

## Геодинамические и палеогеографические особенности формирования метатерригенных отложений в основании палеозойского разреза хребта Малдынырд (Приполярный Урал)

©2024 Н. Ю. Никулова✉, О. В. Гракова, Ю. С. Симакова

*Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,  
Первомайская, 54, 167982, Сыктывкар, Российская Федерация*

### Аннотация

**Введение:** В статье представлены результаты изучения метатерригенных отложений в основании палеозойского разреза хребта Малдынырд (Приполярный Урал). Целью работ было выявление изменений вещественного состава нижнепалеозойских отложений снизу вверх по разрезу, уточнение геодинамических, климатических условий осадконакопления, а также источников питания на основе интерпретации геохимических анализов. Были изучены особенности распределения петрогенных, редкоземельных и редких элементов в различных литологических типах горных пород в зоне контакта фундамент/чехол. Интерес к этим исследованиям, вызван, в том числе тем, что с контактом рифей-вендских и палеозойских отложений на исследуемой территории связаны открытые в конце XX века рудопроявления золота.

**Методика:** Содержания порообразующих оксидов в породах определялись весовым химическим методом, определение содержаний редких и редкоземельных элементов проводилось на масс-спектрометре с индуктивной связной плазмой Agilent 7700х, фазовый состав пород определен на рентгеновском дифрактометре Naoya DX-2700BH.

**Результаты и обсуждение:** Геохимическая характеристика отложений различных генетических типов в зоне контакта фундамент/чехол из центральной части хребта Малдынырд (Приполярный Урал) показала, что максимальные содержания РЗЭ отмечаются в диаспорсодержащих пироксилит-мусковитовых сланцах, минимальные – в метагравелитах обейской свиты. Значения CIA, CIW и ICSV указывают на связь пироксилит-мусковитовых сланцев с корой выветривания. Положение фигуративных точек на диаграмме ICSV–CIA свидетельствует о присутствии в составе обейских метагравелитов средне выветрелых магматических образований кислого и основного составов. На диаграммах реконструкции палеогеодинамических обстановок фигуративные точки составов всех метатерригенных образований расположились в полях пассивной континентальной окраины.

**Выводы:** Проведенные исследования показали, что субстратом для образования залегающих в основании палеозойского разреза пироксилит-мусковитовых сланцев была кора выветривания по кислым вулканитам верхней подсвиты саблгорской свиты. Диаспор-содержащие мусковит-пироксилитовые сланцы сохранили и сконцентрировали геохимические особенности подстилающих кислых вулканитов. Аляксовожские породы часто содержат переотложенный слюдястый материал подстилающей метаморфизованной коры выветривания и в разной степени измененные обломки собственно кислых вулканитов. В отложениях обейской свиты в составе продуктов разрушения присутствуют магматические породы кислого и основного состава.

**Ключевые слова:** кора выветривания, геохимическая характеристика, палеозойские отложения, условия осадконакопления, Приполярный Урал.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Никулова Наталия Юрьевна, e-mail: [Nikulova@geo.komisc.ru](mailto:Nikulova@geo.komisc.ru)

*Источник финансирования:* Работа выполнена в рамках тем государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

*Для цитирования:* Никулова Н. Ю., Гракова О. В., Симакова Ю. С. Геодинамические и палеогеографические особенности формирования метатерригенных отложений в основании палеозойского разреза хребта Малдынырд (Приполярный Урал) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 1. С. 49–65. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/49-65>

### Введение

С зоной контакта рифей-вендских и палеозойских отложений на Приполярном Урале связаны открытые в 80-х годах XX века в терригенной нижнепалеозойской алькесвожской толще и кислых вулканитах верхнерифейской саблегорской свиты рудопоявления золота [1–4]. Последующие геологоразведочные и научно-исследовательские работы были посвящены преимущественно изучению оруденения и интерпретациям его происхождения [5–9]. В работах Л. И. Ефановой, на основе фактического материала, полученного в результате многолетних поисковых работ ООО «Полярноуралгеология» и ЗАО «Голдминералс», дана подробная характеристика петрографического и минерального состава алькесвожской толщи, установлена ее приуроченность к депрессиям рельефа фундамента [5 и др.]. Описание строения зоны контакта уралид/доуралид на руч. Алькесвож было предпринято Я. Э. Юдовичем и М. П. Кетрис на основе разработанного ими метода литохимии [10]. Изучению минералогических и геохимических свойств метагидролизатов Приполярного Урала посвящена работа И. В. Козыревой и соавторов [7]. Проведенное нами U/Pb-датирование детритовых цирконов из метапесчаников алькесвожской толщи позволило считать временем начала формирования толщи поздний кембрий-ранний ордовик, а изучение состава микропримесей, особенностей морфологии и внутреннего строения, установить принадлежность большинства цирконов к первично-магматическим зернам первого цикла выветривания [11, 12].

Вместе с тем, в перечисленных работах не удалось выявить признаки, позволяющие разделять сходные по гранулометрическим и петрографическим характеристикам метатерригенные образования различных стратиграфических уровней из-за недостатка геохимических исследований. Это в значительной мере затруднило восстановление геодинамических и палеогеографических обстановок осадконакопления и их смену во времени. Поэтому целью настоящей работы было выявление изменений вещественного состава нижнепалеозойских отложений снизу вверх по разрезу, уточнение геодинамических, климатических условий осадконакопления, а также источников питания на основе интерпретации геохимических анализов.

### Материалы и методы

Для достижения поставленной цели изучены особенности поведения петрогенных, редкоземельных и редких элементов в двух разрезах в центральной

части на хребте Малдынырд: на участке «Трубка Неудачная» и в полутора километрах севернее по простиранию – в каньоне ручья Алькесвож. Выбор участков обусловлен тем, что здесь в небольших по мощности разрезах можно проследить переход от рифейских кислых вулканитов к метаморфизованным образованиям коры выветривания, сменяющимся слюдистыми алькесвожскими метагравелитами и метапесчаниками, которые, в свою очередь перекрываются гравелитами, песчаниками и конгломератами обейской свиты. Для корректного сравнения были использованы образцы мелкогравийных гравелитов обейской свиты, по гранулометрическим характеристикам аналогичные алькесвожским.

Петрографический состав пород изучался в прозрачных шлифах. Содержания породообразующих оксидов в породах определялись традиционным весовым химическим методом в лаборатории химии минерального сырья, работающей в рамках метрологических норм (Заключение № 774).

