

## ГЛИНИСТЫЕ ПОРОДЫ ВЕРХНЕДЕВОНСКОЙ КОДИНСКОЙ СВИТЫ (ВОСТОЧНЫЙ СКЛОН СРЕДНЕГО УРАЛА): МИНЕРАЛОГИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИИ

© 2016 г. О. Ю. Мельничук

Кодинская свита обнажается по обоим берегам р. Исеть выше г. Каменск-Уральский (рис. 1) и датируется верхним франом [4, 7]. В ее разрезе существенную роль играют аргиллиты, слагающие прослои, пласты, пакеты и пачки мощностью от первых сантиметров до 9 м. Среди них встречаются как довольно чистые разности, так и породы с неравномерной примесью алевритового и/или песчаного материала. Аргиллиты характеризуются тонкой горизонтальной слоистостью, равномерной и неравномерной, подчеркнутой слойками песчаного материала, присыпками слюды, растительным детритом. Значительно реже слоистость линзовидная, с изолированными и сочлененными линзами мелко- и тонкозернистых песчаников. На разных уровнях в аргиллитах развиты карбонатные конкреции разного размера и строения, в том числе с текстурами cone-in-cone.

Выводы в работе сделаны на основании данных о химическом составе глинистых пород, полученных следующими методами. Минеральный состав определен рентгенофазовым методом на дифрактометре SHIMADZU XRD-700 и термическим – на дериватографе Dimond TG-DTA, Perkin Elmer (аналитики О.В. Галахова, Т.Я. Гуляева, В.Г. Петрищева). Содержание петрогенных оксидов – рентгенофлуо-

ресцентным методом на спектрометрах XRF-1800 и СРМ-18 (табл. 1) (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, Г.С. Неупокоева). Содержание редких и редкоземельных элементов – ICP-MS на приборе ELAN 9000 с предварительным разложением проб (аналитики О.А. Березикова, Л.К. Дерюгина, Н.Н. Адамович и Н.В. Чередниченко).

Для типизации пелитолитов применяется схема химической классификации осадочных пород и их аналогов, предложенная в работе [9] и основанная на использовании пороговых значений петрохимических оксидов и ряда петрохимических модулей. В том числе гидролизатный модуль –  $ГМ = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_{3общ} + MnO)/SiO_2$  – используется для количественной оценки воздействия процесса гипергенной дифференциации вещества, алюмокремниевый –  $АМ = Al_2O_3/SiO_2$  – показывает величину химического выветривания пород, железный –  $ЖМ = (Fe_2O_{3общ} + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$  – отражает соотношение между продуктами гидролиза, фемический –  $ФМ = (Fe_2O_{3общ} + MnO + MgO)/SiO_2$  – применяется для распознавания петро- и пирогенных пород и осадков. Величина титанового модуля  $ТМ = TiO_2/Al_2O_3$  зависит от состава петрофонда, динамики среды седиментации, в то время как нормированная щелоч-

