

## ФРАНСКИЕ ГРАУВАККИ ХУДОЛАЗОВСКОЙ МУЛЬДЫ. СООБЩЕНИЕ 3. КРАТКАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

А. М. Фазлиахметов

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

Приводится геохимическая характеристика франских граувакк западного крыла Худолозовской мульды (Западно-Магнитогорская зона Южного Урала) на основе более 100 проб, в которых было установлено содержание главных и малых элементов.

Анализ геохимических данных позволил установить характерные особенности состава граувакк каждого из изученных стратиграфических подразделений (верхняя часть улутауской свиты, мукасовская свита, ялангасская, идяш-кускаровская и худолозовская линзы нижней подсвиты биягодинской свиты) и увязать их с петрографическим составом. Показано, что отличия песчаников разных интервалов разреза наиболее наглядно проявляются на диаграммах Ni–Cr, Cr/V–Y/Ni, Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Zr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Y/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

По соотношению главных элементов изученные породы соответствуют вулканокластическим грауваккам кислого (ялангасская линза) и среднего (верхняя часть улутауской свиты, идяш-кускаровская и худолозовская линзы биягодинской свиты) состава. Степень выветривания в источнике сноса была низкой, разрушению подвергались комплексы океанических островных дуг.

Песчаники мукасовской свиты отличаются от прочих, предположительно из-за относительно более длительного нахождения обломочного материала в путях миграции.

*Ключевые слова:* геохимия, улутауская свита, мукасовская свита, биягодинская свита франский ярус, граувакки, Южный Урал

## FRASNIAN GREYWACKES OF THE KHUDOLAZ SYNCLINE MESSAGE 3. BRIEF DESCRIPTION OF GEOCHEMISTRY

A. Fazliakhmetov

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

The geochemical characteristics of the Frasnian greywackes of the western limb of the Khudolaz syncline (West-Magnitogorsk zone of the Southern Urals) are given on the basis of more than 100 samples, in which the content of major and minor elements was established.

The analysis of geochemical data made it possible to establish the characteristic features of the greywacke composition of each of the studied stratigraphic units (the upper part of the Ulutau Formation, the Mukasevo Formation, the Yalangas, Idyash-Kuskarovo and Khudolaz lenses of the lower part of the Biyagoda Formation) and relate them to the petrographic composition. It is shown that the differences between sandstones of different intervals of the section are most clearly manifested in the diagrams Ni–Cr, Cr/V–Y/Ni, Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Zr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Y/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

In terms of the ratio of the main elements, the studied rocks correspond to volcanoclastic greywackes of acidic (Yalangas lens) and middle (upper part of the Ulutau Formation, Idyash-Kuskarovo and Khudolaz lenses of the Biyagoda Formation) composition. The degree of weathering at the source of drift was low, and complexes of oceanic island arcs were destroyed.

---

*Для цитирования:* Фазлиахметов А.М. Франские граувакки Худолозовской мульды. Сообщение 3. Краткая геохимическая характеристика // Геологический вестник. 2021. № 2. С. 83–105. DOI: 0.31084/2619-0087/2021-2-7.

**For citation:** Fazliakhmetov A.M. (2021) Frasnian greywackes of the Khudolaz Syncline. Message 3. Brief description of geochemistry. *Geologicheskii vestnik*. No. 2. P. 83–105. DOI: 0.31084/2619-0087/2021-2-7.

---

© А.М. Фазлиахметов, 2021.

Sandstones of the Mukasevo Formation differ from the others, presumably due to the relatively longer presence of clastic material in the migration routes.

*Keywords:* geochemistry, the Ulutau Formation, the Mukasevo Formation, the Biyagoda Formation, the Frasnian, greywacke, the South Urals

## Введение

Данная статья продолжает серию, посвященную франским грауваккам Худолазовской мульды. Ранее были опубликованы Сообщение 1 — «Франские граувакки Худолазовской мульды. Краткая характеристика отложений» [Фазлиахметов, 2020а] и Сообщение 2 — «Франские граувакки Худолазовской мульды. Краткая петрографическая характеристика» [Фазлиахметов, 2020б].

Франские отложения на западном крыле Худолазовской мульды слагают непрерывную последовательность мощностью около 2500 м. В ней выделено пять обломочных комплексов: верхней части улутауской свиты, мукасовской свиты, ялангаской, идяш-кускарской и худолазовской линз нижней подсвиты биягодинской свиты [Фазлиахметов, 2020а, б]. Каждый из перечисленных комплексов отличается составом петрофонда, имеет определенную стратиграфическую и территориальную приуроченность.

Петрографическое описание граувакк улутауской и биягодинской свит позволило установить состав пород источников сноса, выявить тефрогенные, вулканотерригенные и терригенные разности, раскрыть некоторые особенности их литогенеза [Фазлиахметов и др., 2016; Фазлиахметов, 2019б, в, 2020б]. Изучение кластолитов мукасовской свиты, основанное на шести образцах, носило лишь предварительный характер, но дало основание считать эти породы исключительными на фоне не только франского, но и в целом девонского разреза Западно-Магнитогорской зоны.

В настоящее время широким применением пользуются весьма разнообразные методы интерпретации геохимического состава обломочных пород. Их применению с целью изучить франские граувакки Худолазовской мульды и, соответственно, уточнить результаты предшествующих работ, посвящено данное сообщение.

## Методика исследований

Содержание оксидов породообразующих элементов в граувакках улутауской и биягодинской свит было установлено посредством пламенной

фотометрии ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) и титриметрического метода (аналитик С.А. Ягудина, ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Содержание Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Y и Zr установлено методом ИСП-АЭС на спектрометре Shimadzu ICPE-9000 с кислотным разложением в открытой системе по методике [Мусина, Мичурин, 2016] (аналитик А.М. Карамова, ИГ УНЦ РАН, г. Уфа). Общее количество проб — 102.

Положение точек опробования показано на рис. 1 и детальнее в публикациях [Фазлиахметов, 2020а, 2021].

Геохимический состав обломочных пород мукасовской свиты был установлен рентгено-флуоресцентным методом на спектрометре VRA-30 (аналитики В.Ф. Юлдашбаева и С.В. Мичурин, ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа). Содержание  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  было определено методом пламенной фотометрии (аналитик С.А. Ягудина, ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа).

В сообщении использованы данные о содержании редкоземельных и прочих малых элементов в тефроидах ирендыкской свиты, средней и нижней частей улутауской свиты, граувакках идяш-кускарской и худолазовской линз, установленном при помощи метода ИСП-МС. Определение было выполнено с разложением проб в закрытой системе на масс-спектрометре X-7 в ИПТМ РАН (г. Черноголовка) и на масс-спектрометре ELAN-DRC-6100 во ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

Важно отметить, что образцы, изученные методом ИСП-МС, были отобраны задолго до целенаправленного исследования франских граувакк Худолазовской мульды. Задачей тех работ было изучение вариаций геохимического состава граувакк в зависимости от их гранулометрического состава [Фазлиахметов, 2014]. Поэтому образцы отбирались в количестве 2–3 шт. из разных частей (нижней, средней и верхней) отдельно взятых турбидитов. Соответственно 6 образцов из отложений идяш-кускарской линзы характеризуют только 2 слоя из разреза у д. Идяш-Кускарово, а 21 образец граувакк худолазовской линзы — 8 слоев. Из них 4 слоя опробованы в разрезе у д. Идяш-Кускарово, 4 — на южном и восточном берегах оз. Ялангаскуль.

Образцы из отложений ирендыкской свиты отобраны на широте г. Магнитогорск по трассе д. Тирман — с. Аскарково. Детальная привязка приведена

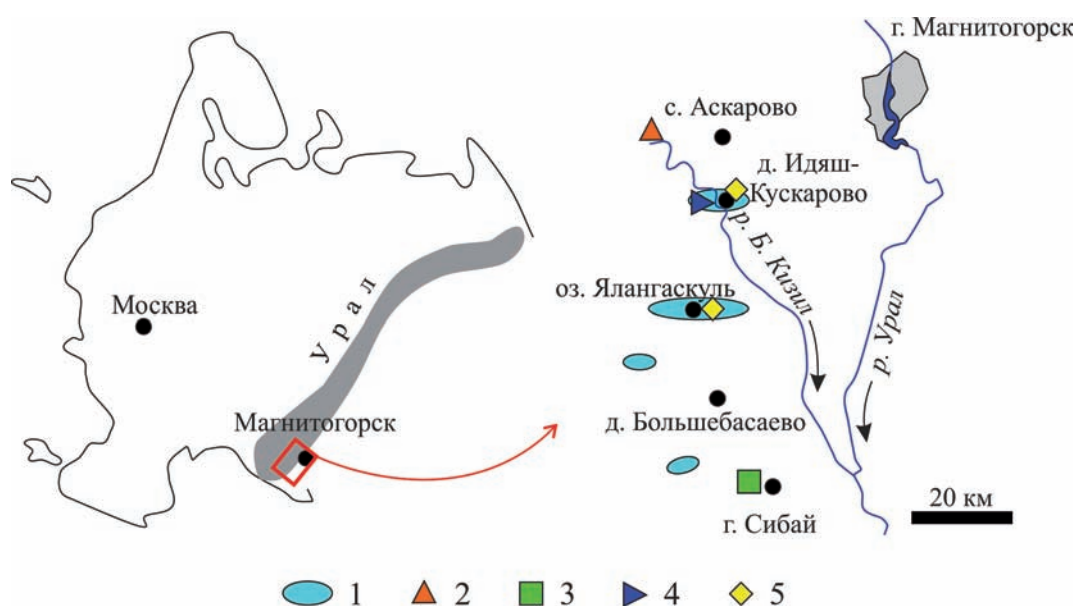


Рис. 1. Расположение района работ и опробованных разрезов

Условные обозначения: 1 — разрезы, опробованные на определение содержаний главных элементов; 2–5 — разрезы, образцы из которых изучены методом ИСП-МС: 2 — ирендыкская свита, 3 — улутауская свита, 4 — идяш-кускаровская линза, 5 — худолазовская линза.

Fig. 1. Location of the work area and tested sections

Legend: 1 — sections tested to determine the contents of the main elements; 2–5 — sections, samples from which were studied by the ICP-MS method: 2 — the Irendyk Formation, 3 — the Ulutau Formation, 4 — Idyash-Kuskarovo lens, 5 — Khudolaz lens.

в [Фазлиахметов, Зайнуллин, 2015]. Изучено всего 16 образцов из 7 слоев.

Песчаники улутауской свиты были опробованы в стратотипической местности, к западу от города Сибай, на северо-востоке Карамалыташской брахиантиклинали. Нижняя подсвита улутауской свиты здесь сложена кислыми вулканокластическими граувакками. Они охарактеризованы 15 образцами из 5 слоев. Средняя подсвита улутауской свиты слагается вулканокластическими граувакками средне-основного состава. Они представлены 17 пробами из 6 слоев.

### Характеристика содержаний оксидов породообразующих элементов и классификационных диаграмм<sup>1</sup>

Медианные, минимальные и максимальные содержания оксидов породообразующих элементов приведены в табл. 1. Из нее видно, что по относительно повышенным содержаниям кремнезема заметно выделяются кластоциты мукасовской свиты и ялангасской линзы. Соответственно другие

оксиды, в частности,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $CaO$ , находятся в них в заметно пониженных концентрациях.

Кластоциты улутауской свиты характеризуются наиболее высокими содержаниями  $Al_2O_3$  и  $CaO$ , отражающими повышенное в них содержание плагиоклазов. Песчаники худолазовской линзы имеют максимальные величины концентрации  $MgO$  и  $TiO_2$ , вероятно, увязанные с присутствием зерен хлоритолитов, серпентинитов и вулканитов основного состава. Отложения идяш-кускаровской линзы не имеют каких-либо отличительных особенностей — содержания породообразующих элементов в них имеют по отношению к перечисленным разностям промежуточные значения.

На классификационной диаграмме Ф. Петтиджона  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Na_2O/K_2O)$  [Петтиджон и др., 1976] фигуративные точки состава всех исследуемых песчаников попали в поле граувакк (рис. 2). На диаграмме М. Херрона  $\log(SiO_2/Al_2O_3) - \log(Fe_2O_3/K_2O)$  [Herron, 1988] в поле железистых песчаников оказалась большая часть кластера точек ялангасской линзы. Состав остальных проб, согласно данной диаграмме, отвечает железистым сланцам. На диаграмме  $\lg[(Fe_2O_3+MgO)/(Na_2O+K_2O)] - \lg(SiO_2/Al_2O_3)$ , предложенной О.Ю. Мельничуком

<sup>1</sup> Кластоциты мукасовской свиты рассмотрены отдельно ниже.