Определение содержаний редких и редкоземельных элементов проводилось на масс-спектрометре с индуктивной связанной плазмой Agilent 7700x. Для перевода пробы в раствор использовался метод многокислотного разложения (смесь кислот в соотношении  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HCl} = 1:5:2$ ) в условиях микроволнового нагрева. Разложение велось в микроволновой системе пробоподготовки Sineo MDS-10.

Фазовый состав пород определен при помощи дифрактометрического анализа неориентированных и ориентированных препаратов на рентгеновском дифрактометре Наоуан DX-2700BH, излучение  $\text{CuK}\alpha$ , 40kV, 30mA, интервал сканирования 2-70 $\theta$ , шаг сканирования 2 $\theta$  – 0.05, скорость съемки –1 о/мин. Полуколичественный рентгендифракционный анализ образцов выполнен с помощью программы Profex.

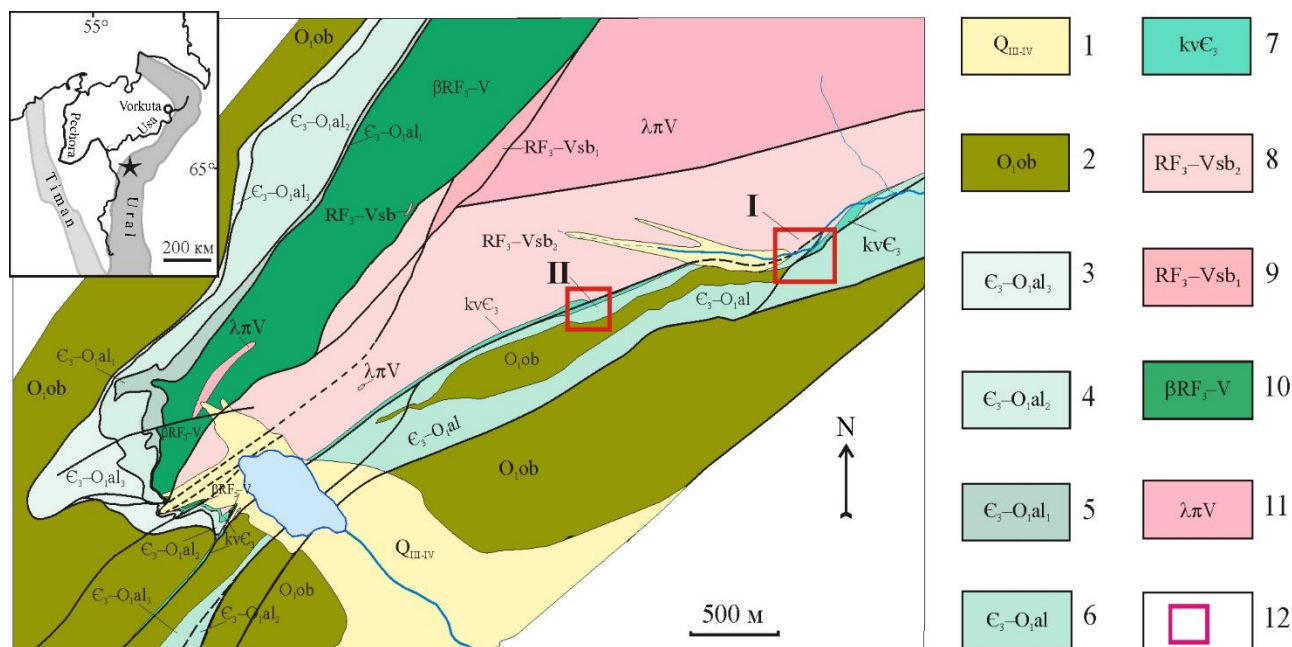
Все аналитические работы проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Для интерпретации результатов использованы индикаторные модули и диаграммы, применяемые для терригенных пород, на которые были нанесены также точки подстилающих образований фундамента – кислых вулканитов саблегорской свиты.

### Геологическое положение и литологическая характеристика

В центральной части хребта Малдынырд фундамент представлен вулканитами саблегорской (RF<sub>3</sub>–V1sb) свиты, прорванными основными интрузиями

манарагского ( $\beta RF_3-V$ ) комплекса и субинтрузивными телами риолитов малдинского комплекса ( $\lambda \pi V$ ) (рис. 1). В основании разреза уралид в пределах палеодепрессий фундамента фрагментарно распространены образования метаморфизованной кембрийской коры выветривания ( $kvE_3$ ) – слюдистые сланцы, содержащие переменные количества диаспора, хлоритоида и гематита, на которых залегают метагравелиты

и метапесчаники алькесвожской толщи ( $E_3-O_{1al}$ ). В контурах крупных палеодепрессий на алькесвожских породах в основании obeizской свиты может располагаться горизонт вишневых кварцитопесчаников. В случае отсутствия этого горизонта obeizские метагравелиты и метаконгломераты залегают на породах алькесвожской толщи или рифейско-вендского фундамента.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта южной части хр. Малдынырд (по: Ефанова и др., 2005 г.): 1 – современные делювиально-солифлюкционные 2 – раннеордовикские obeizской свиты: конгломераты, гравелиты, песчаники, кварцитопесчаники; 3–6 – позднекембрийско-раннеордовикские алькесвожской толщи; 3 – верхнего горизонта: тонкое переслаивание алевросланцев и песчаников; 4 – среднего горизонта: гравелиты, песчаники, конгломераты; 5 – нижнего горизонта: гравелиты, песчаники, конгломераты, сланцы; 6 – нерасчлененные: песчаники, гравелиты; 7 – кембрийские метаморфизованные КВ: сланцы; 8–11 – позднерифейско-вендские метаморфизованные вулканогенные породы саблегорской свиты; 8 – риолиты, лавобрекчии, кластолавы; 9 – метабазиты и метаандезиты; 10 – метадолериты, метагаббро, манарагский комплекс; 11 – риолиты, риолитовые порфиры, малдинский комплекс; 12 – участки: I – Алькесвож, II – Трубка Неудачная.