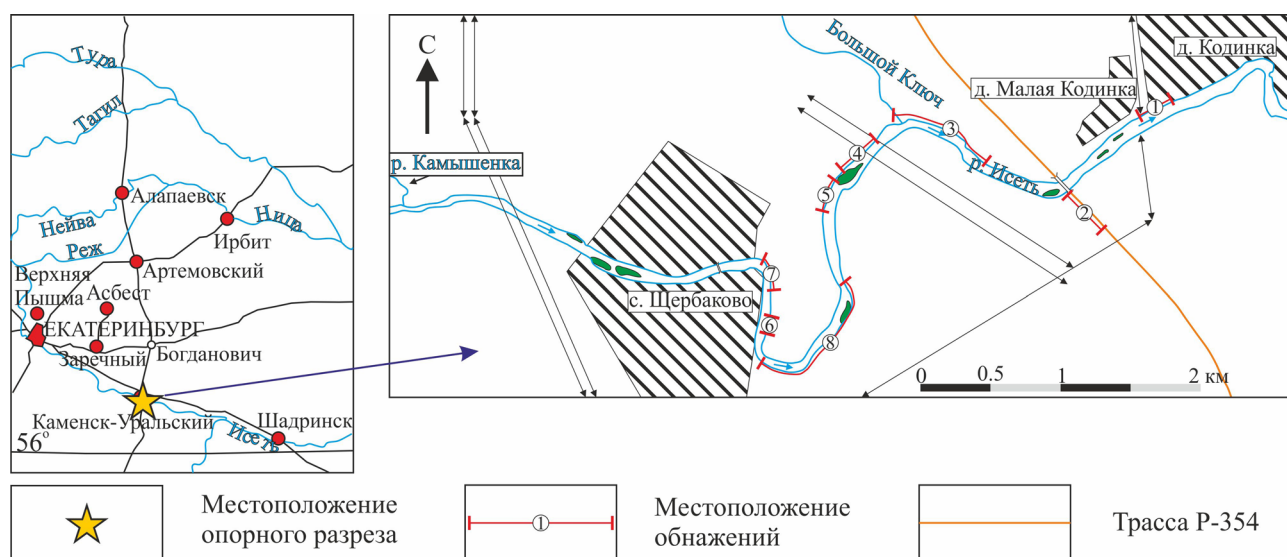


Рис. 1. Географическое положение разреза кодинской свиты, изученного в долине р. Исеть.

**Таблица 1.** Содержание петрогенных оксидов (мас. %), значения петрохимических модулей и некоторых индикаторных показателей для глинистых пород кодинской свиты

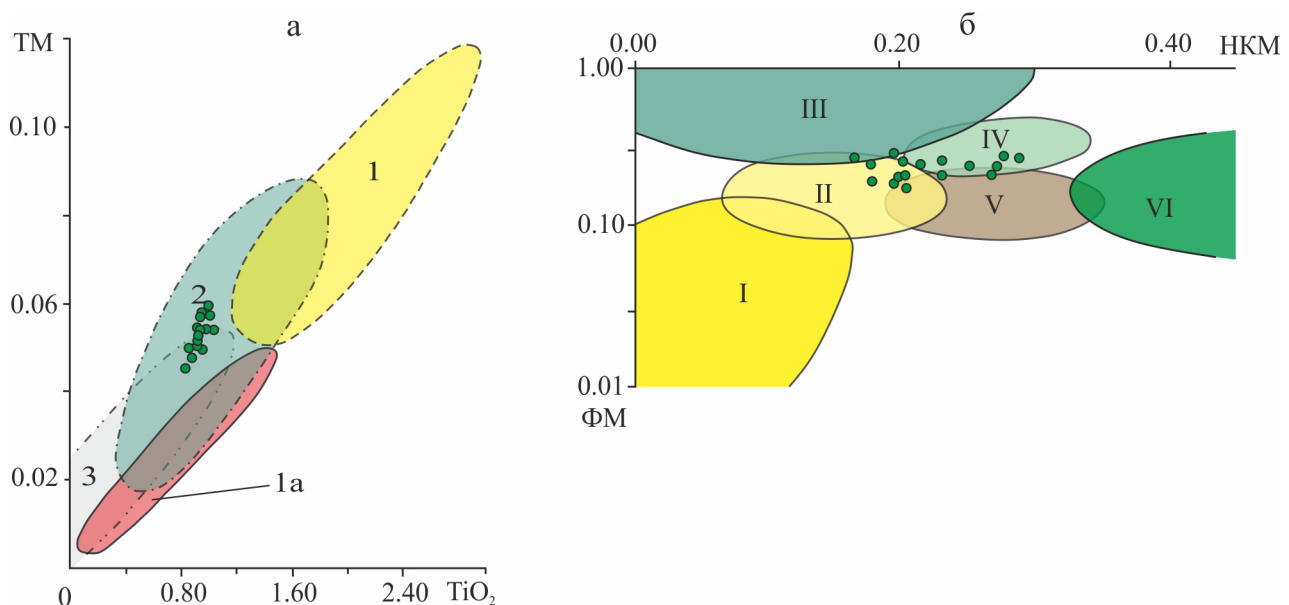
Компонент	Мин.	Ср.	Макс.
SiO <sub>2</sub>	53.91	56.42	60.08
TiO <sub>2</sub>	0.82	0.93	1.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.13	17.42	18.95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>зобщ</sub>	7.43	8.64	10.05
MnO	0.05	0.12	0.21
MgO	3.09	5.04	7.02
CaO	0.66	1.28	3.01
Na <sub>2</sub> O	0.32	1.09	2.23
K <sub>2</sub> O	1.77	2.67	3.80
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.15	0.27
П.п.п.	5.02	6.52	9.21
ГМ	0.43	0.48	0.52
ЖМ	0.39	0.48	0.60
ФМ	0.19	0.25	0.30
АМ	0.29	0.31	0.35
ТМ	0.05	0.05	0.06
НКМ	0.16	0.22	0.29
ЩМ	0.10	0.43	0.98
СIA	62	72	77
СIW	73	79	83

ность – НКМ = (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – является индикатором относительного содержания главных типов щелочных алюмосиликатов – полевых шпатов

и слюд, а щелочной модуль – ЩМ – в сочетании с натриевым – НМ – и калиевым – КМ – позволяет оценить в породе присутствие Na-содержащих минералов: ЩМ = Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O, НМ = Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, КМ = K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В результате исследований установлено, что основными породообразующими минералами в рассматриваемых аргиллитах являются хлорит и гидрослюда, в подчиненном количестве присутствует монтмориллонит. Во всех пробах есть примесь терригенных частиц – зерен кварца и плагиоклаза, в меньшей степени чешуек слюды. В некоторых пробах обнаружено незначительное количество органического вещества.