Таблица 1. Средние, максимальные и минимальные содержания главных элементов и значение некоторых геохимических показателей во франских граувакках Худолазовской мульды

Table 1. Average, maximum and minimum contents of the main elements and the significance of some geochemical indicators in the Frasnian graywackes of the Khudolaz syncline

Компоненты	верхняя часть улутауской свиты, n=25	мукасовская свита, n=6	ялангасская линза, n=10	идяш-кускардовская линза, n=9	худолазовская линза, n=52
SiO <sub>2</sub>	$\frac{60 \pm 2.6}{54-64}$	$\frac{74.9 \pm 5}{71.1-85.5}$	$\frac{72 \pm 0.6}{71-73}$	$\frac{56 \pm 1.2}{52.4-56.5}$	$\frac{57 \pm 2.9}{52-62.5}$
TiO <sub>2</sub>	$\frac{0.5 \pm 0.1}{0.4-0.8}$	$\frac{0.33 \pm 0.09}{0.17-0.41}$	$\frac{0.2 \pm 0}{0.1-0.3}$	$\frac{0.7 \pm 0.2}{0.5-1.2}$	$\frac{0.8 \pm 0.1}{0.6-1}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{18.5 \pm 1.2}{16-20}$	$\frac{7.9 \pm 3.2}{5.3-14.3}$	$\frac{13 \pm 0.7}{12-14}$	$\frac{17 \pm 0.7}{16.5-19}$	$\frac{15 \pm 0.9}{13-16.2}$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	$\frac{5.9 \pm 2.1}{3.5-10.8}$	$\frac{4.3 \pm 1.9}{0.5-6}$	$\frac{6.1 \pm 0.8}{5.2-7.6}$	$\frac{9 \pm 1.2}{6.2-10.5}$	$\frac{7.6 \pm 0.5}{6.5-8.6}$
MnO	$\frac{0.1 \pm 0}{0.1-0.2}$	$\frac{0.48 \pm 0.94}{0.06-2.58}$	$\frac{0.1 \pm 0}{0.1-0.3}$	$\frac{0.3 \pm 0.2}{0.1-0.6}$	$\frac{0.1 \pm 0.1}{0.1-0.3}$
MgO	$\frac{2.4 \pm 0.8}{1.4-4}$	$\frac{0.6 \pm 0.9}{0.2-2.2}$	$\frac{1.8 \pm 0.5}{0.8-2.2}$	$\frac{3.8 \pm 0.8}{3-5.4}$	$\frac{6 \pm 1.1}{3-8.2}$
CaO	$\frac{5.5 \pm 2}{1.7-8.5}$	$\frac{0.6 \pm 0.5}{0.2-1.6}$	$\frac{1.4 \pm 0.4}{1-2}$	$\frac{3.4 \pm 1.1}{1.7-4.5}$	$\frac{5.1 \pm 1.6}{2-8.5}$
Na <sub>2</sub> O	$\frac{4.1 \pm 0.7}{3.7-6.1}$	$\frac{0.5 \pm 1.8}{0.4-4.6}$	$\frac{2.3 \pm 0.4}{1.7-2.7}$	$\frac{4.7 \pm 0.8}{3.2-5.4}$	$\frac{2.7 \pm 0.6}{1.4-4}$
K <sub>2</sub> O	$\frac{0.5 \pm 0.4}{0.1-1.3}$	$\frac{0.7 \pm 0.3}{0.3-1.1}$	$\frac{0.6 \pm 0.2}{0.5-1.1}$	$\frac{1.2 \pm 0.7}{0.5-2.5}$	$\frac{1 \pm 0.3}{0.4-1.9}$
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	$\frac{0.2 \pm 0}{0.1-0.2}$	$\frac{0.12 \pm 0.06}{0.12-0.28}$	$\frac{0.1 \pm 0}{0.1-0.2}$	$\frac{0.1 \pm 0}{0.1-0.1}$	$\frac{0.1 \pm 0}{0.1-0.3}$
ГМ	$\frac{0.42 \pm 0.04}{0.38-0.53}$	$\frac{0.19 \pm 0.07}{0.09-0.27}$	$\frac{0.27 \pm 0.02}{0.26-0.3}$	$\frac{0.49 \pm 0.03}{0.43-0.56}$	$\frac{0.41 \pm 0.04}{0.34-0.49}$
ТМ	$\frac{0.03 \pm 0.01}{0.02-0.05}$	$\frac{0.03 \pm 0.01}{0.03-0.05}$	$\frac{0.02 \pm 0}{0.01-0.02}$	$\frac{0.04 \pm 0.01}{0.03-0.07}$	$\frac{0.05 \pm 0.01}{0.04-0.07}$
АМ	$\frac{0.31 \pm 0.02}{0.28-0.34}$	$\frac{0.11 \pm 0.05}{0.07-0.2}$	$\frac{0.18 \pm 0.01}{0.17-0.19}$	$\frac{0.3 \pm 0.02}{0.29-0.36}$	$\frac{0.26 \pm 0.03}{0.22-0.31}$
ЖМ	$\frac{0.32 \pm 0.13}{0.17-0.62}$	$\frac{0.6 \pm 0.32}{0.07-0.93}$	$\frac{0.47 \pm 0.07}{0.42-0.63}$	$\frac{0.52 \pm 0.07}{0.37-0.61}$	$\frac{0.5 \pm 0.04}{0.42-0.63}$
НКМ	$\frac{0.28 \pm 0.03}{0.22-0.34}$	$\frac{0.18 \pm 0.13}{0.11-0.41}$	$\frac{0.22 \pm 0.03}{0.19-0.3}$	$\frac{0.34 \pm 0.03}{0.26-0.36}$	$\frac{0.26 \pm 0.04}{0.18-0.35}$
ОЦ	$\frac{5 \pm 0.71}{3.95-6.6}$	$\frac{1.53 \pm 1.85}{0.72-5.34}$	$\frac{2.9 \pm 0.31}{2.68-3.61}$	$\frac{5.9 \pm 0.54}{4.42-6.09}$	$\frac{3.91 \pm 0.6}{2.55-5.07}$
ЦМ	$\frac{8 \pm 11.07}{2.96-57.5}$	$\frac{1.48 \pm 2.42}{0.52-6.46}$	$\frac{3.72 \pm 1.37}{1.6-5.4}$	$\frac{3.84 \pm 4.09}{1.44-10.8}$	$\frac{3 \pm 1.76}{1.13-7.88}$
ФМ	$\frac{0.14 \pm 0.05}{0.1-0.26}$	$\frac{0.07 \pm 0.04}{0.02-0.15}$	$\frac{0.11 \pm 0.01}{0.1-0.13}$	$\frac{0.23 \pm 0.03}{0.17-0.29}$	$\frac{0.24 \pm 0.03}{0.17-0.31}$
CIA	$\frac{50.5 \pm 5.3}{42.2-64.4}$	$\frac{68.8 \pm 10.2}{55.9-79.6}$	$\frac{64.5 \pm 4.5}{56.9-71.1}$	$\frac{54.2 \pm 3.3}{49.6-59.2}$	$\frac{50.2 \pm 4.7}{41.9-61.4}$
CIW	$\frac{51.7 \pm 5.8}{42.5-66.8}$	$\frac{71.4 \pm 12.8}{57.6-87.5}$	$\frac{66.5 \pm 5}{59.7-75.2}$	$\frac{56.6 \pm 5.1}{50.4-65.4}$	$\frac{52.5 \pm 5}{42.6-64.9}$

Примечание: в числителе — среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе — минимальное и максимальное значение. Прочерк — нет данных. n — число образцов в выборке. Величина CIA была рассчитана по [Nesbitt, Young, 1982], CIW — по [Harnois, 1988], остальных геохимических параметров — по [Юдович, Кетрис, 2000].

Note: the numerator contains the arithmetic mean and standard deviation, the denominator contains the minimum and maximum values. Dash — no data. n — is the number of samples in the sample. The CIA value was calculated according to [Nesbitt, Young, 1982], CIW according to [Harnois, 1988], and other geochemical parameters according to [Yudovich and Ketris, 2000].



[2018], подавляющее количество точек расположилось в поле граувакк и полевошпатовых граувакк.

На треугольной диаграмме А.Г. Коссовской и М.И. Тучковой  $SiO_2-(Fe_2O_3+FeO+MgO+MnO+TiO_2)-$

$(Al_2O_3+CaO+K_2O+Na_2O)$  [Коссовская, Тучкова, 1988] точки, отвечающие составу песчаников верхней части улутауской свиты, идаш-кускаровской и худолазовской линз, расположились в поле вулкано-

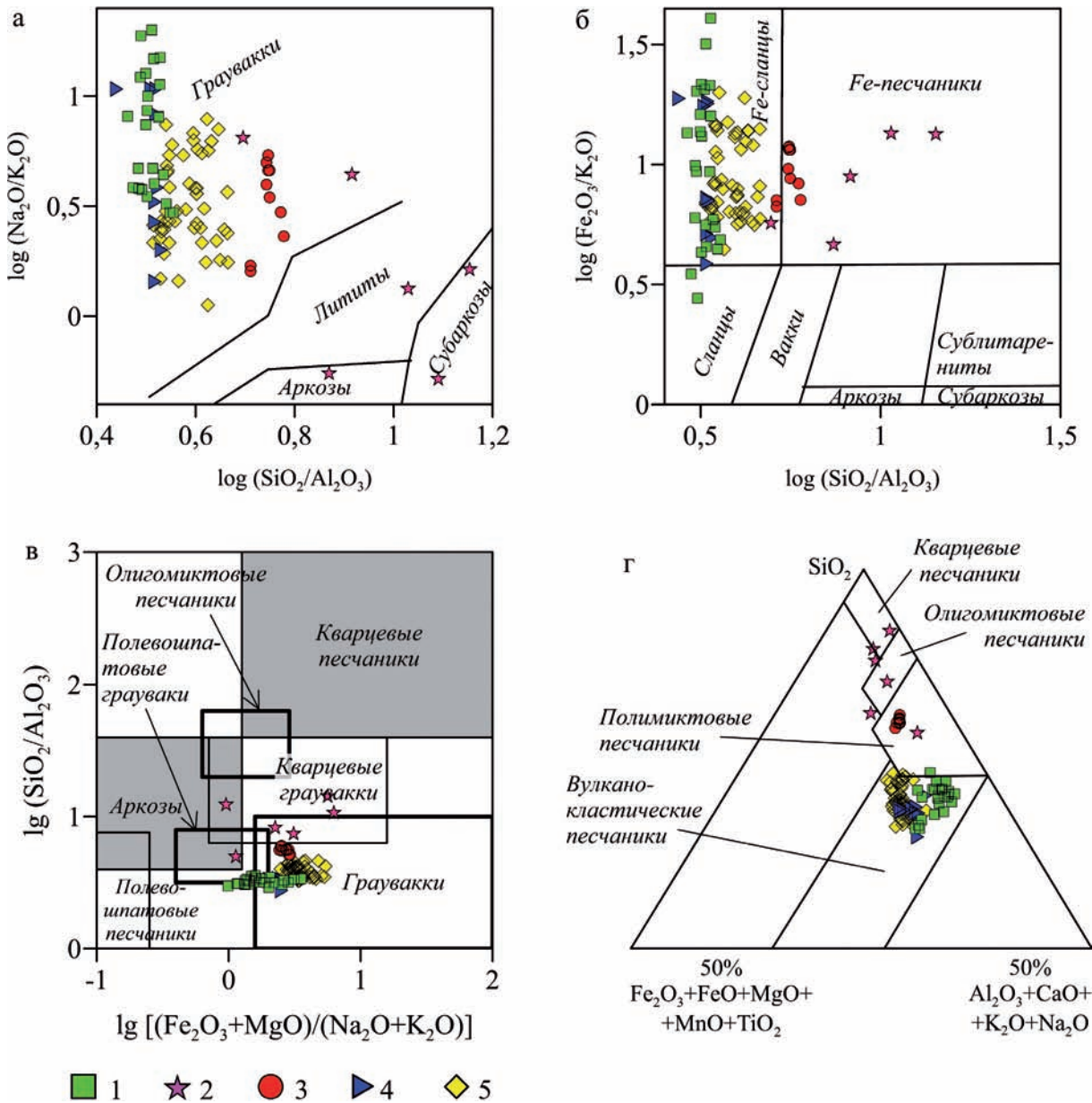


Рис. 2. Классификационные диаграммы для франских граувакк Худолазовской мульды: а — Ф. Петтиджона [Петтиджон и др., 1976]; б — М. Херрона [1988]; в — О.Ю. Мельничука [2018]; г — А.Г. Коссовской и М.И. Тучковой [1988]

Условные обозначения: 1 — верхняя часть улутауской свиты, 2 — мукасовская свита, 3 — ялангасская линза, 4 — идаш-кускаровская линза, 5 — худолазовская линза.

Fig. 2. Classification diagrams for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline: а — by F. Pettidzhon [Pettidzhon et al., 1976]; б — by M. Herron [1988]; в — by O.Yu. Melnichuk [2018]; г — by A.G. Kossovskaya and M.I. Tuchkova [1988]

Legend: 1 — the upper part of the Ulutau Formation, 2 — the Mukasevo formation, 3 — Yalangas lens, 4 — Idyash-Kuskarovo lens, 5 — Khudolaz lens.

кластических песчаников (см. рис. 2). Точки, соответствующие составу песчаников ялангасской линзы, несмотря на то, что они также состоят преимущественно из обломков вулканических пород, оказались в поле полимиктовых песчаников.

### Характеристика и анализ литохимических модулей

Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [2000] разработана литохимическая классификация осадочных пород, основанная на содержаниях порообразующих элементов и величинах литохимических модулей<sup>1</sup>, а также методика их анализа и интерпретации. Применение модульных диаграмм, анализ величин и корреляционных связей между модулями позволяют относить исследуемые породы к той или иной группе, выделяемой по генезису или вещественному составу. В частности, магматическим породам, а следовательно, и в некоторой мере вулканотерригенным и тефрогенным разностям свойственны положительные корреляции ТМ–ЖМ, ТМ–ФМ, ЖМ–ФМ, отражающие связь Ti, Fe и Mg в темноцветных минералах. Породам этих же групп характерны негативная корреляция ФМ–НКМ, вероятное отсутствие положительной корреляции ГМ–АМ и, при высоком содержании полевых шпатов — щелочность ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) более 8%. Основные магматические породы отличаются величинами ЖМ более 0.75, ФМ — более 0.2–0.25, ТМ — более 0.1. Кислые вулканические образования характеризуются пониженной титанистостью — ТМ менее 0.03.

Главными классификационными параметрами для обломочных пород являются величины ГМ, ЖМ и MgO. По ним (см. табл. 1, рис. 3), согласно классификации [Юдович, Кетрис, 2000], граувакки верхней части улутауской свиты относятся к нормо-, суперсиаллитам и псевдосиаллитам, граувакки ялангасской линзы — к миоциаллитам, граувакки идыш-кускараровской линзы — к нормо- и суперпсевдосиаллитам, граувакки худолазовской линзы — к нормопсевдосиаллитам.

Все изученные граувакки по отношению к сиаллитному стандарту, т.е. к составу гранитно-метаморфического слоя Земли [Юдович, Кетрис, 2000], имеют нормальную глиноземистость, щелоч-

<sup>1</sup> Гидролизатный модуль  $\text{ГМ} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / \text{SiO}_2$ ,  
алюминиевый модуль  $\text{АМ} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ ,  
титановый модуль  $\text{ТМ} = \text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  
фемический модуль  $\text{ФМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$ ,  
железный модуль  $\text{ЖМ} = (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ ,  
модуль нормированной щелочности  $\text{НКМ} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  
щелочной модуль  $\text{ЩМ} = \text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$  [Юдович, Кетрис, 2000].

ность, являются гипер- или супернатровыми, обладают нормальной или повышенной фемичностью (см. табл. 1, рис. 3–5). Нормально титанистыми являются граувакки идыш-кускараровской и худолазовской линз. Большинство проб из улутауской свиты и граувакки ялангасской линзы гипотитанистые.