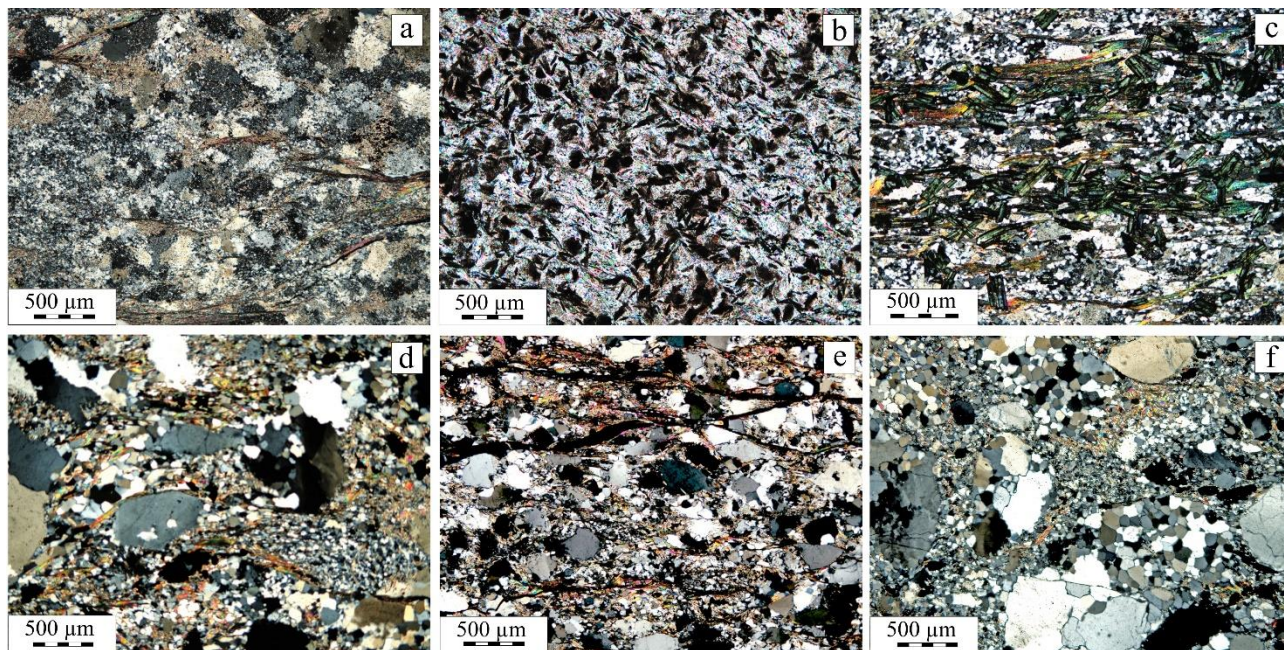
[Fig. 1. Schematic geological map of the southern part of the range Maldynyrd (after: Efanova et al., 2005): (1) – modern colluvial-solifluction deposits; (2) – Early Ordovician deposits of the Obeizskaya Formation: conglomerates, gravelites, sandstones, quartzite sandstones; (3–7) – Late Cambrian-Early Ordovician deposits of the Alkesvozhszkaya sequence; (3) – upper horizon: thin interlayering of silty shales and sandstones; (4) – middle horizon: gravelstones, sandstones, conglomerates; (5) – lower horizon: gravelstones, sandstones, conglomerates, shales; (6) – undivided sediments: sandstones, gravelites; (7) – Cambrian metamorphosed weathering crusts: shales; (8–11) – Late Riphean-Vendian metamorphosed volcanogenic rocks of the Sablegorskaya Formation; (8) – rhyolites, lava breccias, clastolavas; (9) – metabasites and metaandesites; (10) – metadolerites, metagabbro, Manaragskiy complex; (11) – rhyolites, rhyolite porphyries, Maldinskiy complex; (12) – sections: I – Alkesvozh, II – Pipe Neudachnaya.]

Для выполняющих депрессии допалеозойского рельефа континентальных образований алькесвожской толщи характерна быстрая смена, как по вертикали, так и по латерали. Породы различаются по гранулометрическим, структурно-текстурным характеристикам и содержанию отдельных минералов (слюд, гематита, и хлоритоида и др.), а в качестве важного диагностического признака принято частое присутствие в цементе обломочных пород и пироксилита [5]. В зависимости от размера и состава обломочной части, количества и состава цемента, в алькесвожской толще выделяют множество типов гравелитов, песчаников, алевролитов, сланцев, а также их многочисленные

переходные разновидности.

На основании полевого описания и петрографического изучения выделено семь основных литологических типов горных пород, внутри каждого из которых количественное соотношение минералов может варьировать: рассланцованные кислые вулканыты, пироксилит-мусковитовые сланцы с диаспором, кварц-пироксилит-мусковитовые сланцы с хлоритоидом, слюдистые метагравелиты алькесвожской толщи, метапесчаники алькесвожской толщи, метагравелиты obeizской свиты, метагравелиты с гематитовым цементом (рис. 2).





**Рис. 2.** Микрофотографии шлифов: *a* – кислые вулканиды (обр. 522); *b* – пиррофиллит-мусковитовый сланец с диаспором (обр. 517); *c* – пиррофиллит-мусковит-кварцевый сланец с хлоритоидом (обр. 516); *d* – слюдяной метагравелит, алькесвожская толща (обр. 517r); *e* – метапесчаник, алькесвожская толща (обр. 215); *f* – метагравелит, обейзкая свита (обр. 510a).

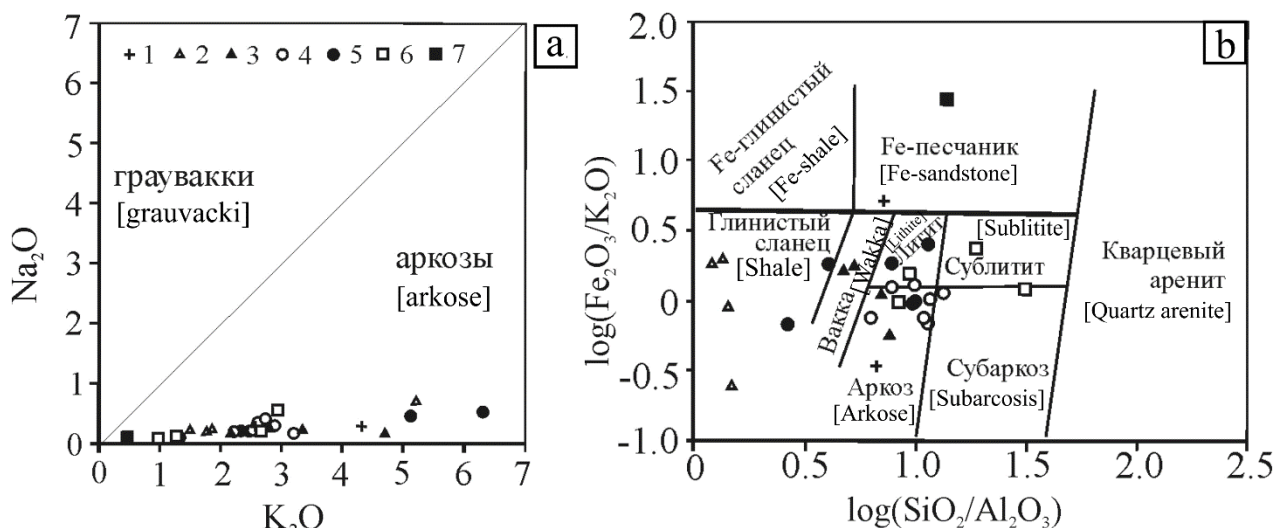
[Fig. 2. Microphotographs of thin sections: (a) – acidic volcanics (sample 522); (b) – pyrophyllite-muscovite schist with diaspore (sample 517); (c) – pyrophyllite-muscovite-quartz schist with chloritoid (sample 516); (d) – micaceous metagraywacke, Alkesvozh sequence (sample 517r); (e) – metasandstone, Alkesvozh sequence (sample 215); (f) – metagraywacke, Obeiz Formation (sample 510a).]

