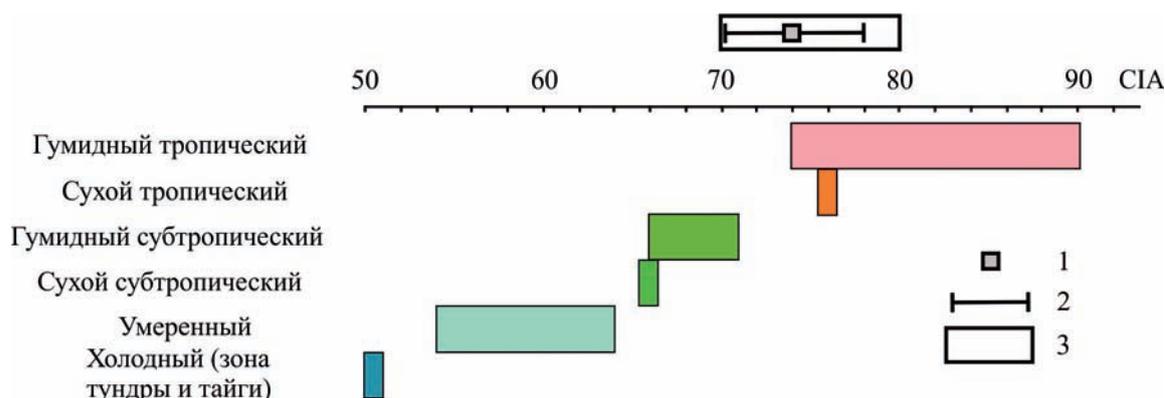


Рис. 8. Распределение величин CIA в тонкозернистых осадках современных крупных рек различных климатических зон, по [Маслов, 2021 и ссылки там], и в глинистых породах суировской свиты

Условные обозначения: 1 — среднее значение; 2 — стандартное отклонение; 3 — минимальное и максимальные значения.

Fig. 8. Distribution of the CIA values in the fine-grained sediments of modern large rivers of different climatic zones, according to [Maslov, 2021 and references there], and in clayey rocks of the Suirovo Formation

Legend: 1 — average value; 2 — standard deviation; 3 — minimum and maximum values.

Между значениями ГМ и CIA наблюдается сильная положительная корреляция ($r=0.91$), что позволяет относиться к сделанным на основе двух названных индикаторов выводам о палеоклиматических обстановках суировского времени с большим доверием (справедливости ради отметим, что между CIA и ICV корреляция умеренная отрицательная !!!).

Вариации величин ICV в аргиллитах суировского уровня отвечают интервалу значений 0.69...0.97 (среднее — 0.81 ± 0.08). Это предполагает, что в составе аргиллитов присутствует существенная доля глинистых минералов. Иными словами — рассматриваемые нами аргиллиты сложены материалом, подвергшимся достаточно выраженному химическому выветриванию.

Палеогеодинамические обстановки времени формирования глинистых пород свиты

Для расшифровки палеогеодинамических обстановок формирования глинистых пород по их валовому химическому составу предложено несколько диаграмм. Все они имеют различные недостатки [Armstrong-Altrin, Verma, 2005; Ryan, Williams, 2007; Caracciolo et al., 2012; Verma, Armstrong-Altrin, 2016; и др.], но тем не менее широко применяются в отечественной и зарубежной литературе. В данной работе использованы диаграммы $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ [Bhatia, 1983], $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ [Roser,

Korsch, 1986] и $\text{DF1} - \text{DF2}$ [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], на которых показаны в разных сочетаниях поля составов терригенных пород (как обломочных, так и глинистых), характерных для пассивных и активных континентальных окраин, при/периконтинентальных и океанических островных дуг. При анализе получаемых с их помощью выводов следует иметь в виду, что диаграмма $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ наиболее приемлема при исследовании периостроводужных отложений, т.е. отложений, состав которых в существенной степени контролируется составом магматических и вулканических пород, размываемых в пределах расположенных вблизи областей их накопления вулканических дуг. Диаграмма $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ может использоваться как для периостроводужных отложений (отложений глубоководных желобов, преддуговых, междуговых и задуговых бассейнов и др.), так и для отложений менее активных геодинамических обстановок. Диаграмма $\text{DF1} - \text{DF2}$ (нами использован ее высококремнистый, для составов с $\text{SiO}_2 > 63$ мас. %,

$$\text{DF1} = -0.263 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.604 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.725 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.660 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 2.191 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.144 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.304 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.054 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.330 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.588;$$

$$\text{DF2} = -1.196 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.064 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.303 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.436 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.838 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.407 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.021 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.706 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.126 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.068.$$

Значок «adj» показывает здесь, что использованы содержания оксидов, пересчитанные на безводную основу, однако, как показано нами в публикации [Маслов и др., 2018a], использование непересчитанных таким образом концентраций оксидов не ведет к существенным ошибкам.