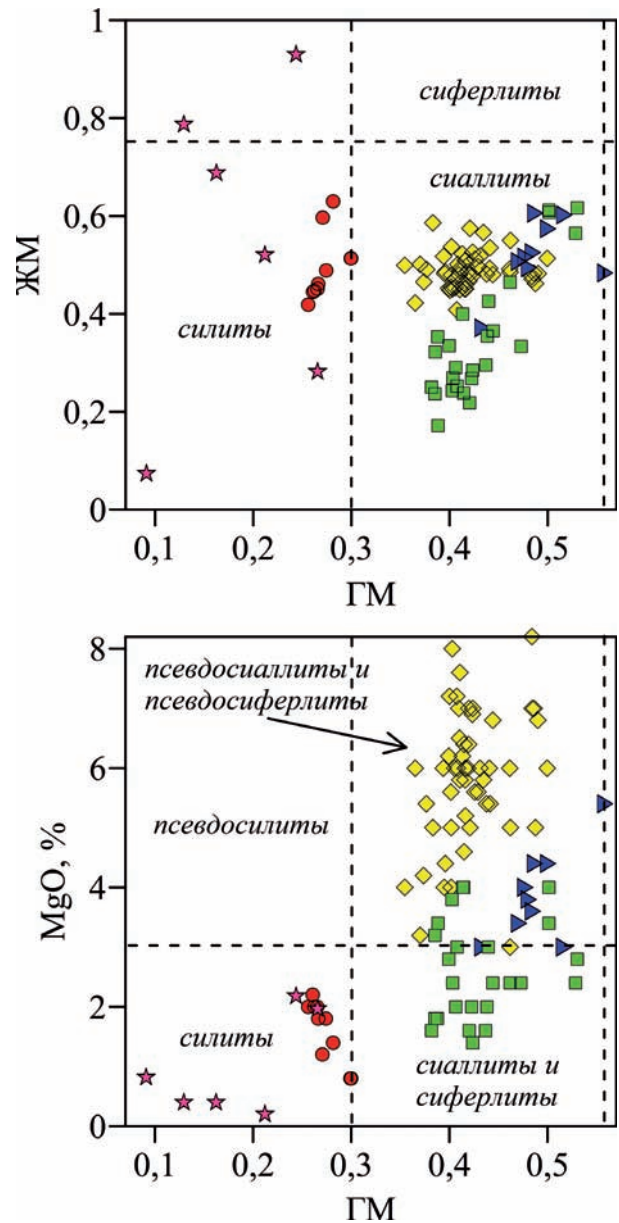


Рис. 3. Диаграммы ГМ–ЖМ и ГМ–MgO для франских граувакк Худолазовской мульды

Условные обозначения см. рис. 2. Вынесены границы основных классификационных полей, согласно [Юдович, Кетрис, 2000].

Fig. 3. ГМ–ЖМ and ГМ–MgO diagrams for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline

Legend see fig. 2. The boundaries of the main classification fields are drawn, according to [Yudovich, Ketris, 2000].

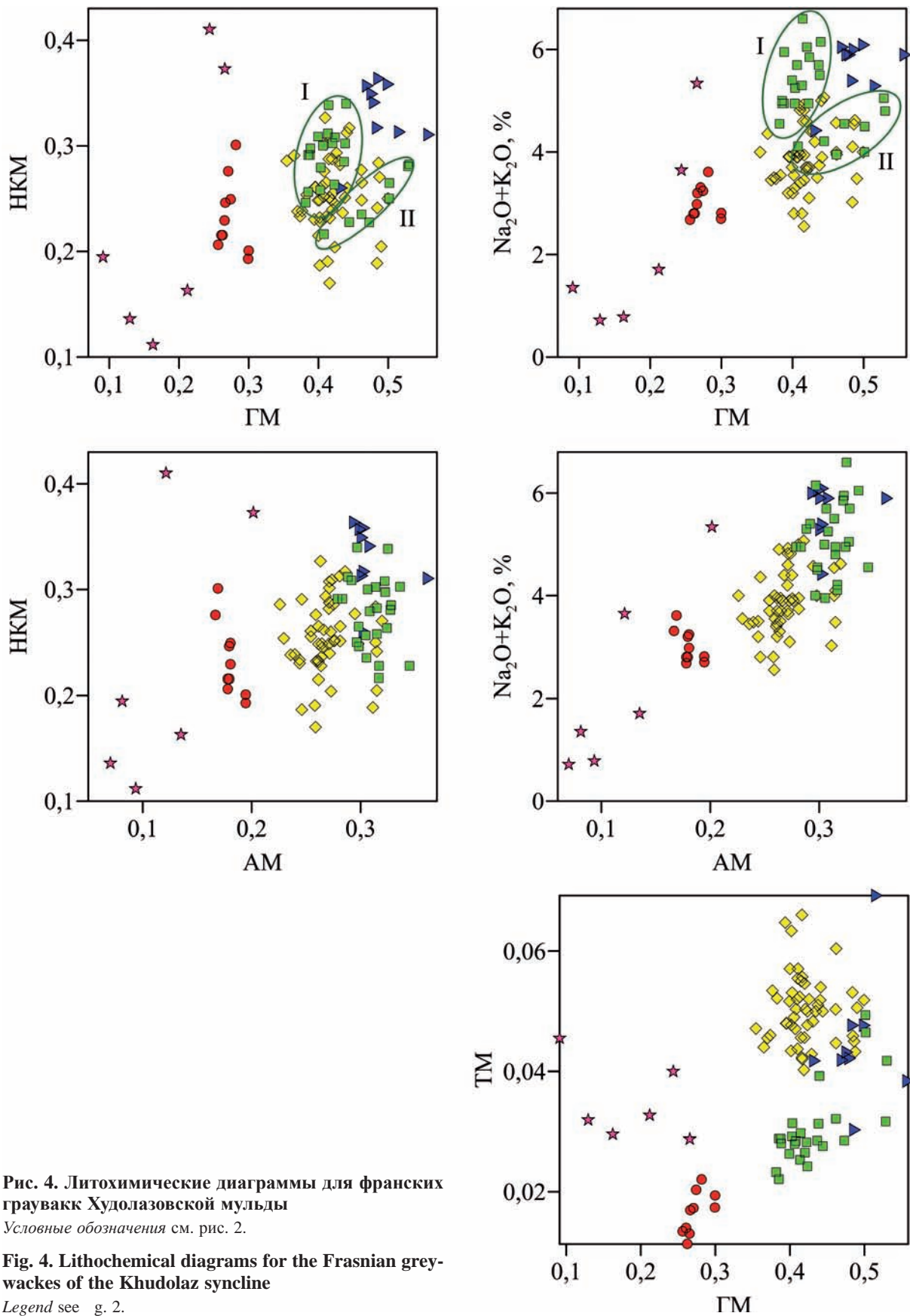


Рис. 4. Литохимические диаграммы для франских граувакк Худолазовской мулды  
Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 4. Lithochemical diagrams for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline  
Legend see g. 2.

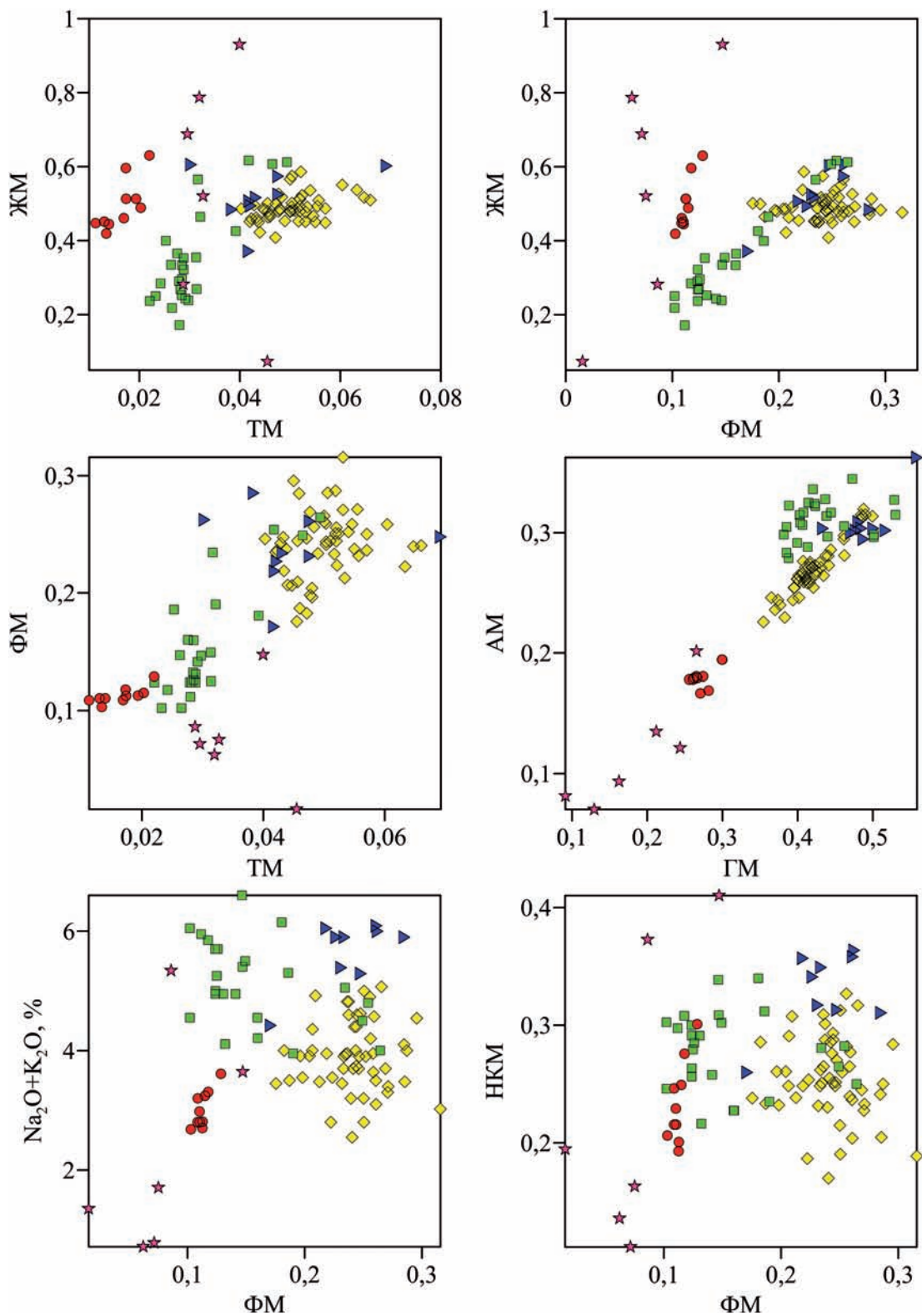


Рис. 5. Литохимические диаграммы для франских граувакк Худолазовской мульды  
Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 5. Lithochemical diagrams for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline  
Legend see g. 2.



Анализ модульных диаграмм ГМ–НКМ и ГМ–(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) (см. рис. 4) показал, что граувакки верхней части улутауской свиты не однородны по своему составу. Соответствующие им точки образуют на указанных диаграммах два изолированных кластера. При этом аналогичного деления не наблюдается на диаграммах АМ–НКМ и АМ–(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O). Первый кластер, обозначенный на рис. 4 цифрой «I», наиболее представительный, отличается сравнительно более высокими значениями НКМ и пониженными ГМ. Величины ТМ (0.022–0.032) и НКМ (0.24–0.34), содержание MgO в некоторых образцах более 3%, наличие положительной корреляции ТМ, ЖМ и ФМ соответствуют петрографическому составу песчаников — преобладают зерна кислых вулканитов и плагиоклазы, подчиненное значение имеют вулканиты средне-основного состава. Второй кластер («II» на рис. 4) занял позицию с более высокими значениями ГМ и сравнительно более низкими НКМ. На диаграммах ЖМ–НКМ и ТМ–НКМ он распадается на два кластера — Па и Пб (см. рис. 6).

Граувакки, соответствующие кластеру Па, имеют повышенную относительно других кластеров титанистость (ТМ 0.032–0.049), железистость (ЖМ 0.32–0.61) и фемичность (ФМ 0.23–0.26), в них повышено содержание CaO (5.4–8.5) и понижено содержание SiO<sub>2</sub> (54–57%). Данные отличия, по всей видимости, обусловлены примесью вулканитов основного состава. Группа Пб имеет величину ЖМ, равную таковой в граувакках, соответствующих кластеру I (см. рис. 6), но в них занижены значения НКМ. Можно предполагать, что граувакки этой группы не имеют существенной примеси вулканитов среднего и основного состава и обедне-

ны плагиоклазом, что подтверждается петрографическими данными.

По положению на диаграмме В.Д. Шутова песчаники выделенных групп не отличаются [Фазлиахметов, 2020б] друг от друга, что обусловлено несопоставимостью геохимического состава граувак с количественным (поштучно подсчитанным) содержанием в них зерен разного состава без учета размера последних. В данном случае, вероятно, было бы продуктивнее связать содержания главных элементов с площадями, занимаемыми зернами разного состава в шлифах. Судя по петрографическим описаниям, песчаники группы Па незначительно обогащены зернами вулканитов основного состава и эпидотизированы. В песчаниках группы I эпидотизация встречается редко, вторичные изменения выражены преимущественно серицитизацией.

В разрезе песчаники, соответствующие выделенным трем группам (кластеры I, Па и Пб), переслаиваются друг с другом. Следовательно, состав обломочного материала, поступавшего в область седиментации, незначительно менялся.

Граувакки верхней части улутауской свиты имеют особенности, свойственные, согласно [Юдович, Кетрис, 2010], вулканогенным породам. В частности, наблюдается положительная корреляция ТМ–ЖМ, ТМ–ФМ, корреляция ГМ–АМ слабая, содержание некарбонатного CaO достигает 8.5%. Вулканогенные породы, по данным [Юдович, Кетрис, 2000], характеризуются отрицательной корреляцией ГМ–НКМ, но в граувакках улутауской свиты, если рассматривать каждый кластер отдельно, она положительная.