### Геохимическая характеристика

Содержания породообразующих оксидов, литохимические модули и индикаторные соотношения, использованные для характеристики отложений и реконструкции условий их образования, приведены в табл. 1.

Изученные породы характеризуются низким содержанием щелочей и на диаграмме  $K_2O-Na_2O$  [13] все фигуративные точки расположены в поле аркозов – отложений, в формировании которых принимали участие

кислые магматические породы (рис. 3 а). На диаграмме  $\log(Fe_2O_{3общ}/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$  [14] точки кислых вулканидов попали в поле аркозов и железистых песчаников (рис. 3 б). Точки содержащих диаспоросодержащих пиррофиллит-мусковитовых сланцев и две точки слюдяных метагравелитов алькесвожской толщи попали в поле глинистых сланцев, пиррофиллит-мусковит-кварцевых сланцев – поле вакков, точки метапесчаников и метагравелитов – в поля аркозов, лититов и сублититов.



**Рис. 3.** Положение фигуративных точек составов пород на классификационных диаграммах: *a* –  $K_2O-Na_2O$  [13]; *b* –  $\log(Fe_2O_{3общ}/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$  [14]. Условные обозначения: 1 – верхнерифейско-венские кислые вулканиды; 2 – пиррофиллит-мусковитовые сланцы с диаспором; 3 – пиррофиллит-мусковит-кварцевые сланцы с хлоритоидом; 4–6 алькесвожская толща: 4 – гравелиты; 5 – песчаники; 6 – обейзкая свита, песчаники; 7 – гравелит с гематитовым цементом.

Табл. 1. Содержание породообразующих оксидов (мас. %), индикаторные соотношения, коэффициенты и модули  
[Table 1. Content of rock-forming oxides (wt.%), indicator ratios, coefficients and modules]