вариант) позволяет, как считают ее авторы, разграничивать отложения островодужных, рифтогенных и коллизионных обстановок, но это далеко не всегда так [Маслов и др., 2019; Маслов, Подковыров, 2020].

Таким образом, каждая из перечисленных диаграмм позволяет расшифровать только те обстановки, «узнавать которые она обучена». Конечно, на диаграмму $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ можно нанести точки состава платформенных аргиллитов, но вот принимать за «чистую монету» вывод о том, что они, скажем, представляют обстановки активной континентальной окраины (будучи локализованы в указанном поле), скорее всего, не следует. Это же относится и к возможному выводу о принадлежности их к пассивным континентальным окраинам (если фигуративные точки платформенных аргиллитов будут тяготеть к нему), так как данная диаграмма «обучена» на примере преимущественно различных периостроводужных обстановок.

На диаграмме $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ все фигуративные точки аргиллитов суировской свиты тяготеют к полю составов осадков периферии океанических островных дуг (рис. 9а). На диаграмме $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, напротив, все точки состава аргиллитов сосредоточены в поле составов, типичных для пассивных континентальных окраин (см. рис. 9б). На диаграмме DF1 – DF2 точки аргиллитов расположены в поле коллизионных обстановок (см. рис. 9в). Из всех трех возможных выводов более обоснованными представляются второй и третий. Но выбрать из них «наиболее правильный» невозможно.

Выводы

Сопоставление с PAAS показывает, что аргиллиты суировской свиты обладают сходными с ним содержаниями оксидов кремния, титана, алюминия, общего двухвалентного железа и калия. Заметно более низкими в них являются содержания CaO , Na_2O и P_2O_5 . На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (диаграмма НКМ – ФМ [Юдович, Кетрис, 2000]) фигуративные точки аргиллитов локализованы в области перекрытия полей I (преимущественно каолинитовые глины), II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и иллита глины) и V (хлорит-смектит-иллитовые глины), а также в поле V (хлорит-смектит-иллитовые глины). Слабая положительная корреляция между модулями ТМ и ЖМ в аргиллитах и выраженная отрицательная корреляция между модулями НКМ