По классификации Я.Э. Юдовича и М.П. Кертрис [9] все изученные глинистые породы можно отнести к хемотипу псевдосиаллитов, значения ГМ (см. табл. 1) которых изменяются в пределах 0.43–0.52, а содержание MgO составляет 3.09–7.02%. На базовых модульных диаграммах (таких как (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)-ГМ, НКМ-ГМ) образцы кодинской свиты формируют единый кластер. По модулю ЩМ среди них можно выделить гипонатровые (7 проб) и нормонатровые (11 проб), по модулю ГМ – нормогидролизатные (15 проб) и супергидролизатные (3 пробы). По модулю ЖМ две пробы выделяются как супержелезистые, остальные – норможелезистые. По модулю ФМ 10 проб отвеча-



**Рис. 2.** Положение фигуративных точек составов аргиллитов кодинской свиты на классификационных диаграммах [9].

а – глины: 1 – каолиновые, 1а – продукты катагенетических преобразований монтмориллонитового или каолинового субстрата, 2 – существенно гидрослюдистые, 3 – существенно монтмориллонитовые. б – глинистые породы: I – с преобладанием каолинита; II – с преобладанием монтмориллонита и подчиненным количеством каолинита и гидрослюда; III – с доминированием хлорита, в виде примеси может присутствовать Fe-гидрослюда; IV – преимущественно гидрослюдистого состава, имеющие значительную примесь тонкозернистых обломков полевых шпатов; V – состоящие из стандартной трехкомпонентной системы “хлорит + монтмориллонит + гидрослюда”; VI – гидрослюдистые с той или иной примесью тонкодисперсного полевого шпата.

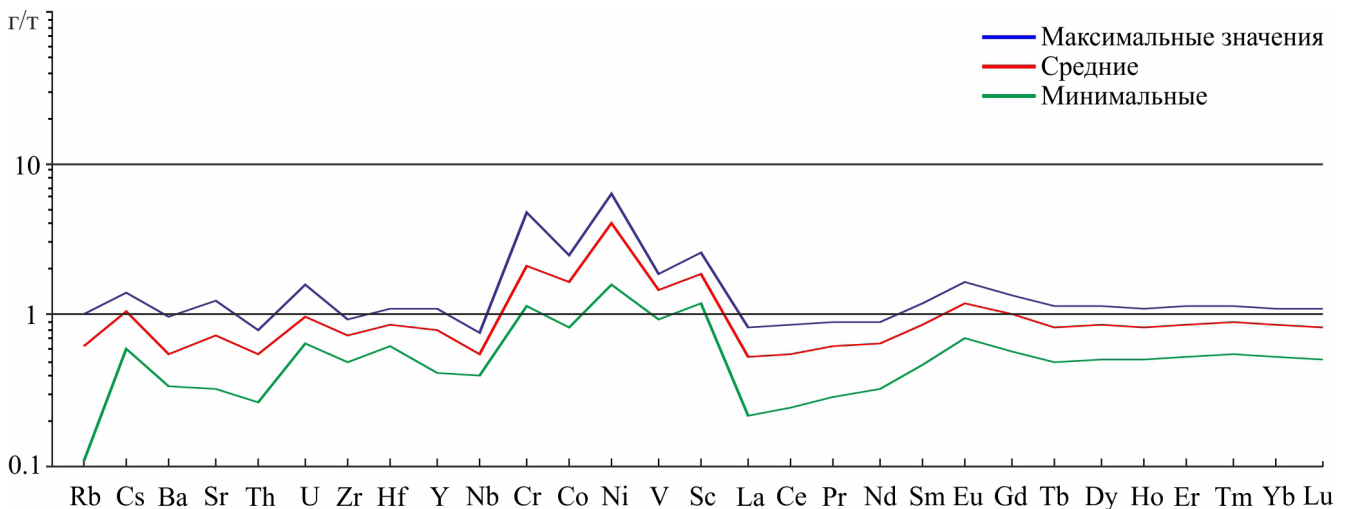
ют гиперфемичному типу, прочие – супер- и нормофемичному. По значениям модуля НКМ породы делятся на гипо- и нормощелочные. Вариация остальных геохимических модулей невелика, и их значения характеризуют аргиллиты как нормоглиноземистые и нормотитанистые породы. Различие по подтипам сиаллического стандарта, вероятно, связано с наличием в породах изменчивого количества хлорита (вероятно, аллотигенного) и плагиоклазов. На диаграммах TiO<sub>2</sub>-ТМ и НКМ-ФМ (рис. 2а, б) фигуративные точки состава кодинских аргиллитов в основном попадают в поля, характерные для пород с преобладанием хлорита, либо хлорита и гидрослюда, реже – монтмориллонита [9], что достаточно хорошо соотносится с установленным минеральным составом.