№ обр. [Sample №]	I					II					II					IV					V					VI					VII
	504	522	515	517	5176	517b	512	518	205	516	517r	505	202	506	519	519a	516a	520	509	508	215	216	217	507	510	510a	511	5186			
SiO <sub>2</sub>	78.96	71.00	46.95	48.97	50.81	47.76	66.66	81.47	76.97	75.58	84.76	62.08	60.58	75.52	83.28	83.86	79.58	81.54	83.88	74.68	84.07	82.55	83.27	79.84	85.99	80.36	91.83	76.18			
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.20	0.69	0.61	0.59	0.51	1.40	0.99	0.94	0.22	0.60	1.05	1.84	1.30	0.65	0.68	0.72	0.77	0.46	0.67	0.43	0.41	0.59	0.60	1.03	1.43	0.59	0.14			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.92	9.86	38.31	36.13	33.79	33.72	14.14	10.57	11	14.12	7.56	15.47	22.37	9.72	8.57	8.63	10.3	8.42	7.69	11.89	7.2	7.34	6.15	9.36	4.64	8.64	2.91	5.53			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.51	14.02	2.75	3.54	0.46	4.89	8.02	1.7	3.87	4.13	3.48	9.59	4.27	6	2.37	2.37	3.67	3.45	2	3.3	2.59	2.02	2.64	2.94	3.21	4.31	1.23	14.31			
FeO	0.36	0.72	0.97	0.57	3.64	0.24	0.53	0.65	0.45	0.77	0.66	0.59	0.48	0.48	0.43	0.52	0.41	0.8	0.8	0.55	0.67	0.72	0.42	0.69	0.75	0.53	0.49	0.86			
MnO	0.018	0.012	0.03	0.029	0.009	0.009	0.016	0.004	0.009	0.085	0	0.061	0.01	0.05	0.009	0.01	0.09	0.038	0.061	0.085	0.019	0.034	0.11	0.072	0.034	0.009	0.02	0.002			
MgO	0.4	0.49	0.09	0.4	0.49	0.09	0.97	0.4	0.4	0.12	0.49	1.03	0.2	0.63	0.4	0.16	0.08	0.53	0.54	1.34	0.55	0.54	0.4	1.07	0.06	0.25	0.2	0.4			
CaO	0.45	0.33	0.52	0.11	0.55	0.3	0.34	0.4	0.11	0.34	0.33	1.14	0.3	0.57	0.22	0.22	0.23	0.33	0.57	0.57	0.1	0.22	1.12	0.44	1.33	0.34	0.2	0.44			
Na <sub>2</sub> O	0.27	0.24	0.22	0.2	0.22	0.71	0.22	0.31	0.26	0.22	0.13	0.44	0.54	0.19	0.22	0.22	0.28	0.23	0.37	0.31	0.22	0.39	0.2	0.55	0.12	0.2	0.05	0.11			
K <sub>2</sub> O	4.33	2.6	1.5	1.8	1.86	5.23	4.72	2.85	3.36	2.17	1.31	5.14	6.3	3.21	2.5	2.34	2.88	2.53	2.59	4.27	2.5	2.75	2.26	2.93	1.31	2.69	0.98	0.49			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.08	0.05	0.07	0.08	0.05	0.08	0.06	0.08	0.09	0.07	0.06	0.08	0.08	0.04	0.02	0.11	0.13	0.046	0.10	0.03	0.05	0.05	0.07	0.7	0.02	0.02	0.2			
mm	1.86	1.34	7.04	6.95	6.59	5.3	2.57	1.67	1.63	2.24	1.35	2.42	3.33	1.53	1.27	1.26	1.43	1.45	1.23	2.42	1.21	1.4	2.59	1.82	0.88	1.8	0.53	0.6			
Cynna [Total]	100.3	100.9	99.12	99.38	99.09	98.81	99.67	101.07	99.08	100.1	100.74	100.30	99.28	99.28	99.96	100.3	99.78	99.07	100.24	100.18	99.59	98.42	99.80	100	100.1	100.6	99.05	99.26			
log(Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O)	-1.21	-1.03	-0.83	-0.95	-0.93	-0.87	-1.33	-0.96	-1.11	-0.99	-1.00	-1.07	-1.07	-1.23	-1.06	-1.03	-1.01	-1.04	-0.85	-1.14	-1.06	-0.85	-1.05	-0.73	-1.04	-1.13	-1.29	-0.65			
log(SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.82	0.86	0.09	0.13	0.18	0.15	0.67	0.89	0.84	0.73	1.05	0.60	0.43	0.89	0.99	0.99	0.89	0.99	1.04	0.80	1.07	1.05	1.13	0.93	1.27	0.97	1.50	1.14			
log(Fe <sub>2</sub> O <sub>3(обн)</sub> /K <sub>2</sub> O)	-0.46	0.73	0.26	0.29	-0.61	-0.03	0.23	-0.22	0.06	0.28	0.42	0.27	-0.17	0.27	0.02	0.01	0.11	0.13	-0.11	-0.11	0.02	-0.13	0.07	0.00	0.39	0.20	0.10	1.47			
A	0.15	0.14	0.82	0.74	0.67	0.71	0.21	0.13	0.14	0.19	0.09	0.25	0.37	0.13	0.10	0.10	0.13	0.10	0.09	0.16	0.09	0.09	0.07	0.12	0.05	0.11	0.03	0.07			
F	2.52	15.44	4.53	5.15	5.19	5.74	10.94	3.74	5.67	5.33	5.23	12.32	6.80	8.46	3.86	3.74	4.97	5.59	3.86	5.95	4.26	3.72	4.16	5.37	5.08	6.53	2.53	15.71			
M	5.05	3.17	2.24	2.11	2.63	6.24	5.28	3.56	3.73	2.73	1.77	6.72	7.14	3.97	2.94	2.78	3.39	3.09	3.53	5.15	2.82	3.36	3.58	3.92	2.76	3.23	1.23	1.04			
TM	0.18	0.35	0.91	0.83	0.76	0.82	0.36	0.17	0.15	0.26	0.15	0.43	0.48	0.23	0.14	0.15	0.19	0.17	0.13	0.22	0.13	0.12	0.12	0.17	0.11	0.19	0.06	0.27			
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	4.60	2.84	1.72	2.00	2.08	5.94	4.94	3.16	2.56	2.39	1.44	5.58	6.84	3.40	2.72	2.56	3.16	2.76	2.96	4.58	3.14	2.46	2.46	3.48	1.43	2.89	1.03	0.60			
HKM	0.39	0.29	0.04	0.06	0.06	0.18	0.35	0.30	0.30	0.17	0.19	0.36	0.31	0.35	0.32	0.30	0.31	0.33	0.38	0.39	0.43	0.40	0.40	0.37	0.31	0.33	0.35	0.11			
TM	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.10	0.09	0.08	0.02	0.08	0.07	0.08	0.13	0.08	0.08	0.07	0.09	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.06	0.22	0.17	0.20	0.03			
F1	-3.27	-5.82	-2.19	-2.45	-0.77	-2.55	-5.18	-3.86	-4.17	-3.52	-4.21	-4.13	-5.04	-4.21	-5.05	-4.10	-4.05	-3.70	-3.67	-3.52	-4.05	-3.56	-4.28	-3.60	0.26	-5.37	-4.42	-5.13			
F2	-4.66	-4.10	-0.80	-0.24	-3.44	-5.90	-1.96	-1.20	-0.97	-2.09	0.10	0.31	-3.93	-4.35	-0.02	-0.90	-1.05	-0.33	-1.64	-1.83	-1.26	-0.93	-1.28	-0.77	5.58	-0.10	1.47	0.08			
F3	7.59	4.23	-4.36	-3.95	-3.71	-0.15	9.16	6.66	7.60	-0.21	10.43	2.87	8.29	6.46	10.12	6.92	6.04	7.85	8.47	9.20	8.67	9.77	6.07	8.21	10.82	10.20	12.46	-1.70			
F4	2.15	1.59	-2.40	-2.07	-1.88	-1.34	7.45	5.41	5.33	-1.12	7.45	4.43	5.54	4.03	9.23	4.94	3.26	6.41	5.14	6.62	5.54	5.41	4.01	6.42	12.05	9.69	13.34	0.65			
CIA	67	72	93	94	91	82	70	71	72	81	56	77	65	73	67	71	72	69	63	66	69	65	72	66	53	69	66	79			
ICV	0.7	1.5	0.2	0.2	0.2	0.3	1.1	0.7	0.8	0.5	1.4	0.9	1.2	0.6	1.2	0.8	0.7	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	0.7	1.1	1.6	1.1	1.2	2.1			
CIW	90	91	97	99	96	95	94	90	95	94	72	90	85	94	88	92	92	90	82	88	93	88	92	85	64	90	87	85			
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	16.0	10.8	6.8	9.0	8.5	7.4	21.5	9.2	12.9	9.9	11.3	10.1	11.7	11.7	16.9	11.4	10.3	11.0	7.0	13.8	11.4	7.1	10.6	5.3	10.9	13.5	19.6	4.5			
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.6	7.2	1.2	1.4	1.5	1.4	4.7	7.7	7.0	5.4	13.5	11.2	4.0	2.7	7.8	9.7	7.7	9.7	10.9	6.3	11.7	11.2	9.7	8.5	18.5	9.3	31.6	13.8			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.2	0.1	0.8	0.7	0.7	0.7	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1			
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1			