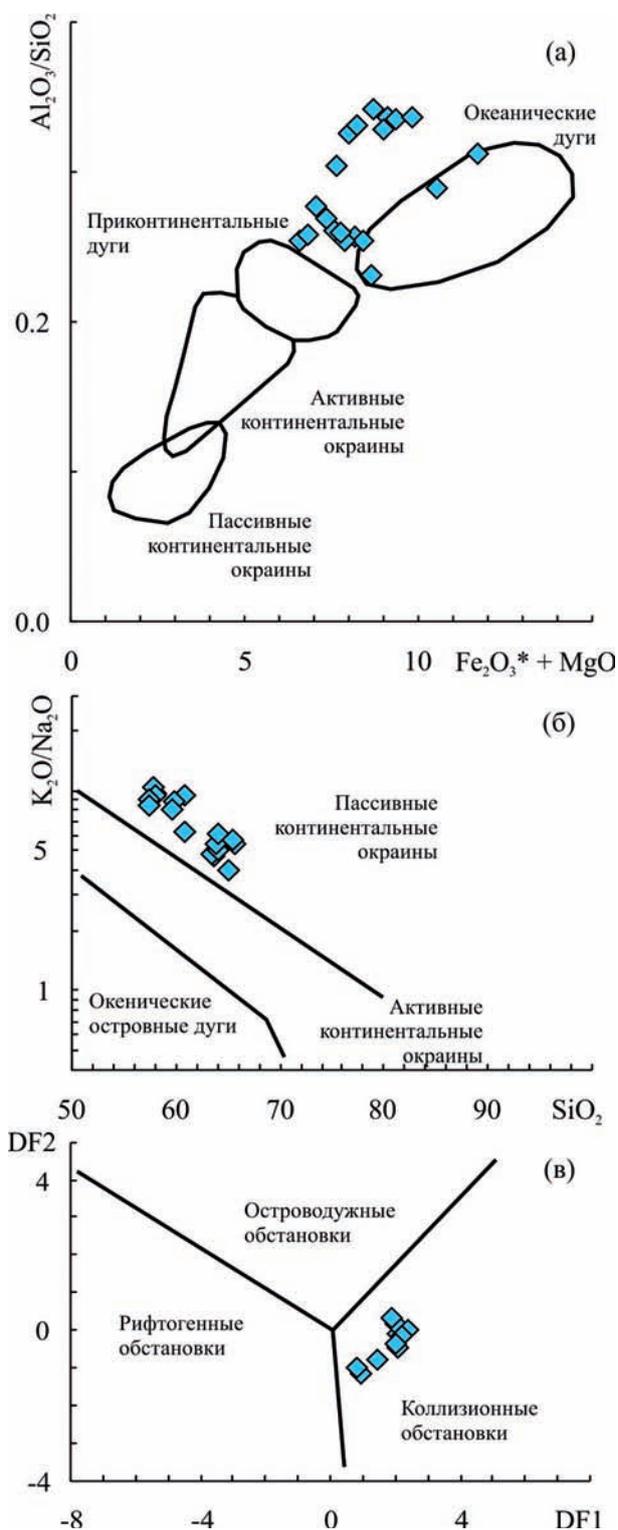


Рис. 9. Положение фигуративных точек глинистых пород суировской свиты на диаграммах $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (а), $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (б) и DF1 – DF2 (в)

Fig. 9. The position of the data points of clayey rocks of the Suirvo Formation on the diagrams $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (a), $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (b) and DF1 – DF2 (v)

и ГМ позволяет считать, что в составе глинистых пород свиты преобладает материал, прошедший только один седиментационный цикл. Соотношение в аргиллитах таких параметров, как K_2O/Na_2O и SiO_2/Al_2O_3 указывает, что аргиллиты суировской свиты не подверглись воздействию К-метасоматоза, а также процессов окремнения.

По величине гидролизатного модуля глинистые породы суировской свиты принадлежат преимущественно нормогидролизатам ($GM_{\text{среднее}} 0.41 \pm 0.06$). Значение ГМ для аргиллитов суировской свиты сопоставимо с величиной ГМ для РААС (0.43); это дает основание предполагать, что аргиллиты рассматриваемого уровня верхнего протерозоя западного склона Южного Урала сформированы за счет умеренно преобразованного процессами химического выветривания на палеоводосборах материала. Средняя величина индекса химического изменения для аргиллитов суировской свиты равна 74 ± 4 . По всей видимости, формирование тонкой алюмосиликокластики на палеоводосборах во время накопления отложений суировской свиты происходило в условиях теплого гумидного климата или же указанные палеоводосборы были сложены породами, в составе которых преобладали продукты такого выветривания. Исходя из приведенного среднего значения CIA, можно также предполагать, что климат суировского времени мог быть в какой-то мере сопоставим с климатом современных обстановок гумидного тропического климата. Однако это противоречит представлениям о принадлежности отложений толпаровской и суировской свит к «диамиктовой последовательности» криогения или раннего венда.

Распределение фигуративных точек аргиллитов суировской свиты на ряде диаграмм, позволяющих судить о составе размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород, не дает возможности сделать определенный вывод.

На дискриминантных палеогеодинамических диаграммах фигуративные точки аргиллитов суировской свиты тяготеют либо к полю составов осадков периферии океанических островных дуг, либо к полю составов, типичных для пассивных континентальных окраин, либо к полю коллизионных обстановок. Из всех трех перечисленных вариантов более обоснованными представляются второй и третий. Но для выбора «наиболее правильного» из них необходимо привлечение дополнительных данных, например, по содержанию и соотношению ряда редких и рассеянных элементов [Маслов и др., 2020].

Автор искренне признателен С.А. Дубу и М.Т. Крупенину (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) за помощь в отборе образцов и их исследовании. Иллюстрации к статье выполнены Н.С. Глушковой (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Список литературы:

Гареев Э.З. Петрохимия и эволюция составов терригенных пород как отражение процессов осадконакопления на примере стратотипа ашинской серии венда на Южном Урале // Палеогеография венда–раннего палеозоя Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. С. 56–63.