Содержание РЗЭ в аргиллитах составляет от 54.3 до 165.1 г/т (табл. 2), что несколько меньше средней суммы РЗЭ для аргиллитов и глинистых сланцев [6]. Это позволяет предполагать, что в источниках сноса преобладали основные породы [3]. Среди нормированных на ПААС [6] содержаний малых элементов (рис. 3) обращают на себя внимание следующие особенности. Обогащение пелитолитов элементами, характерными для основных магматических пород – Sc, V, Cr, Co, Ni, и дефицит РЗЭ, Th, Sr, Ba и Rb, а также Zr, Hf и Nb, являющимися типичными для кислых и щелочных магматических пород соответственно [10]. Однако по характеру нормированных на хондрит спектров распределения редких земель (рис. 4) нельзя с уверенностью предполагать преобладание в области сноса основных магматических образований. Для них характерны значения отношения (La/Yb)<sub>N</sub> < 4 и пологий общий облик кривых РЗЭ (Gd<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> до 1.5), а для исследуемых аргиллитов эти значения составляют 3.3–8.0 (при среднем 5.5) и 1.2–1.8 (среднее 1.5) соответственно.

**Таблица 2.** Содержания малых элементов (г/т) и некоторых индикаторных соотношений для аргиллитов кодинской свиты

Компонент	Мин.	Ср.	Макс.	ПААС	Хондрит
Rb	17.6	101.4	162.8	160	–
Cs	3.6	6.3	8.5	6	–
Ba	222.8	365.3	632.7	650	–
Sr	66.5	145.0	248.0	200	–
Th	3.9	7.9	11.6	14.6	–
U	2.0	3.1	4.9	3.1	–
Zr	103.3	151.8	196.8	210	–
Hf	3.1	4.3	5.5	5	–
Y	11.3	21.8	29.5	27	–
Nb	7.7	10.7	14.6	19	–
Cr	126.5	235.4	519.7	110	–
Co	18.9	37.7	57.1	23	–
Ni	86.5	219.4	345.7	55	–
V	144.1	219.4	279.9	150	–
Sc	19.0	30.6	41.5	16	–
La	8.25	20.33	31.45	38.20	0.367
Ce	19.45	44.10	68.24	79.60	0.957
Pr	2.60	5.58	8.11	8.83	0.137
Nd	11.17	22.14	30.64	33.90	0.711
Sm	2.64	4.77	6.59	5.55	0.231
Eu	0.76	1.29	1.79	1.08	0.087
Gd	2.65	4.67	6.42	4.66	0.306
Tb	0.38	0.65	0.89	0.77	0.058
Dy	2.42	4.10	5.38	4.68	0.381
Ho	0.51	0.84	1.08	0.99	0.0851
Er	1.53	2.51	3.26	2.85	0.249
Tm	0.22	0.36	0.47	0.41	0.0356
Yb	1.52	2.46	3.12	2.82	0.248
Lu	0.22	0.37	0.48	0.43	0.0381
∑REE	54.3	114.2	165.1	184.8	3.9
Eu/Eu*	0.75	0.82	0.89	0.66	–
∑Ce/∑Y	1.86	2.6	3.66	3.75	–
Zr/Sc	4.19	5.06	7.76	13.13	–
Th/Sc	0.20	0.26	0.32	0.91	–

Примечание. Значения для ПААС и для хондрита приведены в соответствии с [6].