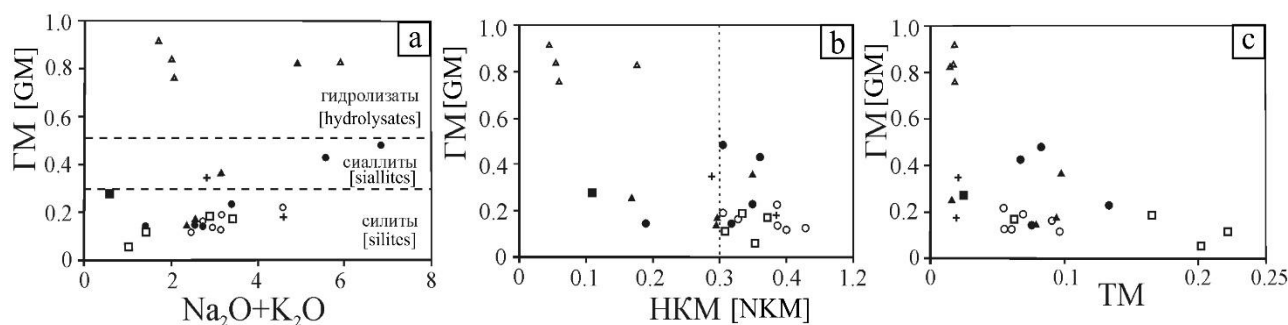
Примечание: I – кислые вулканы; II – мусковит-пиррофиллитовые сланцы с диапором; III – мусковит-кварцевые сланцы с хлоритом; IV – гравелиты, алькесовская толща; V – песчанник, алькесовская толща; VI – гравелит, обесизская свита; VII – гравелит с тематитовым цементом. 2) A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>; F=TiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO+MnO+MgO; M=CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; F1=0.303–0.447SiO<sub>2</sub>–0.972TiO<sub>2</sub>+0.008Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0.267Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.208 FeO+0.082MnO+0.14MgO+0.195CaO–0.719Na<sub>2</sub>O–0.032K<sub>2</sub>O+7.5IP<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F2=43.57–0.421SiO<sub>2</sub>+1.988TiO<sub>2</sub>–0.526Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–0.551Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–1.61FeO+2.72MnO+0.881MgO–0.907CaO–0.177Na<sub>2</sub>O–1.84K<sub>2</sub>O+7.244P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [28]; F3=30.638TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–12.54Fe<sub>2</sub>O<sub>3(обн)</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+7.329MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+35.402K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–6.382; F4=56.5TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–10.897Fe<sub>2</sub>O<sub>3(обн)</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+30.875MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–5.404Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+11.112K<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–3.89; TM=(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO+MnO)/SiO<sub>2</sub>; HKM=(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; CIA=100Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), ICV=(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO+MgO)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; CIW=100Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O).

**Fig. 3.** Position of figurative points of rock compositions on classification diagrams: (a) –  $K_2O-N_2O$  [13]; (b) –  $\log(Fe_2O_{3tot}/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$  [14]. Legend: (1) – Upper Riphean-Vendian acidic volcanics; (2) – pyrophyllite-muscovite schists with diaspore; (3) – pyrophyllite-muscovite-quartz schists with chloritoid; (4–6) Alkesvozhskaya sequence: (4) – gravelites; (5) – sandstones; (6) – Obeizskaya formation, sandstones; (7) – gravelite with hematite cement.]

[Notes Table 1.: 1) I – acidic volcanics; II – muscovite-pyrophyllite shales with diaspore; III – muscovite-quartz schists with chloritoid; IV – gravelites, Alkesvozhskaya sequence; V – sandstone, Alkesvozhskaya sequence; VI – gravelite, Obeizskaya formation; VII – gravelite with hematite cement. 2)  $A=Al_2O_3/SiO_2$ ;  $F=TiO_2+Fe_2O_3+FeO+MnO+MgO$ ;  $M=CaO+Na_2O+K_2O$ .  $F1=0.303-0.447SiO_2-0.972TiO_2+0.008Al_2O_3-0.267Fe_2O_3+0.208FeO+0.082MnO+0.14MgO+0.195CaO+0.719Na_2O-0.032K_2O+7.51P_2O_5$ ;  $F2=43.57-0.421SiO_2+1.988TiO_2-0.526Al_2O_3-0.551Fe_2O_3-1.61FeO+2.72MnO+0.881MgO-0.907CaO-0.177Na_2O-1.84K_2O+7.244P_2O_5$  [28];  $F3=30.638TiO_2/Al_2O_3-12.54Fe_2O_{3tot}/Al_2O_3+7.329MgO/Al_2O_3+12.031NaO/Al_2O_3+35.402K_2O/Al_2O_3-6.382$ ;  $F4=56.5TiO_2/Al_2O_3-10.897Fe_2O_{3tot}/Al_2O_3+30.875MgO/Al_2O_3-5.404Na_2O/Al_2O_3+11.112K_2O/Al_2O_3-3.89$ .  $GM=(Al_2O_3+TiO_2+Fe_2O_3+FeO+MnO)/SiO_2$ ;  $NKM=(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$ ;  $TM=TiO_2/Al_2O_3$ ;  $CIA=100Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)$ ,  $ICV=(Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+Ca_2O+Mg_2O=TiO_2)/Al_2O_3$ ,  $CIW=100Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)$ .]

По значениям гидролизатного модуля (ГМ) большая часть слагающих разрез отложений характеризуется высокой степенью седиментационной зрелости и являются пониженно-гидролизатными аквагенными породами – силитами [10]. К типу гидролизатов относятся сланцы (рис. 4 а). Они отличаются минимальными значениями нормированной щелочности (НКМ). Значительно этого показателя, превышающее 0.3 (рис. 4 б), предполагает,

по данным Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [10], присутствие в породе неизмененного калиевого полевого шпата. Значения титанового модуля (ТМ) для кварцито-песчаников алькесвожской толщи и обейзской свиты соответствуют гипертитанистым породам (рис. 4 с). Повышенная титанистость кварцито-песчаников обейзской свиты может быть обусловлена концентрацией тяжелых титансодержащих минералов в естественном шлихе.



**Рис. 4.** Положение фигуративных точек составов метапесчаников алькесвожской толщи на модульных диаграммах: а –  $(Na_2O+K_2O) - GM$ ; б –  $НКМ - GM$ ; в –  $ТМ - GM$  [10]. Условные обозначения на рис. 3.

**Fig. 4.** Position of figurative points of composition of metasandstones of the Alkesvozh strata on modular diagrams: (a) –  $(Na_2O+K_2O) - GM$ ; (b) –  $NCM - GM$ ; (c) –  $TM - GM$  [10]. Legend in Fig. 3.]