Грауваккам ялангасской линзы свойственны низкие значения ТМ и положительные корреляции

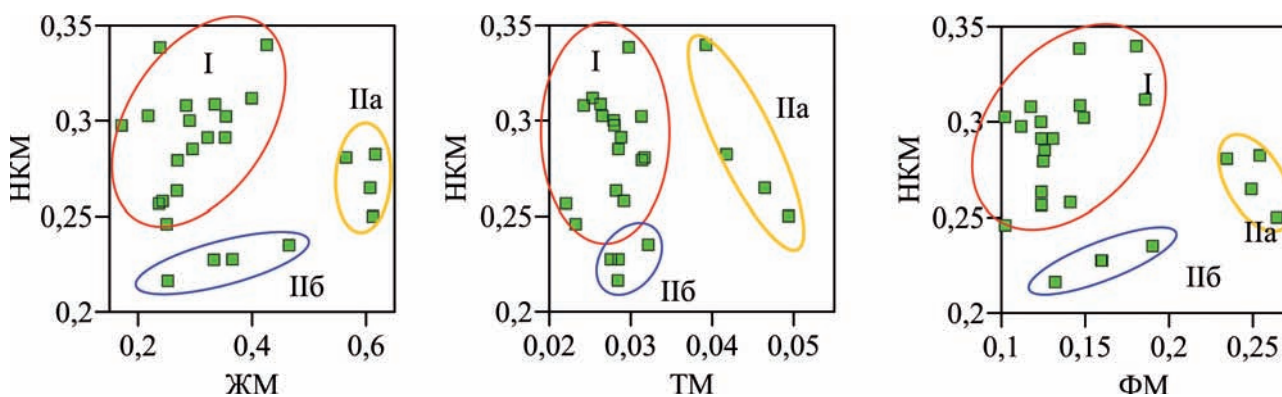


Рис. 6. Литохимические диаграммы для граувакк верхней части улутауской свиты Худолазовской мулды  
 Fig. 6. Lithochemical diagrams for the graywackes of the upper part of the Ulutau Formation of the Khudolaz syncline

ТМ–ЖМ, ТМ–ФМ и ЖМ–ФМ (см. табл. 1, рис. 4), что характерно для кислых вулканитов. Свойственная пирро- и петрогенным породам (в терминологии [Юдович, Кетрис, 2000]) отрицательная корреляция ГМ–НКМ не наблюдается, что, вероятно, связано с привнесом в породы кремнезема при их диа- и катагенезе [Фазлихметов, 2019б, в].

Песчаники идяш-кускарской линзы однородны по своему геохимическому составу. Увеличение содержаний Mn и некоторое понижение концентрации Na приурочено к верхней части опробованного разреза и обусловлено вторичными изменениями — породы разбиты трещинами, по которым развиты окислы и гидроокислы железа. Неизменным разностям свойственна положительная корреляция ФМ–ЖМ и ТМ–ЖМ. Положительная корреляция ГМ–АМ не наблюдается. Присутствие суперфемических и супержелезистых разностей согласуется с присутствием в обломочном материале вулканокластики основного состава.

Песчаники худолазовской линзы являются псевдосиаллитами. Согласно [Юдович, Кетрис, 2000], представители этой категории могут быть производными пирро- и петрогенных пород базальтового состава, что не согласуется с петрографическими данными. В граувакках худолазовской линзы отсутствуют корреляции, характерные для магматических пород — негативная между ФМ и показателями щелочности — НКМ и  $K_2O+Na_2O$  и позитивные между ТМ, ЖМ и ФМ. Не наблюдается также и отрицательной корреляции между ТМ–ГМ, которая свойственна осадочным образованиям. Стоит отметить, что положительная корреляция ГМ–АМ в породах данной группы выражена наиболее ярко.

Таким образом, граувакки худолазовской линзы не имеют выраженных признаков ни литогенных, ни пирро- или петрогенных пород, что вполне объясняется их пестрым петрографическим составом.

### Степень выветривания в источнике сноса

В практике исследований осадочных пород в качестве показателей интенсивности выветривания в источнике сноса наиболее часто используются химический индекс изменения состава CIA<sup>1</sup> [Nesbitt, Young, 1982] и химический индекс выветривания CIW [Harnois, 1988]. Их величины приближаются

<sup>1</sup>  $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ ,  $CIW = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$ . Оба индекса рассчитываются по молекулярным количествам оксидов.

к 100 в корах выветривания, тогда как в невыветрелых магматических породах они колеблются около 50.

Все исследуемые граувакки, вне зависимости от состава, близки друг другу по величинам CIA и CIW. Пределы вариации данных индексов соответственно составляют 40–65 и 41–68 (см. табл. 1), что характерно для кластолитов, сложенных обломочным материалом, не претерпевшим интенсивного выветривания при мобилизации и транспортировке.

Наиболее наглядно данное заключение иллюстрирует диаграмма А–СН–К (рис. 7) [Nesbitt, Young, 1982]. Фигуративные точки состава всех исследованных песчаников расположились вдоль левой стороны треугольника. Их составы близки к составам плагиоклазов, базальтов и прочих магматических пород. Тренда, направленного к правой стороне треугольника, в область составов, свойственных глинистым образованиям, не наблюдается.

### Состав петрофонда

Первоочередной задачей при реконструкции состава петрофонда по геохимическим параметрам представляется отнесение исследуемых пород к ка-

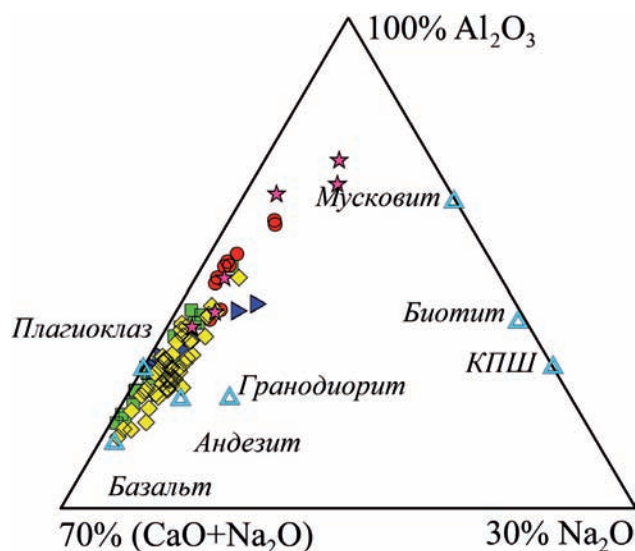


Рис. 7. Диаграмма АСК по [Nesbitt, Young, 1982] для франских граувакк Худолазовской мульды. Синими треугольниками показаны составы некоторых пород и минералов. Остальные условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 7. AСK diagram by [Nesbitt, Young, 1982] for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline. Blue triangles show the compositions of some rocks and minerals. Other symbols see g. 2.

тегории 1st cycle или second cycle, т.е. к продуктам размыва магматических (первый цикл седиментации) или осадочных (второй и последующие циклы седиментации) образований. По петрографическим данным к первому циклу седиментации относятся граувакки верхней части улутауской свиты и ялангасской линзы, являющиеся тефроидами, а также кластолиты идяш-кускаровской линзы, отнесенные к группе вулканотерригенных пород. Это заключение подтверждается наличием в песчаниках геохимических особенностей, свойственных магматическим образованиям — положительные корреляции ТМ–ЖМ, ТМ–ФМ и т.д.

Песчаники худолазовской линзы не имеют выраженных геохимических характеристик ни образований первого цикла седиментации, ни второго. Петрографический состав их пестрый, присутствуют зерна магматических, метаморфических и осадочных пород, что вместе с присутствием в разрезе глинистых сланцев послужило основанием для отнесения их к категории терригенных пород. Однако их принадлежность к категории 1st cycle или second cycle осталась неясной, поскольку субстратом для метаморфических пород, обломки которых изобилуют в граувакках худолазовской линзы, могли быть как магматогенные, так и осадочные образования. Судить об этом с достаточной степенью определенности весьма затруднительно.

Согласно [McLennan et al., 1993] уточнить принадлежность кластолитов к тому или иному седиментационному циклу представляется возможным по соотношению величин Zr/Sc и Th/Sc, вынесенных на диаграмму (рис. 8). Она несет два тренда. Первый характеризует состав магматических пород. Второй отражает постепенное обогащение осадков цирконием за счет накопления в них детритового циркона при рециклинге. Соответственно, к первому тренду тяготеют фигуративные точки состава отложений первого цикла седиментации, а ко второму — последующих.

Фигуративные точки состава граувакк и идяш-кускаровской, и худолазовской линз расположились на линии состава магматических пород. Следовательно, они, как и песчаники улутауской свиты и ялангасской линзы, относятся к образованиям первого цикла седиментации, т.е. 1st cycle. Таким образом, представляется обоснованным для всех исследуемых граувакк последующее применение диаграмм, позволяющих устанавливать состав магматических пород, превалирующих в источнике сноса.

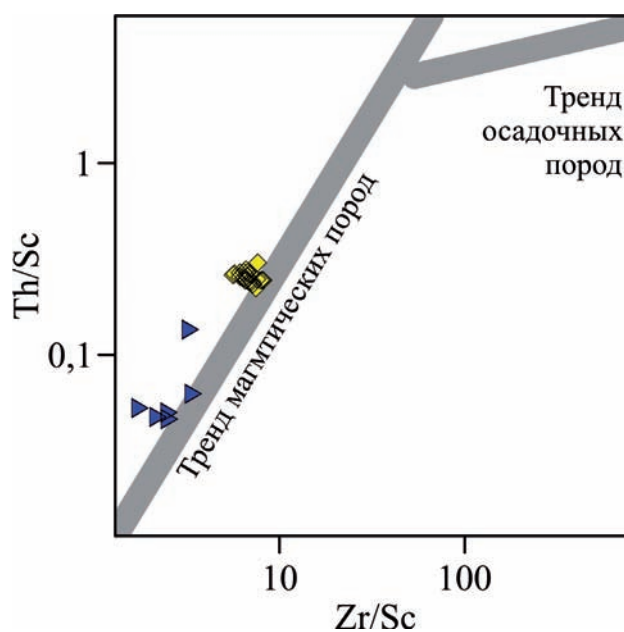


Рис. 8. Диаграмма Zr/Sc–Th/Sc по [McLennan et al., 1993] для граувакк идяш-кускаровской и худолазовской линз

Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 8. Zr/Sc–Th/Sc diagram by [McLennan et al., 1993] for greywackes of Idyash-Kuskarovo and Hudolaz lenses Legend see fig. 2.

Вынесение фигуративных точек состава франских граувакк на диаграммы F1–F2<sup>1</sup> и F3–F4 [Roser, Korsch, 1988], служащие для уточнения состава петрофонда, дало весьма примечательные результаты (рис. 9). Большинство проб песчаников худолазовской линзы «оказалось» богатыми кварцем осадочными образованиями, а точки, соответствующие остальным образцам, включая даже граувакки ялангасской линзы, попали в поля магматических пород среднего и основного состава.

Очевидно, что данные результаты не согласуются с итогами петрографических исследований и не могут служить основой для последующих выводов.

Более успешным оказалось построение диаграммы Кусуноки – Мусашино [(FeO\* + MgO)/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>O)] – SiO<sub>2</sub> [Kusunoki, Musashino, 2001].

<sup>1</sup> F1 = -1.773×TiO<sub>2</sub> + 0.6070×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0.76×Fe<sub>2</sub>O<sub>3обит</sub> - 1.5×MgO + 0.616×CaO + 0.509×Na<sub>2</sub>O - 1.224×K<sub>2</sub>O - 9.09;  
F2 = 0.445×TiO<sub>2</sub> + 0.07×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0.25×Fe<sub>2</sub>O<sub>3обит</sub> - 1.142×MgO + 0.438×CaO + 1.475×Na<sub>2</sub>O + 1.426×K<sub>2</sub>O - 6.861;  
F3 = 30.638×TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 12.541×Fe<sub>2</sub>O<sub>3обит</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 7.329×MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 12.031×Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 35.402×K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 6.382;  
F4 = 56.5×TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 10.879×Fe<sub>2</sub>O<sub>3обит</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 30.875×MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 5.404×Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 11.112×K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3.89.



Кластеры, соответствующие составу граувакк разных обломочных комплексов, расположились обособленно (см. рис. 9). По содержанию кремнезема отделились граувакки ялангасской линзы: их состав близок к составу риолитов. Большинство остальных точек заняло позиции преимущественно в поле

пород андезитового состава. Отличаются они только по величине  $(\text{FeO}^* + \text{MgO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})$ . Менее фемичными являются граувакки улутауской свиты, что обусловлено относительно повышенным в них содержанием плагиоклаза. Граувакки худолазовской линзы оказались наиболее фемичными, тогда как

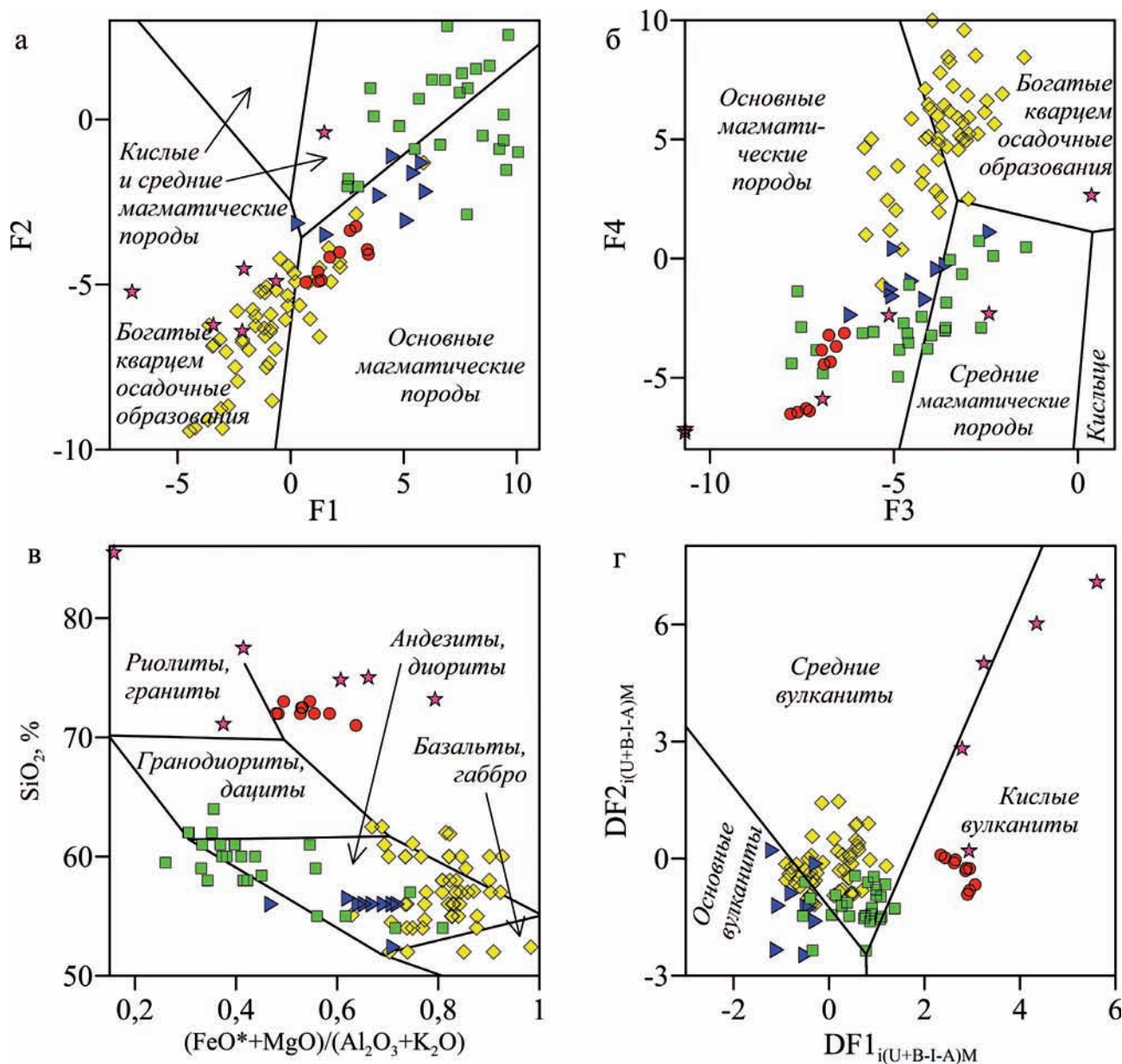


Рис. 9. Диаграммы, позволяющие установить состав петрофонада франских граувакк Худолазовской мульды: а–б — Б. Роузера и Р. Корша [Roser, Korsch, 1988]; в — Т. Кусуноки и М. Мусашино [Kusunoki, Musashino, 2001]; г — С. Верма [Verma, 2020]

Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 9. Diagrams allowing to establish the composition of the source rocks of the Frasnian graywackes of the Khudolaz syncline: а–б — by B. Roser and R. Korsch [1988]; в — by T. Kusunoki and M. Musashino [2001]; г — by S. Verma [2020]

Legend see g. 2.



песчаники идыш-кускардовской линзы заняли промежуточное положение.

С. Верма [Verma, 2020] для идентификации состава измененных вулканитов была предложена диаграмма  $DF1_{iM}-DF2_{iM}$ <sup>1</sup>. Вынесение на нее точек состава изученных граувакк дало следующие результаты. Песчаники идыш-кускардовской линзы соответствуют основным породам, песчаники улутауской свиты и худолазовской линзы — средним, а ялангасской линзы — кислым (см. рис. 8).

С целью детализации состава петрофонда на основании содержаний малых элементов Р. Хискоттом [Hiscott, 1984] и Э. Динелли [Dinelli et al., 1999] разработана диаграмма  $Cr/V-Y/Ni$  (рис. 10). Она предназначена для установления вклада ультраосновных и кислых разностей в состав кластолитов. В первом случае песчаники имеют повышенные значения отношения  $Cr/V$ , во втором — высокие значения отношения  $Y/Ni$ . Интересно отметить, что в авторском варианте данная диаграмма несет два тренда. Первый соответствует вариациям состава смеси ультраосновных пород и гранитов. Второй — ультраосновных пород и сиалических метаморфических. Фигуративные точки состава изученных граувакк на данной диаграмме расположились вдоль тренда, соответствующего составам магматических пород: отложения худолазовской линзы — на ветви, отвечающей разностям, обогащенным материалом ультраосновного состава, отложения улутауской свиты и ялангасской линзы — на ветви вдоль оси  $Y/Ni$ , соответствующей кислым магматическим породам. Граувакки идыш-кускардовской линзы, судя по расположению точек на данной диаграмме, не имеют явной примеси ни ультраосновных, ни кислых пород.

Представляется интересным провести сопоставление геохимического состава граувакк идыш-кускардовской и худолазовской линз с составом одновозрастных образований из соседних зон; пород, залегающих ниже по разрезу и с составом некоторых эталонных образцов. В качестве таковых выбраны состав верхней коры [Rudnick, Gao, 2003], PAAS (средний постархейский австралийский сланец) [Тейлор, МакЛеннан, 1988], средние составы андезибазальтовых тефроидов ирендыкской свиты, кислых тефроидов нижней подсвиты и андезибазальтовых тефроидов средней подсвиты улутауской свиты. Помимо этого заимствованы

<sup>1</sup> Формулы расчета этих показателей, занимающие несколько страниц, приведены в [Verma, 2020].

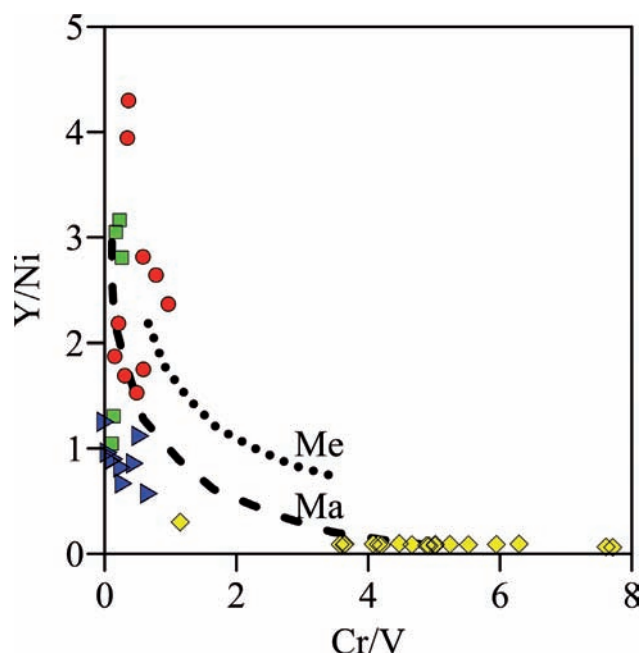


Рис. 10. Диаграмма  $Cr/V-Y/Ni$  по [Hiscott, 1984; Dinelli et al., 1999] для франских граувакк Худолазовской мульды

Условные обозначения см. рис. 2. Ma — смесь ультраосновных пород и гранитов; Me — смесь ультраосновных и сиалических метаморфических пород.

Fig. 10.  $Cr/V-Y/Ni$  diagram after [Hiscott, 1984; Dinelli et al., 1999] for the Frasnian greywackes of the Hudolaz syncline

Legend see g. 2. Ma — a mixture of ultrabasic rocks and granites; Me — a mixture of ultrabasic and sialic metamorphic rocks.

данные о содержаниях малых элементов в глинистых породах франской кодинской и фаменской устькодинской свит, известных на Среднем Урале [Мельничук, 2017; Мельничук, Рянская, 2017].

Сравнительный анализ показал, что граувакки идыш-кускардовской линзы наиболее близки к тефротурбидитам средне-основного состава улутауской свиты, а состав худолазовской линзы близок к таковому глинистых сланцев кодинской свиты, что ранее уже отмечалось [Мельничук, Фазлиахметов, 2017]. По распределению редкоземельных элементов граувакки худолазовской линзы приближаются к составу верхней коры и PAAS (рис. 11).

### Обломочные породы мукасовской свиты

Фигуративные точки состава кластолитов мукасовской свиты занимают на диаграмме Ф. Петтиджона [Петтиджон и др., 1976] поля граувакк, лититов, аркоз и субаркоз, на диаграмме М. Херрона

[Herron, 1988] — поля железистых песчаников и отчасти железистых сланцев, на диаграмме О.Ю. Мельничука [2018] — поля собственно граувакк, полевошпатовых и кварцевых граувакк, на диаграмме

А.Г. Коссовской и М.И. Тучковой [1988] — поля олигомиктовых и кварцевых песчаников (см. рис. 2). По классификации [Юдович, Кетрис, 2000] они являются силитами, при этом выявлены различия

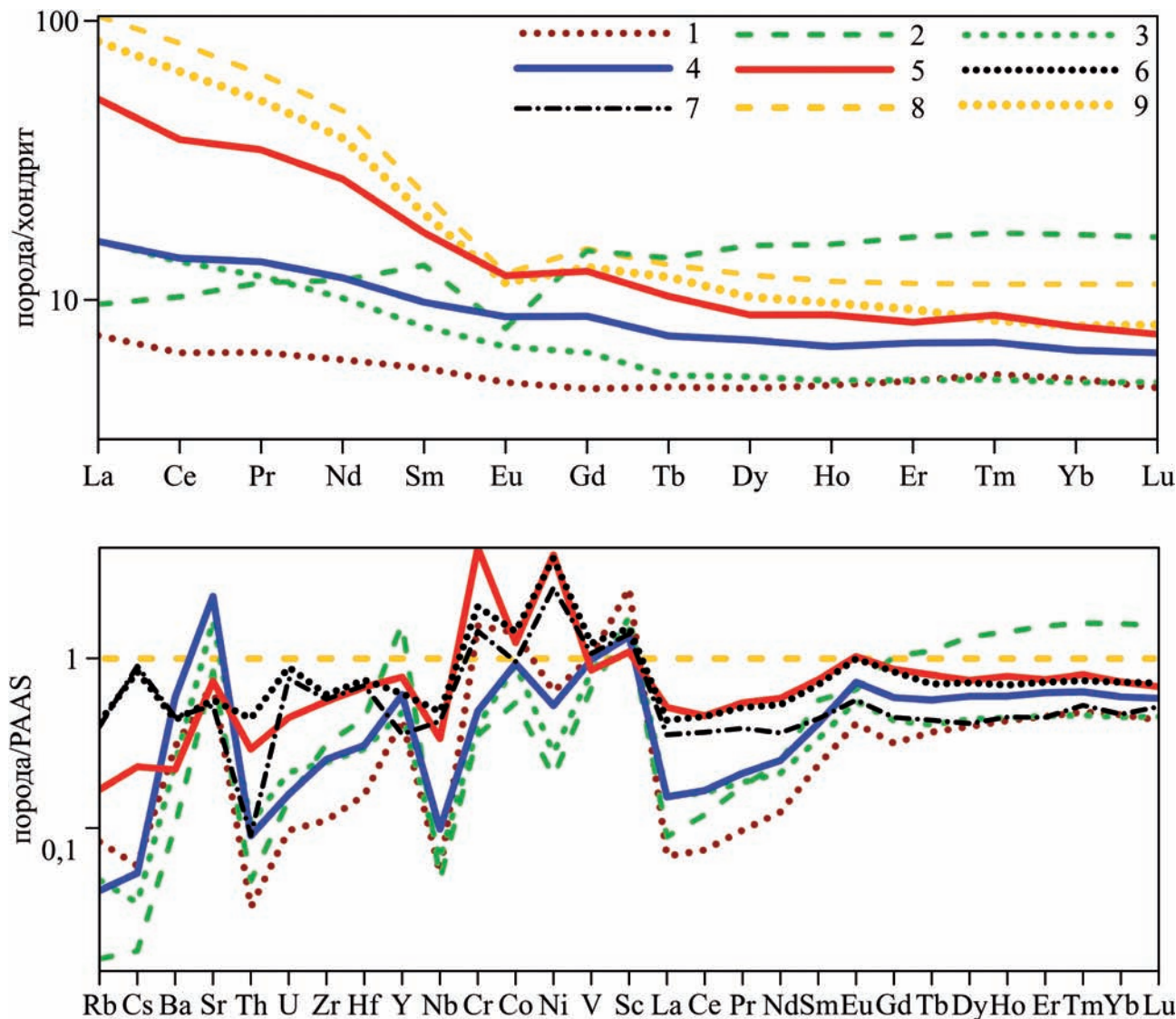


Рис. 11. Среднее содержание элементов, нормированных на хондрит и РААС, в средне- и верхнедевонских граувакках Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала, в аргиллитах кодинской и устькодинской свит Среднего Урала, РААС и верхней коре

Условные обозначения: 1 — ирендыкская свита; 2 — нижняя подсвита улутауской свиты; 3 — средняя подсвита улутауской свиты; 4–5 — биягодинская свита (4 — идяш-кускаровская линза, 5 — худолазовская линза); 6 — кодинская свита [Мельничук, Рянская, 2017]; 7 — аргиллиты устькодинской свиты [Мельничук, 2017]; 8 — средний австралийский постархейский сланец РААС [Тейлор, МакЛеннан, 1988]; 9 — состав верхней коры [Rudnick, Gao, 2003]. Содержание REE в хондрите по [Sun, McDonough, 1989].

Fig. 11. The middle content of elements normalized for chondrite and PAAS in the Middle and Upper Devonian greywackes of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals, in mudstones of the Kodinskaya and Ustkodinskaya formations of the Middle Urals, PAAS and upper crust

Legend: 1 — the Irendyk Formation; 2 — lower part of the Ulutau Formation; 3 — middle part of the Ulutau Formation; 4–5 — the Biyagoda formation (4 — Idyash-Kuskarovo lens, 5 — Khudolaz lens); 6 — mudstones of the Kodinskaya Formation by [Melnychuk, Ranska, 2017]; 7 — mudstones of the Ustkodinskaya Formation by [Melnychuk, 2017]; 8 — PAAS by [Taylor, McLennan, 1988]; 9 — the composition of the upper crust by [Rudnick, Gao, 2003]. Content of REE in chondrite by [Sun, McDonough, 1989].

гипо-, нормо- и супержелезистые (см. рис. 3). Им свойственны нормальные для силитов величины ТМ, сопоставимые с таковыми в граувакках улутауской свиты. Индексы выветривания CIA [Nesbitt, Young, 1982] и CIW [Harnois, 1988] разнятся в широких пределах, соответственно, 58–88 и 56–80. На диаграмме А–СN–К две точки расположились близко к медиане треугольника, что отражает сравнительно высокую степень выветривания (см. рис. 7).