**Рис. 3.** Распределение нормированных на ПААС содержаний малых элементов в кодинских аргиллитах.

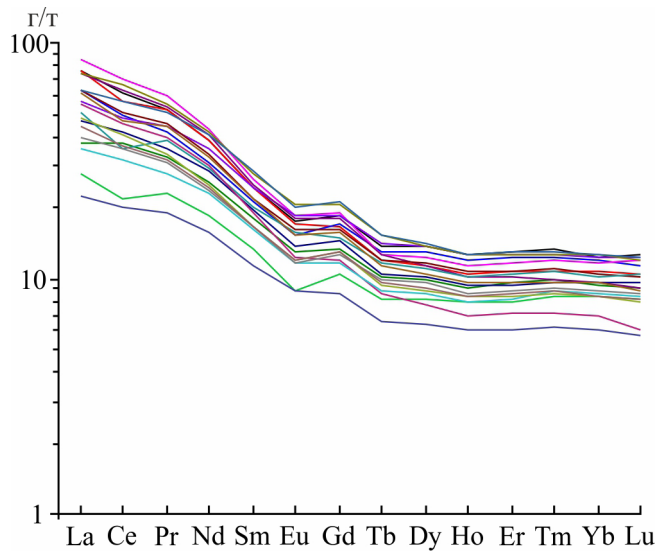


Рис. 4. Вариация состава РЗЭ в пелитолитах кодинской свиты. Содержание нормировано на хондрит.

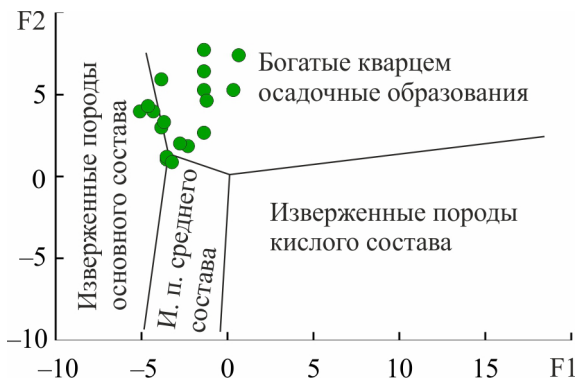


Рис. 5. Положение фигуративных точек составов глинистых пород кодинской свиты на диаграмме F1–F2 [15].

$$F1 = 30.638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \times Fe_2O_{3обн}/Al_2O_3 + 7.329 \times MgO/Al_2O_3 + 12.031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35.402 \times K_2O/Al_2O_3 - 6.382; F2 = 56.5 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \times Fe_2O_{3обн}/Al_2O_3 + 30.875 \times MgO/Al_2O_3 - 5.404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3.89.$$

Несколько дополнить предположения о типе материнских пород позволяет интерпретация данных о петрохимических оксидах. Согласно Я.Э. Юдовичу и М.П. Кетрис [9], повышенное, более 3%, содержание MgO свидетельствует о существенной доле силикатного носителя магния – чаще всего хлорита, но иногда и высокотемпературных Mg-Fe силикатов, то есть служит индикатором основного состава пород, размывавшихся в области сноса. В то же время на диаграмме F1–F2 [15], предназначенной для определения состава пород, размывавшихся на палеоводосборах, фигуративные точки сосредоточены в областях осадков, формирование которых произошло за счет дезинтеграции,

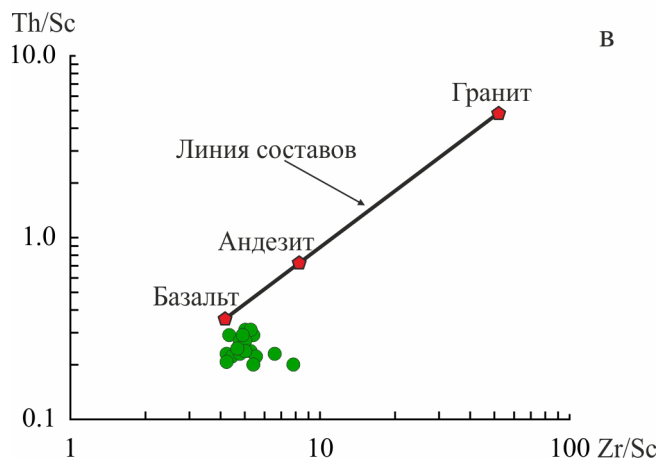
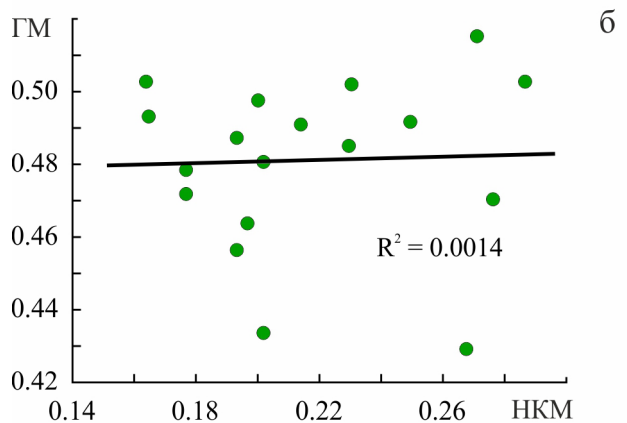
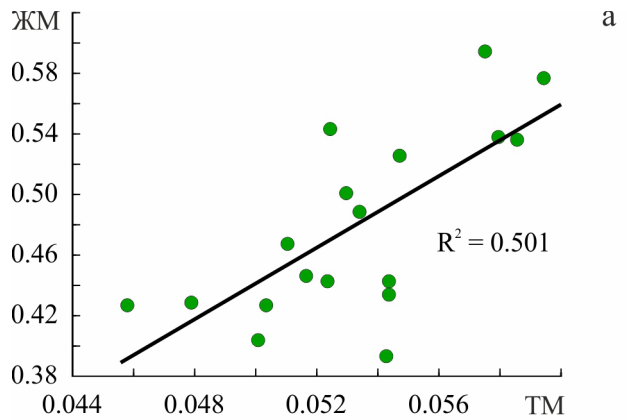