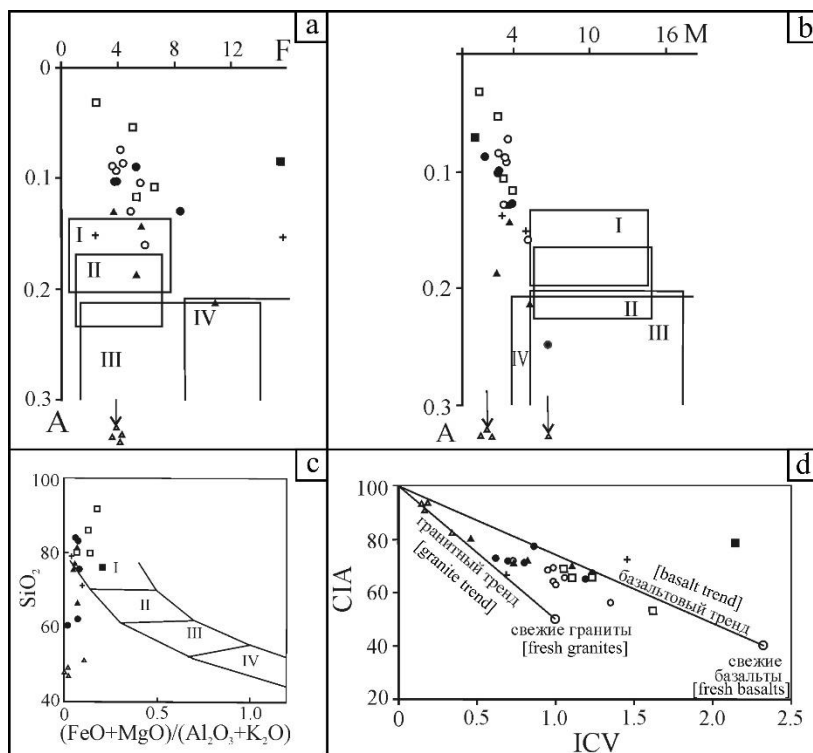
Увеличение зрелости и сортированности материала снизу вверх по разрезу отражает положение точек на диаграммах А–F, А–М [15] и  $(FeO+MgO)/(Al_2O_3+K_2O)-SiO_2$  [16], показывающих степень зрелости обломочных отложений и участие в их составе магматических пород (рис. 5 а–с). На диаграмме  $ICV-CIA$  [17] большинство фигуративных точек метапесчаников и метагравелитов соответствует породам средней степени выветрелости, а наиболее измененный материал содержит слюистые сланцы (рис. 5 д).

Максимальные значения индекса выветривания  $CIW$  [14] имеют диаспорсодержащие пиррофиллит-мусковитовые сланцы (95–99). Минимальное значение (64) этого индекса имеет метагравелит обейзской свиты (обр. 510), содержащий наибольшее количество  $CaO$  (1.33 мас. %). Для большей части изученных образцов индекс выветривания (85–95) соответствует породам, содержащим материал КВ. Индекс изменения состава  $ICV$  [18] варьирует от 0.15–0.34 в слюистых сланцах. Индекс химического выветривания ( $CIA$ ) [19] для большинства образцов, составляющий 65–72 и

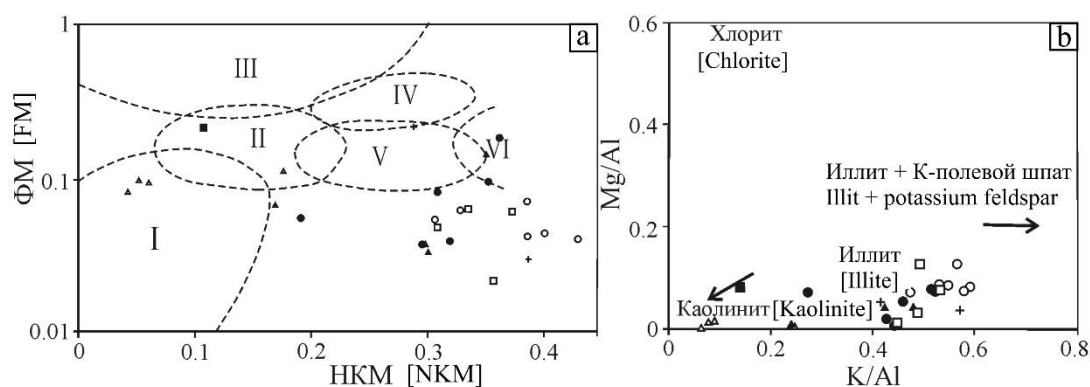
соответствующий средней степени выветрелости, в слюистых диаспорсодержащих сланцах достигает 94 (табл. 1).

Высокие значения индекса  $ICV(>1.0)$  в нескольких метапесчаниках и метагравелитах могут указывать на присутствие в породах неизмененных силикатных минералов. Свидетельством присутствия в них слабо выветрелого (первого цикла выветривания) обломочного материала является содержание калиевого модуля  $K_2O/Al_2O_3$  [18] равное или превышающее 0.3 (табл. 1).

На диаграмме  $НКМ-ФМ$  [10] для разделения пород по составу глинистых минералов, большинство фигуративных точек оказалась вне выделенных полей, а три точки содержащих пиррофиллит мусковитовых сланцев в поле каолинита (рис. 6 а). На диаграмме  $K/Al-Mg/Al$  [20] точки обломочных пород расположены в области пород, глинистые минералы в которых представлены иллитом, а точки мусковит-пиррофиллитовых сланцев тяготеют к области каолинита (рис. 6 б). В нашем случае эти диаграммы позволяют реконструировать исходный состав неметаморфизованных осадков.



**Рис. 5.** Положение точек составов пород на диаграммах: *a* – A–F; *b* – A–M [15], где: A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>; F=TiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO+MnO+MgO; M=CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; I – липаритодациты; II – граниты; III – гранодиориты; IV – андезитобазальты; *c* – (FeO+MgO)/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O)–SiO<sub>2</sub>; где: I – риолиты, граниты; II – дациты, гранодиориты; III – андезиты, диориты; IV – базальты, габбро [16]; *d* – ICV–CIA [17]. Условные обозначения на рис. 3. [Fig. 5. Position of rock composition points on the diagrams: (a) – A–F; (b) – A–M [15], where: A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>; F=TiO<sub>2</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO+MnO+MgO; M=CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; I – liparithodacites; II – granites; III – granodiorites; IV – basaltic andesite; (c) – (FeO+MgO)/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O)–SiO<sub>2</sub>; where: I – rhyolites, granites; II – dacites, granodiorites; III – andesites, diorites; IV – basalts, gabbro [16]; (d) – ICV–CIA [17]. Legend in Fig. 3.]