Горожанин В.М. К вопросу о нижней границе венда на Южном Урале // Верхний докембрий Южного Урала и востока Русской плиты. Уфа: ИГ БНЦ УрО АН СССР, 1988. С. 41–45.

Горожанин В.М. Рубидий-стронциевый изотопный метод в решении проблем геологии Южного Урала: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 1995. 23 с.

Горожанин В.М., Мичурин С.В., Канипова З.А., Биктимерова З.Р. Литологические особенности диамиктитов на границе рифея и венда в разрезе Толпарово (Южный Урал) // Геологический сборник № 12 / ИГ УНЦ РАН. СПб: Свое издательство, 2015. С. 23–34.

Интерпретация геохимических данных / Отв. ред. Е.В. Складов. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Келлер Б.М., Вейс А.Ф., Горожанин В.М. Толпаровский разрез верхнего докембрия (Южный Урал) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 9. С. 119–124.

Маслов А.В. Некоторые особенности ранневендской седиментации на Южном и Среднем Урале // Литология и полез. ископаемые. 2000. № 6. С. 624–639.

Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 289 с.

Маслов А.В. Возможные «актуальные климатические образы» отложений различных литостратиграфических единиц рифея и венда Урала // Геологический вестник. 2021. № 1. С. 38–45. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-1-4.

Маслов А.В., Гареев Э.З., Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Литохимические особенности песчаников машакской свиты (средний рифей, Южный Урал) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: материалы научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 21. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2018а. С. 153–161.

Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерагения, геологические памятники природы). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. Т. 1. 351 с.

Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А., Титов Ю.В., Червяковская М.В. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. Т. 20, № 1. С. 40–62. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62.

Маслов А.В., Подковыров В.Н. Синрифтовые осадочные ассоциации (несколько литохимических этюдов). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2020. 172 с.

Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Ножкин А.Д. Синрифтовые песчаники и глинистые породы: валовый химический состав и положение на ряде дискриминантных палеогеодинамических диаграмм // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 5. С. 439–465. DOI: 10.31857/S0024-497X20195439-465.

Маслов А.В., Школьник С.И., Летникова Е.Ф., Вишневская И.А., Иванов А.В., Страховенко В.Д., Черкашина Т.Ю. Ограничения и возможности литогеохимических и изотопных методов при изучении осадочных толщ. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2018б. 383 с.

Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология. М.: Наука, 1983. 184 с.

Юдович Я.Э., Кетпис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

Юдович Я.Э., Кетпис М.П. Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. 724 с.

Anderson J.B., Molnia B.F. Glacial-Marine sedimentation. Am. Geophys. Union Short Course Geol. 1989. Vol. 9. 127 p.

Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings // Sed. Geol. 2005. Vol. 177. P. 115–129. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.004.

Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // J. Geol. 1983. Vol. 91. P. 611–627. DOI: 10.1086/628815.

Bolnar R., Kamber B.S., Moorbath S., Whitehouse M.J., Collerson K.D. Chemical characterization of earth's most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2005. Vol. 69. P. 1555–1573. DOI: 10.1016/j.gca.2004.09.023.

Brodzikowski K., Van Loon A.J. Glaciogenic sediments. Amsterdam: Elsevier, 1991. 674 p.

Caracciolo L., von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Critelli S., Manetti P., Marchev P. Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene–Oligocene sandstones of the Western Thrace basin, Greece and Bulgaria // J. Sed. Res. 2012. Vol. 82. P. 482–498. DOI: 10.2110/jsr.2012.31.

Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. Vol. 104, P. 1–37. DOI: 10.1016/0009-2541(93)90140-E.

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. Vol. 59. P. 2919–2940. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00185-9.

González-Álvarez I., Kerrich R. Weathering intensity in the Mesoproterozoic and modern large-river systems: A comparative study in the Belt-Purcell Supergroup, Canada and USA // Precambrian Res. 2012. Vol. 208–211, P. 174–196. DOI: 10.1016/j.precamres.2012.04.008.

Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299. P. 715–717. DOI: 0.1038/299715a0.

Potter P.E., Maynard J.B., Depetris P.J. Mud and Mudstones: Introduction and Overview. Springer, 2005. 308 p.