Рис. 6. Модульные диаграммы с нанесенными на них фигуративными точками составов кодинских глинистых пород.

Пояснения см. в тексте.

в том числе пород, обогащенных кремнистым материалом (рис. 5). По другим индикаторным диаграммам точно нельзя сказать, являются ли аргиллиты кодинской свиты петрогенными или литогенными образованиями. Так, на диаграмме ТМ–ЖМ прослеживается отчетливая положительная корреляция титанистости и железистости, но на диаграмме НКМ–ГМ отсутствует корреляция щелоч-

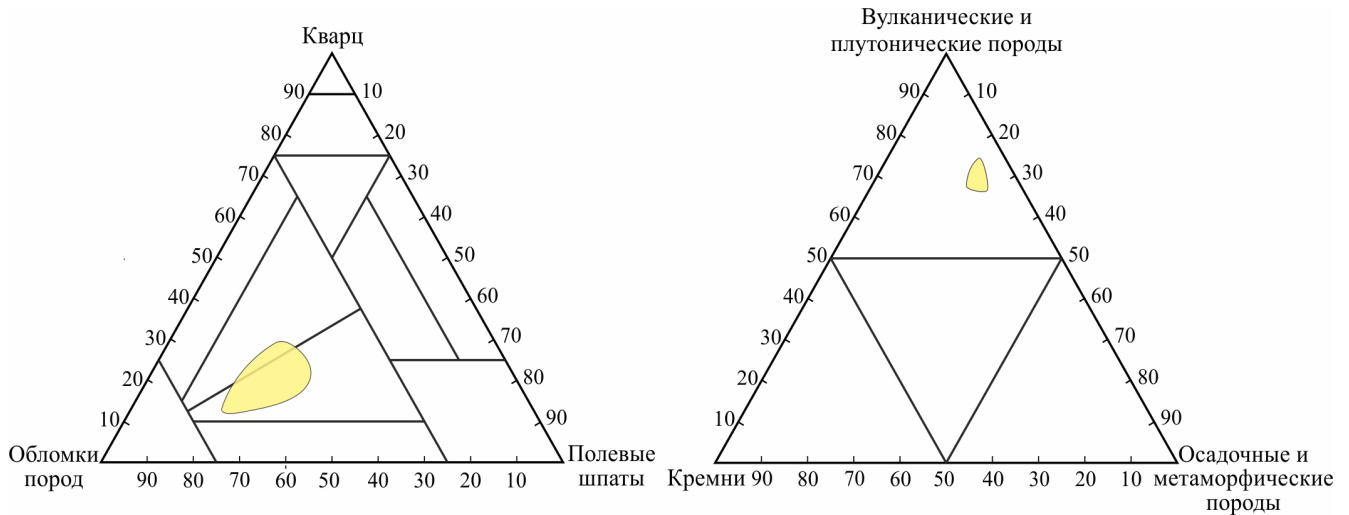


Рис. 7. Диаграммы на основе классификации [5] с нанесенными на них составами кодинских песчаных пород.

ности и гидролизатности (рис. 6а, б). Это является индикатором литогенных отложений [9], так как в петрогенных отложениях сохраняется исходная для магматических пород корреляция модулей ТМ–ЖМ (положительная) и НКМ–ГМ (отрицательная). На переотложенный характер рассматриваемых пород указывает также отклонение фигуративных точек от оси тренда (линии составов магматических пород) к оси абсцисс (рис. 6в) на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc [12]. На палеоводосборах, вероятно, размывались как кремнистые и другие осадочные образования, так и магматические породы основного состава. Таким образом, в отношении кодинской свиты можно предполагать наличие нескольких комплексов пород в области сноса. В целом это не противоречит выводам, сделанным при микроскопических исследованиях песчаников этого разреза, в том числе в работах Л.В. Анфимова и Е.В. Силантьева [2], А.Л. Анфимова и Б.И. Чувашова [1].