Из приведенного обзора следует, что кластолиты мукасовской свиты весьма разнообразны по своему составу. В качестве причин могут служить вариации состава петрофонда, условий выветривания в источнике сноса, разный гранулометрический состав проб, отличия в степени интенсивности вторичных изменений и т. д. Судить об этом не позволяет незначительное количество проб. Однако наиболее важным следствием из приведенного обзора, подтверждающим петрографические данные, является явное отличие кластолитов мукасовской свиты от всех прочих пород. Явно это иллюстрирует диаграмма Р. Гарриелса и Ф. Маккензи [1974]  $\log[(CaO+Na_2O)/K_2O] - \log(SiO_2/Al_2O_3)$  (рис. 12). Она увязывает между собой составы осадочных и магматических пород. Кластеры, отвечающие составу граувакк улутауской и биягодинской свиты, расположились вблизи линии магматических пород, тогда как фигуративные точки состава кластолитов мукасовской свиты легли в область, свойственную более зрелым осадочным образованиям — аркозам и лититовым песчаникам. Помимо этого, в кластолитах мукасовской свиты повышено значение отношения  $Zr/Al_2O_3$  (рис. 13), что может свидетельствовать о присутствии в них рециклированного материала или длительного нахождения кластики в путях миграции.

### Отличительные особенности граувакк разных стратиграфических подразделений

Граувакки выделенных пяти обломочных комплексов отличаются друг от друга по петрографическим характеристикам, по содержанию и отношению оксидов породообразующих элементов, что уже отмечено (см. рис. 2–5) [Фазли-ахметов, 20206]. По содержаниям малых элементов, установленным методами ИСП-АЭС и РФА, граувакки разных стратиграфических уровней также имеют некоторые отличия. В отложениях мукасовской свиты и ялангасской линзы понижены содержания Sc и V (табл. 2). Граувакки улутауской

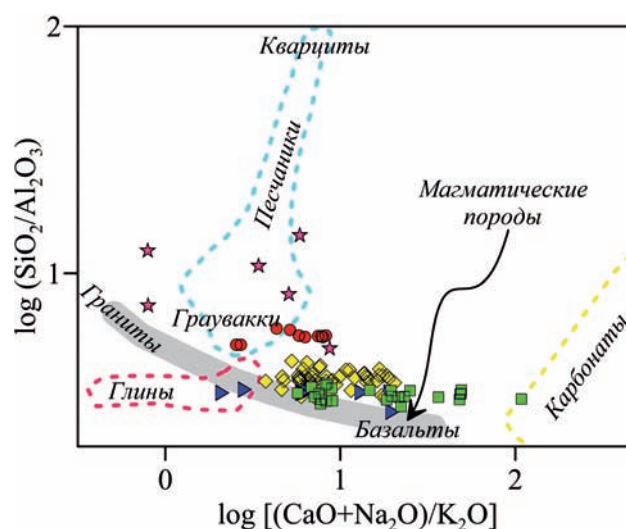


Рис. 12. Диаграмма Р. Гарриелса и Ф. Маккензи [1974] для франских граувакк Худолазовской мульды  
Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 12. Diagram of R. Harriels and F. Mackenzie [1974] for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline  
Legend see g. 2.

свиты отличаются низкими концентрациями Y. Относительное обогащение хромом и никелем служит характерным признаком кластолитов худолазовской линзы. По содержанию Zr выделенные обломочные комплексы наиболее дифференцированы. Наименьшие значения этого показателя установлены в породах улутауской свиты и ялангасской линзы, максимальные — в граувакках худолазовской линзы и в некоторых разностях мукасовской свиты (см. табл. 2).

Наиболее контрастно изученные граувакки отличаются по отношениям вышеупомянутых элементов друг к другу или к  $Al_2O_3$ . Наглядным примером служат диаграммы Cr–Ni, Cr/V–V, Cr/ $Al_2O_3$ –Y/ $Al_2O_3$  и Cr/ $Al_2O_3$ –Zr/ $Al_2O_3$  (см. рис. 13), которые возможно применять для идентификации стратиграфической принадлежности франских песчаников в тектонически изолированных блоках или в иных спорных случаях.

### Геодинамическая позиция бассейна

С середины XX века для реконструкции геодинамических условий накопления обломочных пород предложено множество диаграмм. Впоследствии целесообразность применения многих из них была проанализирована и подвергнута сомнению [Маслов и др., 2012; Ryan, Williams, 2007; Zaid,

Таблица 2. Средние, максимальные и минимальные содержания малых элементов в граувакках Худолазовской мульды

Table 2. Average, maximum and minimum contents of trace elements in the graywacke of the Khudolazov syncline

Компоненты	верхняя часть улутауской свиты, n=5	мукасовская свита, n=6	ялангасская линза, n=10	идяш-кускардовская линза, n=9	худолазовская линза, n=19
Sc	$\frac{9.7 \pm 5.6}{5-17.2}$	$\frac{14.3 \pm 1.8}{13.3-17.7}$	$\frac{9.9 \pm 1.6}{8.2-12.2}$	$\frac{17.5 \pm 1.6}{15.5-20.6}$	$\frac{15.5 \pm 0.6}{14.4-16.9}$
V	$\frac{71.2 \pm 18.4}{45.1-94.3}$	$\frac{139.2 \pm 39.4}{88.6-184.2}$	$\frac{50.6 \pm 16.1}{26.1-72.7}$	$\frac{134.1 \pm 29.1}{118-213.7}$	$\frac{101.8 \pm 10.2}{78.7-118.4}$
Cr	$\frac{23.2 \pm 11.9}{15-44.8}$	$\frac{20 \pm 2.5}{18.7-24}$	$\frac{18.3 \pm 7.6}{7.1-32}$	$\frac{35.5 \pm 43.6}{1.6-144.3}$	$\frac{489.6 \pm 156.6}{90.4-823.5}$
Co	$\frac{14.8 \pm 7.3}{8.3-27.3}$	$\frac{22.4 \pm 2.4}{18.2-23.5}$	$\frac{7.4 \pm 2}{3.5-9.1}$	$\frac{21.1 \pm 5.5}{13.9-29.6}$	$\frac{29.7 \pm 6.4}{9.4-36.4}$
Ni	$\frac{44.8 \pm 30.6}{20.6-103}$	$\frac{3.8 \pm 1.3}{2.3-5.6}$	$\frac{7 \pm 2.2}{4.7-11.8}$	$\frac{21.1 \pm 4.6}{10.7-25.4}$	$\frac{204.7 \pm 49.2}{45-290.9}$
Cu	$\frac{65.9 \pm 48.6}{22-157}$	$\frac{32.4 \pm 4.7}{29.1-40.2}$	$\frac{38.1 \pm 22.9}{25.8-104.5}$	$\frac{42.7 \pm 25}{19.1-93.7}$	$\frac{35.5 \pm 6}{26.1-50.6}$
Zn	$\frac{69.6 \pm 18.7}{32.1-82.2}$	$\frac{81.1 \pm 8.2}{64.3-85}$	$\frac{71.4 \pm 18.6}{57-118.8}$	$\frac{79.1 \pm 21.5}{52.4-111.6}$	$\frac{65.8 \pm 27.4}{51.9-180.6}$
Sr	–	$\frac{507.4 \pm 691.5}{375-2009.3}$	$\frac{82.1 \pm 27.2}{34.1-125.3}$	–	–
Y	–	$\frac{7.3 \pm 5.1}{4.7-17.2}$	$\frac{17 \pm 3.3}{12.2-22.2}$	$\frac{14.6 \pm 4.5}{12-26.5}$	$\frac{17.7 \pm 1.8}{13.5-21.6}$
Zr	$\frac{44.7 \pm 11.9}{27.6-56.3}$	$\frac{83.4 \pm 24.4}{64.2-132.6}$	$\frac{37.4 \pm 3.6}{30.8-41.4}$	$\frac{60.1 \pm 15.5}{54.5-93.4}$	$\frac{101.9 \pm 8.4}{90.7-118.7}$

Примечания см. табл. 1.

Notes see table 1.

2017]. В частности, исследования, проведенные на основе около 400 определений содержания породообразующих элементов в живетско-ранне-франских вулканокластических граувакках улутауской свиты и соответствующих их питающей провинции вулканитах урлядинской толщи [Фазлиахметов, 2019а], привели к следующим результатам. Было показано, что диаграммы Дж.Б. Мейнарда и Б. Роузера–Р. Корша применимы лишь для разностей, близких по содержанию кремнезема к андезитам и базальтам, а построение диаграмм М. Бхатии часто приводит к ложным результатам, особенно при анализе вулканокластических граувакк с содержанием кремнезема более 63%. Приемлемые результаты, согласно [Фазлиахметов, 2019а], в отношении островодужных граувакк независимо от содержания в них SiO<sub>2</sub> дает применение отношений K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O) по [Bhatia,

1983] и диаграммы DF1–DF2<sup>1</sup> по [Verma, Armstrong-Altrin, 2013].

Согласно DF1–DF2 и [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O)]–(K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O) диаграммам, построенным для граувакк улутауской и биягодинской свит (рис. 14),

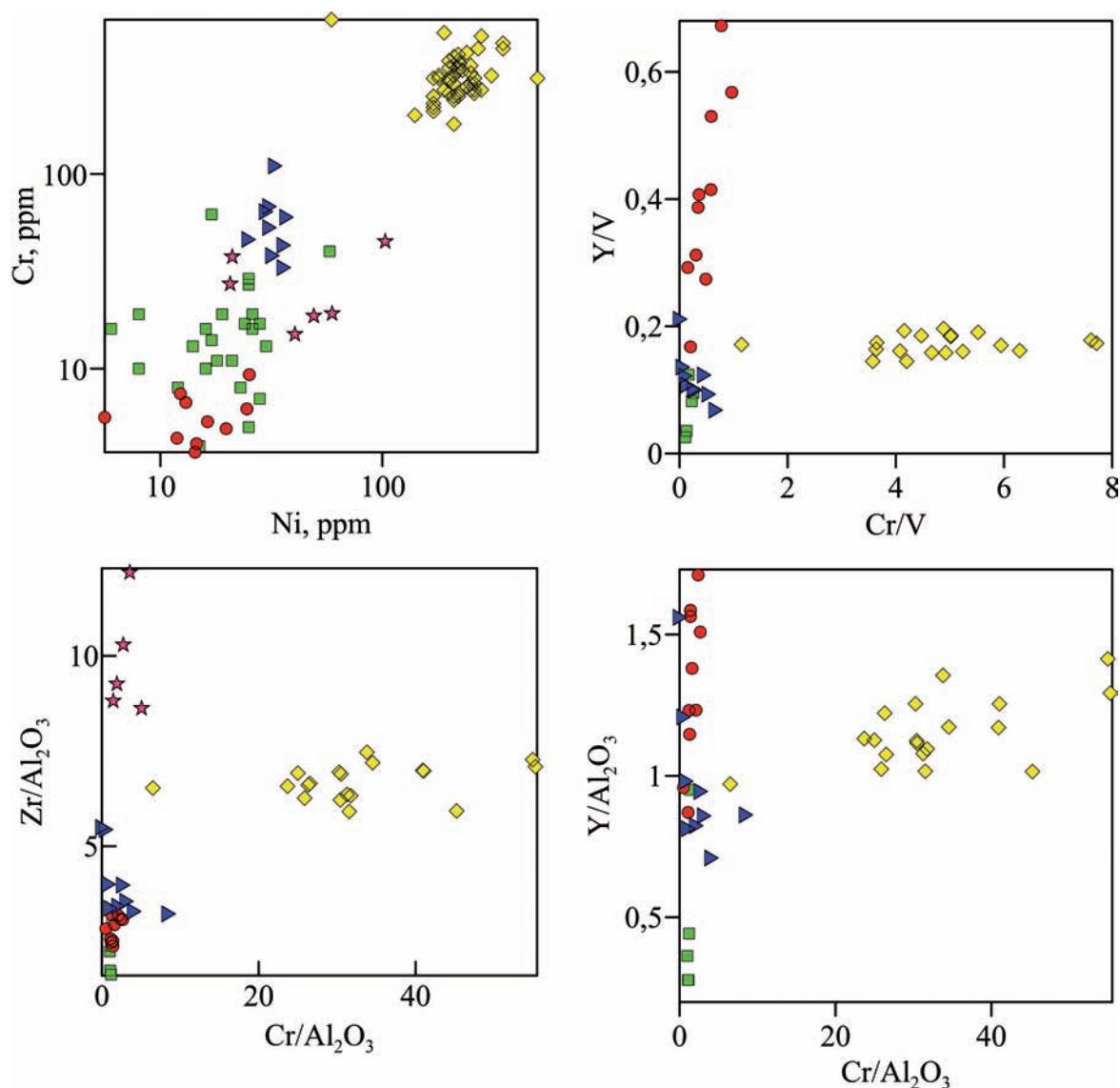
<sup>1</sup> F1=0.303–0.0447×SiO<sub>2</sub>–0.972×TiO<sub>2</sub>+0.008×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0.267×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.208×FeO–3.082×MnO+0.14×MgO+0.195×CaO+0.719×Na<sub>2</sub>O–0.032×K<sub>2</sub>O+7.51×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

F2=43.57–0.421×SiO<sub>2</sub>+1.988×TiO<sub>2</sub>–0.526×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0.551×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–1.61×FeO+2.72×MnO+0.881×MgO–0.907×CaO–0.177×Na<sub>2</sub>O–1.84×K<sub>2</sub>O+7.244×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

DF1<sub>SiO<sub>2</sub>>65%</sub>=0.608×ln(TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–1.854×ln(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.299×ln(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–0.55×ln(MnO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.12×ln(MgO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.194×ln(CaO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–1.51×ln(Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+1.941×ln(K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.003×ln(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–0.294;

DF2<sub>SiO<sub>2</sub>>65%</sub>=–0.554×ln(TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–0.995×ln(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+1.765×ln(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–1.391×ln(MnO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–1.034×ln(MgO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.225×ln(CaO/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.713×ln(Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.33×ln(K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>+0.637×ln(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>)<sub>adj</sub>–3.631. Индекс adj обозначает, что расчет ведется по содержаниям оксидов, пересчитанным на их сумму в 100%.





**Рис. 13.** Диаграммы, позволяющие отличать франские граувакки Худолазовской мулды по геохимическим параметрам

Условные обозначения см. рис. 2.

**Fig. 13.** Diagrams allowing to distinguish the Frasnian graywackes of the Khudolaz syncline by geochemical parameters

Legend see g. 2.

все пробы соответствуют обломочным отложениям акваторий энсиматических островных дуг. Аналогичные результаты были получены при построении диаграмм Дж.Б. Мейнарда [Maynard et al., 1982] и Б. Роузера–Р. Корша [Roser, Korsch, 1986] для граувакк улутауской свиты, идаш-кускараровской и худолазовской линз. Этот результат соответствует выводам [Серавкин и др., 1992; Косарев и др., 2005; Язева, Бочкарев, 1998; Пучков, 2000] о принадлежности Магнитогорской островной дуги к типу энсиматических. Песчаники ялангасской линзы на

многих диаграммах расположились вне полей, либо в полях энсиалических островных дуг или окраин андского типа. Подобные «непопадания», по всей видимости, типичны для кислых вулканокластических граувакк островодужных областей.