Powell R.D. Glacimarine processes and inductive lithofacies modelling of ice shelf and tidewater glacier sediments based on Quaternary examples // Mar. Geol. 1984. Vol. 57. P. 1–52. DOI: 10.1016/0025-3227(84)90194-4.

Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // J. Geol. 1986. Vol. 94. P. 635–650. DOI: 10.1086/629071.

Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // Chem. Geol. 1988. Vol. 67. P. 119–139. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.

Ryan K.M., Williams D.M. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins // Chem. Geol. 2007. Vol. 242. P. 103–125. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.013.

Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.

Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // Chem. Geol. 2013. Vol. 355. P. 117–133. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.

Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings // Sed. Geol. 2016. Vol. 332. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.11.011.

Visser J.N.J., Young G.M. Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permo-Carboniferous glaciogenic Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa // Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol. 1990. Vol. 81. P. 49–57. DOI: 10.1016/0031-0182(90)90039-A.

References:

Anderson J.B., Molnia B.F. (1989) Glacial-Marine sedimentation. Am. Geophys. Union Short Course Geol., **9**, 127 p.

Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. (2005) Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sed. Geol.*, **177**, 115–129. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.02.004.

Bhatia M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.*, **91**, 611–627. DOI: 10.1086/628815.

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. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **69**, 1555–1573. DOI: 10.1016/j.gca.2004.09.023.