Песчаники кодинской свиты по петрографическому составу относятся к типу петрокластических кварцу-полевошпатовых граувяков, единичные образцы – к полевошпат-кварцевым граувякам (рис. 7). Содержание кварца составляет порядка 13–29%, полевых шпатов (преимущественно средних и кислых плагиоклазов) – от 19 до 35%, обломков пород – до 67%. Среди последних преобладают магматические породы: эффузивы кислого, основного/среднего составов, редко присутствуют обломки полнокристаллических пород, например микропегматитов. Также в отдельных шлифах отмечены довольно многочисленные обломки хлоритизированных вулкаников. Содержание обломков осадочных (кроме кремней) и метаморфических пород составляет порядка 20–26%, кремней – не превышает 12% (от общего количества обломков пород). Метаморфические породы представлены кварцитами и микрокварцитами, редко – сланцами слюдисто-глинистого состава.

Обломки осадочных пород – тонкоотмученных или алевритистых аргиллитов, алевролитов, песчаников и известняков – единичны.

На диаграммах М. Бхатиа и К. Крука (рис. 8) фигуративные точки аргиллитов кодинской свиты в большинстве случаев попадают в поле энсиматических островных дуг и лишь некоторые тяготеют к полю энсиалических островных дуг, что, однако, несколько не соотносится с перечисленным набором обломков пород и их процентным соотношением. Вполне вероятно, что при накоплении кодинской свиты размывались образования микроконтинента, а не энсиматической вулканической дуги.

Наряду с определением предполагаемого петрофона и геодинамической позиции распознавание климата на палеоводосборах также является важной задачей, для решения которой широко используются следующие соотношения и индексы химического выветривания.

1. CIA (Chemical Index of Alteration), значение которого увеличивается вместе с интенсивностью степени выветривания. Для разграничения обстановок теплого и холодного климата принято считать значение индекса, равное 70 [14, 16]. Индекс рассчитывается по молекулярным количествам петрогенных окислов,  $CIA = 100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ .

2. CIW (Chemical Index of Weathering) =  $100 \times Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$ . Для слабо измененных пород значения индекса составляют от 76 до 59, а в корях выветривания достигают 94–98 [13]. Расчет, как и в случае с CIA, производится с использованием молекулярных количеств.

3. Соотношение  $\sum Ce / \sum Y$ , где  $\sum Ce = (La-Eu)$ ,  $\sum Y = (Gd-Lu, Y)$ , использование которого в качестве индикатора климата описано, например, в [8]. Значения менее 2.5 характеризуют аридный тип климата, более 4 – гумидный.

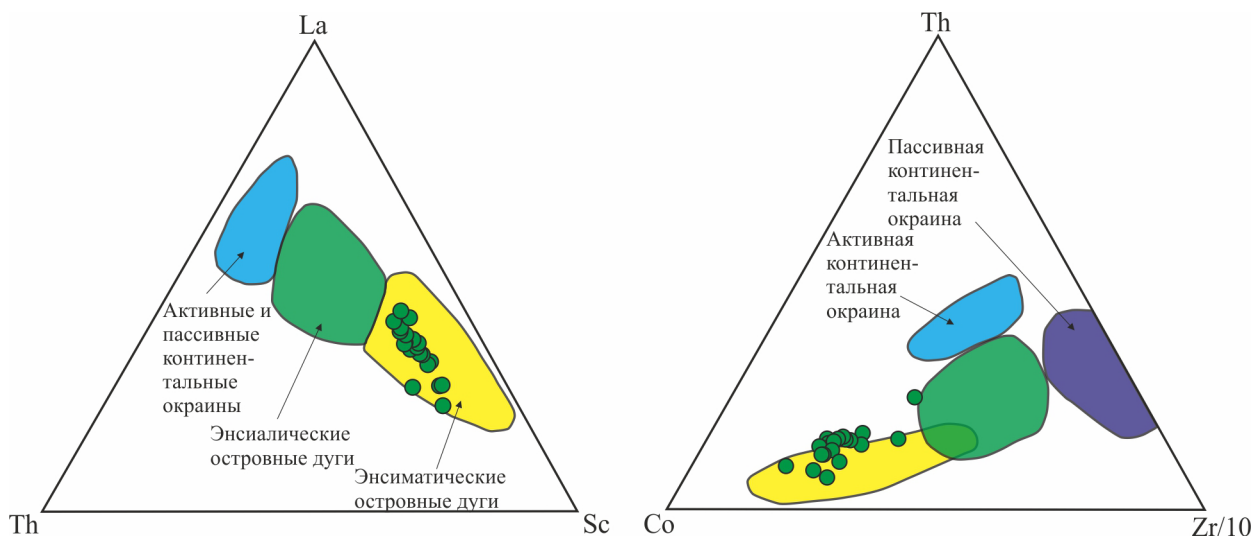


Рис. 8. Положение фигуративных точек составов кодинских аргиллитов на ряде дискриминационных диаграмм, применяемых для геодинамической аттестации [11].