По соотношению малых элементов отложения улутауской свиты относятся к образованиям акваторий энсиматических островных дуг [Мизенс, 2009; Фазлиахметов, 2014]. Песчаники идаш-кускараровской и худолазовской линз, судя по отношениям Sc, Co, Zr, La и Th, образовались в этих же

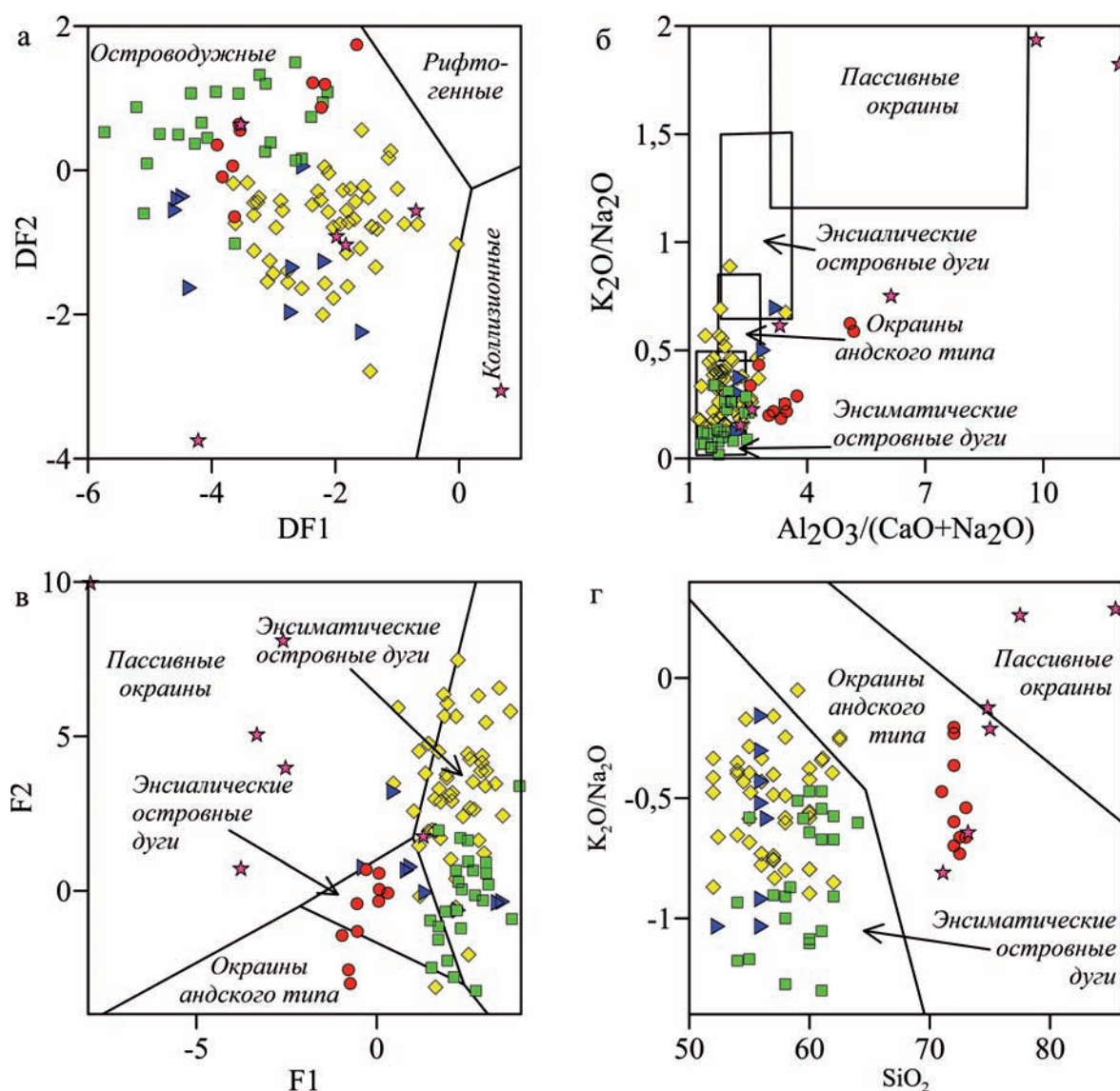


Рис. 14. Геодинамические диаграммы для франских граувакк Худолозавской мульды: а — С. Верма и Дж. Армстронга-Алтрина [Verma, Armstrong-Altrin, 2013]; б-в — М. Бхатиа [Bhatia, 1983]; г — Б. Роузера и Р. Корша [Roser, Korsch, 1986]

Условные обозначения см. рис. 2.

Fig. 14. Geodynamic diagrams for the Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline: а — by S. Verma and J. Armstrong-Altrin [2013]; б-в — by M. Bhatia [1983]; г — by B. Roser and R. Korsch [1986]

Legend see g. 2.

геодинамических условиях (рис. 15), но интересно отметить, что на некоторых диаграммах фигуративные точки состава выходят за пределы полей, отвечающих энсиматическим островным дугам. В частности, состав граувакк худолозавской линзы приближается к составу отложений энсиалических островных дуг, что противоречит представлениям [Серавкин и др., 1992; Косарев и др., 2005; Язева, Бочкарев, 1998; Пучков, 2000] о Магнитогорской

островной дуге как о энсиматической. Причина этого может быть связана как с неуниверсальностью примененных диаграмм, так и с собственно геологическими факторами. Например, обогащение граувакк хромшпинелидами снижает величину Sc/Cr и выводит кластер граувакк худолозавской линзы вне каких-либо полей на диаграмме Sc/Cr–La/Y.

Вопрос происхождения кластики худолозавской линзы сегодня нельзя считать закрытым. Работа

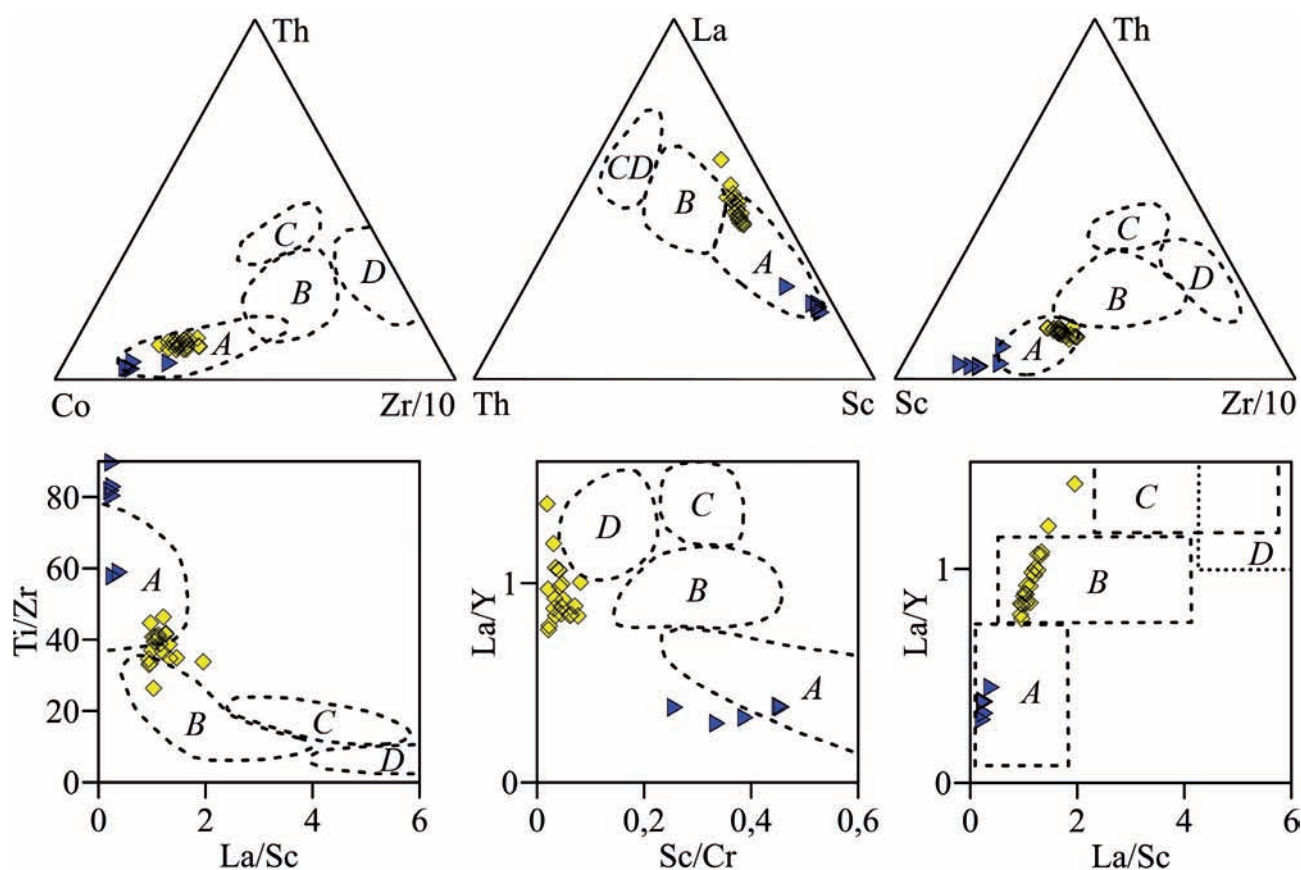


Рис. 15. Геодинамические диаграммы по [Bhatia, Crook, 1986] для граувакк идяш-кускаринской и худолазовской линз

Условные обозначения см. рис. 2. А — энциматическая островная дуга; В — энциалическая островная дуга; С — окраина андийского типа; D — пассивная континентальная окраина.

Fig. 15. Geodynamic diagrams after [Bhatia, Crook, 1986] for graywackes of Idyash-Kuskarovo and Khudolaz lenses

Legend see g. 2. A — oceanic island arc; B — continental island arc; C — active continental margin; D — passive margin.

над ним должна вестись совместно с изучением кластолитов кодинской и устькодинской свит Среднего Урала.

### Заклучение

Геохимическое изучение песчаников верхней части улутауской свиты и нижней подсвиты бягодинской свиты показало, что общим для них является соответствие по соотношению породообразующих и малых элементов вулканокластическим грауваккам, обломочный материал которых непретерпел химического выветривания и имеет признаки вулканитов энциматических островных дуг.

Отличия геохимического состава, позволяющие различать граувакки разных свит и линз, наиболее наглядно проявились на диаграммах Ni–Cr,

Cr/V–Y/Ni, Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Zr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Y/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Остальные особенности геохимического состава франских отложений сводятся к следующему.

Граувакки верхней части улутауской свиты по соотношению главных элементов близки к вулканогенным породам среднего состава, но повышенное значение отношения Y/Ni и пониженное значение ТМ указывает на присутствие в обломочном материале кислых вулканитов. Помимо этого, высокие концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO, по всей видимости, сопряжены с присутствием в породах плагиоклазов в количестве, превышающем таковое в прочих исследованных разностях.

Величины ТМ, НКМ, ЖМ и ФМ в граувакках улутауской свиты незначительно варьируют по разрезу, что обусловлено эпидотизацией пород и вариациями содержания плагиоклазов, зерен вулканитов среднего и основного состава.

Обломочным породам мукасовской свиты свойственны повышенные содержания кремнезема и гипотитанистость. На классификационных диаграммах соответствующие им точки не занимают какое-либо одно поле, все параметры варьируют в широких пределах. Повышенное значение отношения  $Zr/Al_2O_3$  и положение фигуративных точек состава на диаграмме М. Херрона на удалении от полей магматических пород и прочих франских граувакк могут указывать на присутствие в породах рециклированного материала или длительное нахождение кластики в путях миграции.

Граувакки ялангасской линзы обладают всем комплексом признаков, свойственных вулканитам кислого состава — повышенное содержание кремнезема, повышенное значение  $Y/Ni$  и пониженные ТМ, положительная корреляция ТМ–ЖМ, ТМ–ФМ и др.

В граувакках идяш-кускарской линзы содержания породообразующих элементов по сравнению со всеми изученными разностями, имеют средние значения. По соотношению главных и малых элементов они близки к вулканитам андезитового и андезибазальтового состава, без явных признаков примеси кислого и ультраосновного состава. Наиболее близкими к ним по геохимическим свойствам являются тефроиды среднего и основного состава средней части улутауской свиты.

Граувакки худолазовской линзы обладают наиболее высокими содержаниями  $TiO_2$  и  $MgO$ . Состав их соответствует средним вулканитам. В отличие от пород улутауской свиты, идяш-кускарской и ялангасской линз, они по соотношению породообразующих элементов не имеют явных признаков отложений ни первого ни последующих циклов седиментации, однако по величинам  $Zr/Sc$  и  $Th/Sc$  относятся к образованиям первого цикла. По сравнению с прочими исследованными разностями граувакки худолазовской линзы являются более фемичными. Судя по соотношению  $Cr/V-Y/Ni$ , они обогащены кластикой ультраосновного состава.

По соотношению главных и малых элементов граувакки худолазовской линзы близки к глинистым сланцам кодинской свиты (франский ярус, Средний Урал), что ставит вопрос об источнике сноса обломочного материала и является основанием для постановки последующих исследований.

Проведенные геохимические исследования в целом подтвердили и уточнили результаты петрографического изучения франских граувакк Худолазовской мульды. Песчаники, относящиеся к разным свитам и линзам, имеют свой геохимический состав

и различия, указывающие на весьма отличающиеся источники сноса. Прежде всего, это касается обломочных пород мукасовской свиты. Состав их чужд девонским кластолитам Западно-Магнитогорской зоны. Вызвано это особенностями мобилизации и транспортировки кластики, составом петрофонда или иной причиной — лишь предстоит выяснить.

Предметом дальнейших исследований также должны стать отложения худолазовской линзы, а именно, причины лавинной скорости их накопления [Фазлиахметов, 2020a] и близости по геохимическому составу к разновозрастным отложениям Среднего Урала.

*Исследования выполнены по теме государственного задания № 0246-2019-0118.*

#### Список литературы:

Гарриелс Р., Маккензи Ф. Эволюция осадочных пород. М.: Мир, 1974. 272 с.