- Brodzikowski K., Van Loon A.J. (1991) Glaciogenic sediments. Amsterdam, Elsevier, 674 p.
- Caracciolo L., von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Critelli S., Manetti P., Marchev P. (2012) Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene–Oligocene sandstones of the Western Thrace basin, Greece and Bulgaria. *J. Sed. Res.*, **82**, 482–498. DOI: 10.2110/jsr.2012.31.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1–37. DOI: 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 the southwestern United States. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **59**, 2919–2940. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00185-9.
- Gareev E.Z. (1998) Petrochemistry and compositional evolution of terrigenous rocks as a reflection of sedimentation processes by the example of the stratotype of the Ashinskaya Group of the Vendian in the South Urals. *Paleogeografiya vendian-rannego paleozoya Severnoi Evrazii* [Paleogeography of the Vendian – Early Paleozoic of Northern Eurasia]. Ekaterinburg, UrO RAN, 56–63. (In Russian).
- González-Álvarez I., Kerrich R. (2012) Weathering intensity in the Mesoproterozoic and modern large-river systems: A comparative study in the Belt–Purcell Supergroup, Canada and USA. *Precambrian Res.*, **208–211**, 174–196. DOI: 10.1016/j.precamres.2012.04.008.
- Gorozhanin V.M. (1988) On the question of the lower boundary of the Vendian in the Southern Urals. *Verkhniy dokembrii Yuzhnogo Urala i vostoka Russkoi plity* [Upper Precambrian of the Southern Urals and the East of the Russian Plate]. Ufa, IG BNTs UrO AN SSSR, 41–45. (In Russian).
- Gorozhanin V.M. (1995) *Rubidii-strontsiyevi izotopnyi metod v reshenii problem geologii Yuzhnogo Urala*. Avtoref. dis. ... kand. geol.-min. nauk [Rubidium-strontium isotope method in solving problems of geology of the Southern Urals: Extended abstr. ... Cand. of Sci. (Geol. Mineral.) dissertation]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 23 p. (In Russian).
- Gorozhanin V.M., Michurin S.V., Kanipova Z.A., Biktimerova Z.R. (2015) Lithological features of diamictites from Riphean and Vendian boundary deposits (Tolparovo section, South Urals). *Geologicheskii sbornik № 12 IG UNTs RAN* [Geological collection No. 12 IG UNTs RAN]. St. Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 23–34. (In Russian).
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Interpretation of geochemical data] (2001) (Ed. E.V. Sklyarov). Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russian).
- Keller B.M., Veis A.F., Gorozhanin V.M. (1984) Tolparovo section of the Upper Precambrian (South Urals). *Izv. AN SSSR. Ser. geol.*, (9), 119–124. (In Russian).
- Maslov A.V. (2000) Some Specific Features of Early Vendian Sedimentation in the Southern and Middle Urals. *Lithology and Mineral Resources*, (6), 556–570.
- Maslov A.V. (2005) *Osadochnye porody: metody izucheniya i interpretatsii poluchennykh dannykh* [Sedimentary rocks: methods of studying and interpreting the obtained data]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 289 p. (In Russian).
- Maslov A.V. (2021) Possible “current climate images” of deposits of various lithostratigraphic units of the Ural’s Riphean and Vendian. *Geologicheskii vestnik – Geological Bulletin*, (1), 38–45. DOI: 10.31084/2619-0087/2021-1-4. (In Russian).
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Kotova L.N., Podkovyrov V.N. (2018a) Lithochemical features of sandstones of the Mashak Formation (Middle Riphean, South Urals). *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii: materialy nauchnykh chtenii pamyati P.N. Chirvinskogo*. Vyp. 21 [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny: materials of scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky, Is. 21] Perm’: PGNIU Publ., 153–161. (In Russian).
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z., Anonimov L.V. (2001) *Rifei zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala (klassicheskie razrezy, sedimento- i litogenez, minerageniya, geologicheskie pamyatniki prirody)* [Riphean of the western slope of the Southern Urals (classical sections, sedimentary and lithogenesis, minerageny, geological natural monuments)]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 1, 351 p. (In Russian).
- Maslov A.V., Mel’nichuk O.Yu., Mizens G.A., Titov Yu.V., Chervyakovskaya M.V. (2020) Provenance reconstructions. Article 2. Litho- and isotope-geochemical approaches and methods. *Litosfera*, **20** (1), 40–62. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-1-40-62. (In Russian).
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N. (2020) *Sinriftovye osadochnye assotsiatsii (neskol’ko litokhimicheskikh etjudov)* [Synrift sedimentary associations (several lithochemical studies)]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 172 p. (In Russian).
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Nozhkin A.D. (2019) Synrift Sandstones and Mudstones: Bulk Chemical Composition and Position in Some Discriminant Paleogeodynamic Diagrams. *Lithology and Mineral Resources*, (5), 390–411. DOI: 10.1134/s0024490219050055.
- Maslov A.V., Shkol’nik S.I., Letnikova E.F., Vishnevskaya I.A., Ivanov A.V., Strakhovenko V.D., Cherkashina T.Yu. (2018b) *Ogranicheniya i vozmozhnosti litogeokhimicheskikh i izotopnykh metodov pri izuchenii osadochnykh tolshch* [Limitations and possibilities of litho-geochemical and isotopic methods in the study of sedimentary strata]. Novosibirsk: IGM SO RAN Publ., 383 p. (In Russian).
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lites. *Nature*, **299**, 715–717. DOI: 10.1038/299715a0.
- Potter P.E., Maynard J.B., Depetris P.J. (2005) *Mud and Mudstones: Introduction and Overview*. Springer, 308 p.
- Powell R.D. (1984) Glacimarine processes and inductive lithofacies modelling of ice shelf and tidewater glacier sediments based on Quaternary examples. *Mar. Geol.*, **57**, 1–52. DOI: 10.1016/0025-3227(84)90194-4.
- Roser B.P., Korsch R.J. (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, **94**, 635–650. DOI: 10.1086/629071.
- Roser B.P., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**, 119–139. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.

Ryan K.M., Williams D.M. (2007) Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chemical Geology*, **242**, 103-125. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.013.

Stratotip rifeya. Stratigrafiya. Geokhronologiya [Riphean stratotype. Stratigraphy. Geochronology] (1983). Moscow, Nauka Publ., 184 p. (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, 312 p.

Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. (2013) New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chemical Geology*, **355**, 117-133. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.

Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. (2016) Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sed. Geol.*, **332**, 1-12. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2015.11.011.

Visser J.N.J., Young G.M. (1990) Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permo-Carboniferous glaciogenic Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **81**, 49-57. DOI: 10.1016/0031-0182(90)90039-A.

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russian).

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2015) *Geokhimicheskie i mineralogicheskie indikatory vulkanogennykh produktov v osadochnykh tolshchakh* [Geochemical and mineralogical indicators of volcanogenic products in sedimentary strata]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 724 p. (In Russian).

Сведения об авторе:

Маслов Андрей Викторович, доктор геол.-минерал. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Россия, г. Уфа. E-mail: amas2004@mail.ru

About the author:

Maslov Andrey Victorovich, Dr. Sci (Geol., Mineral.), Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Russia, Ufa. E-mail: amas2004@mail.ru