Величина индекса CIA для глинистых пород кодинской свиты изменяется в пределах от 62 до 77, что свидетельствует о переходном, близком к гумидному, типе климата в пределах питающей провинции. Соотношение  $\sum Ce / \sum Y$  имеет следующие характеристики: минимальное значение равняется 1.86, максимальное – 3.66, что при среднем порядке 2.6 также позволяет предполагать размыв материнских пород в условиях переходного климата, но более близкого к ариднему. Однако интерпретация значений индекса CIW несколько противоречит этим предположениям. Индекс CIW изменяется в пределах от 73 до 83, что указывает на слабую и среднюю интенсивность выветривания. Такая ситуация может быть объяснена тем, что кодинская свита характеризуется большой мощностью (более 1000 м), сформированной в течение позднего франа, что свидетельствует о лавинных темпах седиментации. По самым скромным подсчетам, без применения коэффициентов уплотнения глин и песчаников, можно говорить о скоростях осадконакопления более 300 мм/тыс. лет. Можно предположить, что на палеоводосборах происходил интенсивный размыв, препятствующий значительному выветриванию материнских пород.

Таким образом, для кодинской свиты в области сноса можно предполагать наличие нескольких комплексов интенсивно размывающихся пород – метаморфических (кварцитов и слюдистоглинистых сланцев), вулканитов кислого и основного/среднего составов. Вероятно, питающая провинция находилась в пределах микроконтинента. Размыв происходил в условиях переходного (семиаридного/семигумидного) климата. В результате дезинтеграции материнских пород отлагались петрокластические полевошпат-кварцевые и кварцполевошпатовые граувакки, а также пелитолиты,

в составе которых основными породообразующими минералами являются гидрослюды и хлориты, в меньшей степени монтмориллониты. Глинистые породы относятся к хемотипу псевдосиаллитов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-18-5-36).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов А.Л., Чувашов Б.И. Литолого-стратиграфическая и биофациальная характеристика верхнедевонских карбонатных и терригенных пород р. Исеть (разрез “Кодинка”) // Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 3–9.
2. Анфимов Л.В., Силантьев Е.В. Петрография франских терригенных образований Урала // Литология главнейших типов осадочных пород франского яруса Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1975. С. 4–35.
3. Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 289 с.
4. Наседкина В.А., Зенкова Г.Г. Биостратиграфия верхнего девона на восточном склоне Среднего и Северного Урала // Проблемы стратиграфии и палеонтологии Урала. Екатеринбург, 1999. С. 50–74.
5. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов / В.Н. Шванов, В.Т. Фролов, Э.И. Сергеева и др. СПб.: Недра, 1998. 352с.
6. Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
7. Чувашов Б.И., Анфимов А.Л. Карбонатно-терригенные отложения разреза “Кодинка – Щербаково” – опорный разрез верхнего девона бассейна р. Исеть (восточный склон Среднего Урала) // Ежегодник-2007. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 88–97.
8. Шатров В.А., Войцеховский Г.В. Применение лантаноидов для реконструкций обстановок осадко-

- бразования в фанерозое и протерозое (на примере разреза чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы) // Геохимия. 2009. № 8. С. 805–824.
9. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
  10. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
  11. Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. V. 92. P. 181–193.
  12. Critelli S., Mongelli G., Perri F., Martin-Algarra A., Martin-Martin M., Perrone V., Dominici R., Sonnino M., Zaghoul M.N. Compositional and Geochemical Signatures for the Sedimentary Evolution of the Middle Triassic-Lower Jurassic Continental Redbeds from Western-central Mediterranean Alpine Chains // J. Geol. 2008. V. 116. P. 375–386.
  13. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering // Sedimentary Geology. 1988. V. 55. P. 319–322.
  14. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nat. 1982. V. 299. P. 715–717.
  15. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // Chem. Geol. 1988. V. 67. P. 119–139.
  16. Visser J.N.J., Young G.M. Major element geochemistry and Paleoclimatology of the PermoCarboniferous glaciogene Dwyka Formation and postglacial mudrocks in Southern Africa // Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeocol. 1990. V. 81. P. 49–57.