Косарев А.М., Пучков В.Н., Серавкин И.Б. Петролого-геохимические особенности раннедевонско-эйфельских островодужных вулканитов Магнитогорской зоны в геодинамическом контексте // Литосфера. 2005. №4. С. 22–41.

Коссовская А.Г., Тучкова М.И. К проблеме минералого-петрохимической классификации и генезиса песчаных пород // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 2. С. 8–24.

Маслов А.В., Гареев Э.З., Ишерская М.В. «Стандартные» дискриминантные палеогеодинамические диаграммы и платформенные песчаниковые ассоциации // Отечественная геология. 2012. № 3. С. 55–65.

Мельничук О.Ю. Песчаники и аргиллиты устькодинской свиты (верхний девон, восточный склон Среднего Урала): особенности состава и петрофонд // Ежегодник-2016, 017. С. 82–87. (Тр. ИГГ УрО РАН; Вып. 164).

Мельничук О.Ю. Идентификация петротипов песчаников по литохимическому составу // Литология и я: Матер. 3-й Всерос. школы студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по литологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2018. С. 102–105.

Мельничук О.Ю., Рянская А.Д. Особенности вещественного состава аргиллитов кодинской свиты (верхний девон, восток Среднего Урала) // Литосфера. 2017. № 3. С. 71–86.

Мельничук О.Ю., Фазлиахметов А.М. К вопросу о существовании микроконтинента в позднедевонское время на Среднем Урале // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: ПНИПУ, 2017. № 20. С. 148–155.

Мизенс Г.А. Редкие элементы и особенности источников обломочного материала осадочных формаций девона и карбона в восточных зонах юга Урала // Геохимия. 2009. № 12. С. 1259–1278.



Мусина А.М., Мичурин С.В. Определение элементного состава методом ИСП-МС при разложении горных пород открытым способом // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Матер. IV Всерос. молодежной конференции (Уфа), СПб: Свое издательство, 2016. С. 39–44.

Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 536 с.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.

Серавкин И.Б., Косарев А.М., Салихов Д.Н., Знаменский С.Е., Родичева З.И., Рыкус М.В., Сначев В.И. Вулканизм Южного Урала. М.: Наука, 1992. 197 с.

Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.

Фазлиахметов А.М. О связи геохимических индикаторных отношений и гранулометрического состава песчанников на примере диаграмм Бхагии-Крука // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Матер. и докл. 10-й Межрег. науч.-практ. конференции. Уфа: ДизайнПресс, 2014. С. 162–163.

Фазлиахметов А.М. О применении геодинамических литохимических диаграмм при изучении тифрогенных песчанников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019а. Т. 330. № 7. С. 34–43. DOI: 10.18799/24131830/2019/7/2174.

Фазлиахметов А.М. Пример диагнетического окварцевания песчанников, контактирующих с кремнями // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: Сб. статей 7-й Всерос. молодежной конференции с международным участием. Уфа: БашНИПИнефть, 2019б. С. 60–64.

Фазлиахметов А.М. Стадиальные преобразования кислых вулканокластических граувакк биягодинской свиты (Западно-Магнитогорская зона Южного Урала) // Геологический вестник. 2019в. № 2. С. 72–87. DOI: 10.31084/2619-0087/2019-2-6.

Фазлиахметов А.М. Франские граувакки Худолазовской мульды. Сообщение 1. Краткая характеристика отложений // Геологический вестник. 2020а. № 2. С. 3–21. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-2-1.

Фазлиахметов А.М. Франские граувакки Худолазовской мульды. Сообщение 2. Краткая петрографическая характеристика // Геологический вестник. 2020б. № 3. С. 94–111. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-8.

Фазлиахметов А.М. Средне-верхнедевонские песчаники Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2021. Т. 163, Кн. 1. С. 88–114. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114.

Фазлиахметов А.М., Зайнуллин Р.И. Геохимические критерии отличия вулканокластических граувакк нижнего и среднего девона Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 12. С. 31–35.

Фазлиахметов А.М., Аржавитина М.Ю., Гилязов А.А. Петрографические особенности верхнефранских вулканокластических граувакк окрестностей озера Ялангаскуль (Западно-Магнитогорская зона Южного Урала) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 12. С. 23–30.

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

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 412 с.

Язева Р.Г., Бочкарев В.В. Геология и геодинамика Южного Урала: (Опыт геодинамического картирования). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 1998. 203 с.

Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // The Journal of Geology. 1983. Vol. 91. P. 611–627.

Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic settings discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol. 92. P. 181–193.

Dinelli E., Lucchini F., Mordenti A., Paganelli L. Geochemistry of Oligocene-Miocene sandstones of the northern Apennines (Italy) and evolution of chemical features in relation to provenance changes // Sedimentary Geology. 1999. Vol. 127, Is. 3–4. P. 193–207.

Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sed. Geol. 1988. Vol. 55, No. 3–4. P. 319–322.

Herron M.M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sed. Petrol. 1988. Vol. 58. P. 820–829.

Hiscott R.N. Ophiolitic source rocks for Taconic-age gneiss: trace element evidence // Geol. Soc. Amer. Bull. 1984. Vol. 95. P. 1261–1267.

Kusunoki T., Musashino M. Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin // Earth Science. 2001. Vol. 55, No. 5. P. 293–306.

Maynard J.B., Valloni R., Yu H.S. Composition of modern deep-seasands from arc-related basins // Geological Society of London: Special Publication. 1982. Vol. 10. P. 551–561.

McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics // Processes controlling the composition of clastic sediments. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1993. Vol. 284. P. 21–40. <http://dx.doi.org/10.1130/SPE284-p21>.

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.

Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio // The Journal of Geology. 1986. Vol. 94. P. 635–650.

Roser B.D., 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.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. Vol. 3. P. 1–64.

Ryan K.M., Williams D.M. Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins // Chemical Geology. 2007. No. 242. P. 103–125.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts // Geol. Spec. Publ. 1989. № 42. P. 313–345.

Verma S.P. Road from Geochemistry to Geochemometrics. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020. 669 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.

Zaid S.M. Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting // *Journal of Earth System Science.* 2017. Vol. 126, Article number 103.

#### References:

Bhatia M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, **91**, 611-627.

Bhatia M.R., Crook K.A.W. (1986) Trace element characteristics of graywackes and tectonic settings discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **92**, 181-193.

Dinelli E., Lucchini F., Mordenti A., Paganelli L. (1999) Geochemistry of Oligocene-Miocene sandstones of the northern Apennines (Italy) and evolution of chemical features in relation to provenance changes. *Sedimentary Geology*, **127**(3-4), 193-207.

Fazliakhmetov A.M. (2014) On the relationship between geochemical indicator relations and granulometric composition of sandstones on the example of Bhatia-Kruk diagrams. *Geologiya, poleznye iskopayemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopedel'nykh territoriy. Materialy i doklady Desyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Geology, minerals and problems of geocology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories. Materials and reports of the Tenth Interregional Scientific and Practical Conference]*. Ufa: DesignPress, 162-163. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2019a) On the application of geodynamic lithochemical diagrams in the study of tephrogenic sandstones. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*, 330(7), 34-43. DOI: 10.18799/24131830/2019/7/2174. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2019b) An example of diagenetic silici cation of sandstones in contact with cherts. *Geology, geocology and resource potential of the Urals and adjacent territories. Collection of articles of the VII All-Russian youth conference with international participation [Geologiya, geoekologiya i resursnyy potentsial Urala i sopedel'nykh territoriy. Sbornik statey VII Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem]*. Ufa: BashNIPIneft, 60-64. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2019b) Epigenetic transformations in acidic volcanoclastic greywackes from Biygoda Formation (the West-Magnitogorsk zone, the Southern Urals). *Geologicheskii vestnik – Geological Bulletin*, (2), 72-87. DOI: 10.31084/2619-0087/2019-2-6. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2020a) Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline. Message 1. Brief description of deposits. *Geologicheskii vestnik – Geological Bulletin*, (2), 3-23. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-2-1. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2020b) Frasnian greywackes of the Khudolaz syncline. Message 2. Brief description of petrography. *Geologicheskii vestnik – Geological Bulletin*, (3), 94-111. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-8. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M. (2021) The Middle-Upper Devonian sandstones of the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki – Scientific notes of the Kazan University. Ser. Natural Sciences*, **163**(1). 88-114. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.1.88-114. (In Russian).

Fazliakhmetov A.M., Arzhavina M.Y., Gilyazov A.A. (2016) Petrographic features of the Upper Frasnian volcanoclastic greywackes surroundings of Lake Yalangaskul (West Magnitogorsk zone of the Southern Urals). *Bulletin of the IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, (12), 23-30. (in Russian).

Fazliakhmetov A.M., Zainullin R.I. (2015) Geochemical criteria for distinguishing volcanoclastic graywackes of the Lower and Middle Devonian of the West Magnitogorsk zone of the South Urals. *Bulletin of the IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, (12), 31-35. (In Russian).

Garriels R., Mackenzie F. (1974) *Evolutsiya osadochnykh porod [Evolution of sedimentary rocks]*. Moscow, Mir Publ., 272 p. (In Russian).

Harnois L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sed. Geol.*, **55**(3-4), 319-322.

Herron M.M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sed. Petrol.*, **58**, 820-829.

Hiscott R.N. (1984) Ophiolitic source rocks for Taconic-age ysch: trace element evidence. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **95**, 1261-1267.

Kosarev A.M., Puchkov V.N., Seravkin I.B. (2005) Petrological-geochemical features of the Early Devonian-Eifelian island arc volcanics of the Magnitogorsk zone in the geodynamic context. *Lithosphaera – Lithosphere*, (4), 22-41. (In Russian).

Kossovskaya A.G., Tuchkova M.I. (1988) On the problem of mineralogical and petrochemical classification and genesis of sandy rocks. *Litologiya i polez. iskopayemye – Lithology and mineral resources*, (2), 8-24. (In Russian).

Kusunoki T., Musashino M. (2001) Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin. *Earth Science*, **55**(5), 293-306.

Maslov A.V., Gareev E.Z., Isherskaya M.V. (2012) «Standard» discriminant paleogeodynamic diagrams and platform sandstone associations. *Otechestvennaya geologiya – Domestic geology*, (3), 55-65. (In Russian).

Maynard J.B., Valloni R, Yu H.S. (1982) Composition of modern deep-seasands from arc-related basins. *Geological Society of London. Special Publication*, **10**, 551-561.

McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes controlling the composition of clastic sediments*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **284**, 21-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.1130/SPE284-p21>.

Melnichuk O.Yu. (2017) Sandstones and mudstones of the Uskodinsky Formation (Upper Devonian, eastern slope of the Middle Urals): compositional features and petrofund. *Yezhegodnik-2016, Tr. IGG UrO RAN – Yearbook-2016, works IGG UB RAS*, Is. 164. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 82-87. (In Russian).

- Melnichuk O.Yu. (2018) Identification of petrotypes of sandstones by lithochemical composition. *Litologiya i ya. Materialy 3-y Vserossiyskoy shkoly studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spetsialistov po litologii* [Lithology and I. Materials of the 3rd All-Russian school of students, graduate students, young scientists and specialists in lithology]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN, 102-105. (In Russian).
- Melnichuk O.Yu., Fazliakhmetov A.M. (2017) On the question of the existence of a microcontinent in the Late Devonian time in the Middle Urals. *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii*. Nauchnyye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. Perm: Perm. Gos. Nats. Issled. Univ., (20), 148-155. (In Russian).
- Melnichuk O.Yu., Ryanskaya A.D. (2017) Features of the material composition of mudstones of the Kodinsky Formation (Upper Devonian, east of the Middle Urals). *Lithosphere – Lithosphere*, (3), 71-86. (In Russian).
- Mizens G.A. (2009) Rare elements and features of sources of clastic material of sedimentary formations of the Devonian and Carboniferous in the eastern zones of the southern Urals. *Geokhimiya – Geochemistry*, (12), 1259-1278. (In Russian).
- Musina A.M., Michurin S.V. (2016) Determination of the elemental composition by the ISP-MS method for the decomposition of rocks by the open method. *Geologiya, geoekologiya i resursnyiy potentsial Urala i sopredelnyih territoriy*. Materialy IV Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii, Ufa [Geology, geoecology and resource potential of the Urals and adjacent territories. Materials of the IV All-Russian Youth Conference, Ufa]. St. Petersburg: Svoe izdatelstvo Publ., 39-44. (In Russian).
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1992) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Pettidzhon F., Potter P., Siver R. (1976) *Peski i peschaniki* [Sands and sandstones]. Moscow, Mir Publ., 1976, 536 p. (In Russian).
- Puchkov V.N. (2000) *Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala* [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals]. Ufa, Dauriya Publ., 146 p. (In Russian).
- Roser B.P., Korsch R.J. (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. *The Journal of Geology*, **94**, 635-650.
- Roser B.D., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**, 119-139.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, **3**, 1-64.
- 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.
- Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N., Znamensky S.E., Rodichesva Z.I., Rykus M.V., Snachev V.I. (1992) *Vulkanizm Yuzhnogo Urala* [Volcanism of the Southern Urals]. Moscow, Nauka Publ., 197 p. (In Russian).
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts. *Geol. Spec. Publ.*, (42), 313-345.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1988) *Kontinentalnaya kora: ee sostav i evolyutsiya* [The continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian).
- Verma S.P. (2020) Road from Geochemistry to Geochemometrics. Singapore, Springer Nature Singapore Pte, 669 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.
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V. (1998) *Geologiya i geodinamika Yuzhnogo Urala (Opyt geodinamicheskogo kartirovaniya)* [Geology and geodynamics of the Southern Urals (Experience of geodynamic mapping)]. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 203 p. (In Russian).
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) *Osnovyi lithimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 479 p. (In Russian).
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2010) *Geokhimicheskiye i mineralogicheskiye indikatory vulkanogennykh produktov v osadochnykh tolshchakh* [Geochemical and mineralogical indicators of volcanic products in sedimentary strata]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 412 p. (In Russian).
- Zaid S.M. (2017) Petrography and geochemistry of the Middle Miocene Gebel El Rusas sandstones, Eastern Desert, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of Earth System Science*, 126, Article number 103.

*Сведения об авторе:*

**Фазлиахметов Александр Маратович** — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Лаборатории стратиграфии палеозоя Института геологии — обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: famrb@mail.ru

*About the author:*

**Alexander M. Fazliakhmetov** — candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher of the Paleozoic Stratigraphy Laboratory, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS). E-mail: famrb@mail.ru