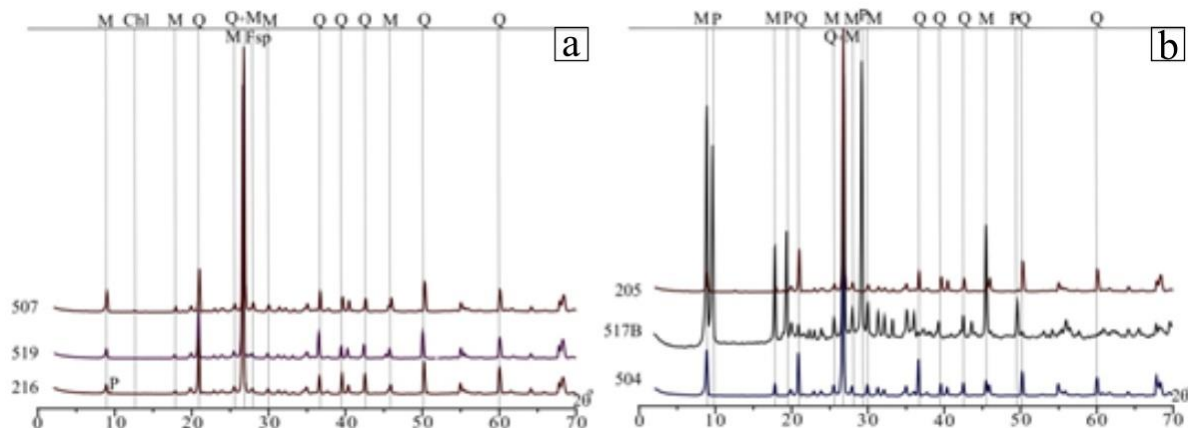
**Рис. 6.** Диаграммы: *a* – НКМ–ФМ [10]; *b* – К/Аl–Мg/Аl [20]. Выделенные области: I – преобладает каолинит; II – монтмориллонит преобладает над каолинитом, может присутствовать иллит; III – преобладает хлорит, с подчиненной примесью железистых иллитов; IV – хлорит+ иллит; V – хлорит+монтмориллонит+иллит; VI – иллит с примесью полевых шпатов. Условные обозначения на рис. 3. [Fig. 6. Diagrams: (a) – NCM–FM [10]; (b) – K/Al–Mg/Al [20]. Highlighted areas: (I) – kaolinite predominates; (II) – montmorillonite predominates over kaolinite, illite may be present; (III) – chlorite predominates, with a minor admixture of ferruginous illite; (IV) – chlorite + illite; (V) – chlorite + montmorillonite + illite; (VI) – illite with an admixture of feldspars. Legend in Fig. 3.]

По данным рентгенодифрактометрического анализа, в изученных образцах постоянно присутствующим слоистым силикатом является типичный для метаморфических пород зеленосланцевой фации мусковит с высокой степенью совершенства кристаллической структуры политипной модификации 2M<sub>1</sub>. Пирофиллит, представленный высокоупорядоченной модификацией 2M, составляет более 50 % в диаспорсодержащих мусковит-пирофиллитовых сланцах. Для изученных образцов сланцев количественное содержание минералов составило: пирофиллит ~ 58 %, мусковит ~ 16 %, диаспор ~ 22 %, кварц ~ 14 %. Первые проценты пирофиллита диагностируются в метапесчаниках алькесвожской толщи на дифрактограммах ориентирован-

ных образцов (рис. 7 а), а в метагравелитах алькесвожской толщи пирофиллит может отсутствовать. Например, в составе обр. 519 рентгенодифрактометрическим анализом установлены: кварц, мусковит и полевой шпат (рис. 7 б). В метагравелитах обеизской свиты отмечаются мусковит, кварц, полевой шпат и, в незначительном количестве, хлорит.

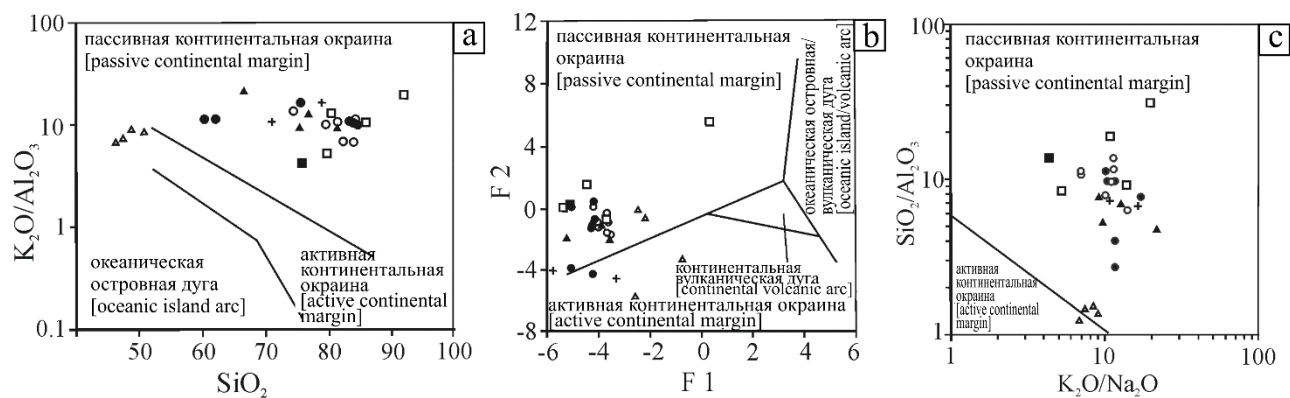
На диаграммах для определения палеогеодинамических условий осадконакопления, построенных на основе соотношений различных петрогенных оксидов [21, 22, 23], фигуративные точки метагравелитов и метапесчаников расположены в областях, выделенных для пород, образованных в условиях пассивной континентальной окраины (рис. 8 а–с).





**Рис. 7.** Дифрактограммы образцов пород, где: *M* – мусковит, *P* – пиррофиллит, *Q* – кварц, *Fsp* – полевои шпат, *Chl* – хлорит. Номера образцов и типы пород в таблице 1.

[**Fig. 7.** X-ray diffraction patterns of rock samples, where: *M* – muscovite, *P* – pyrophyllite, *Q* – quartz, *Fsp* – feldspar, *Chl* – chlorite. Sample numbers and rock types in Table 1.]



**Рис. 8.** Положение фигуративных точек составов пород на диаграммах: *a* –  $\text{SiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  [21]; *b* –  $\text{F1}$ – $\text{F2}$  [22]; *c* –  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  [23]. Условные обозначения на рис. 3.

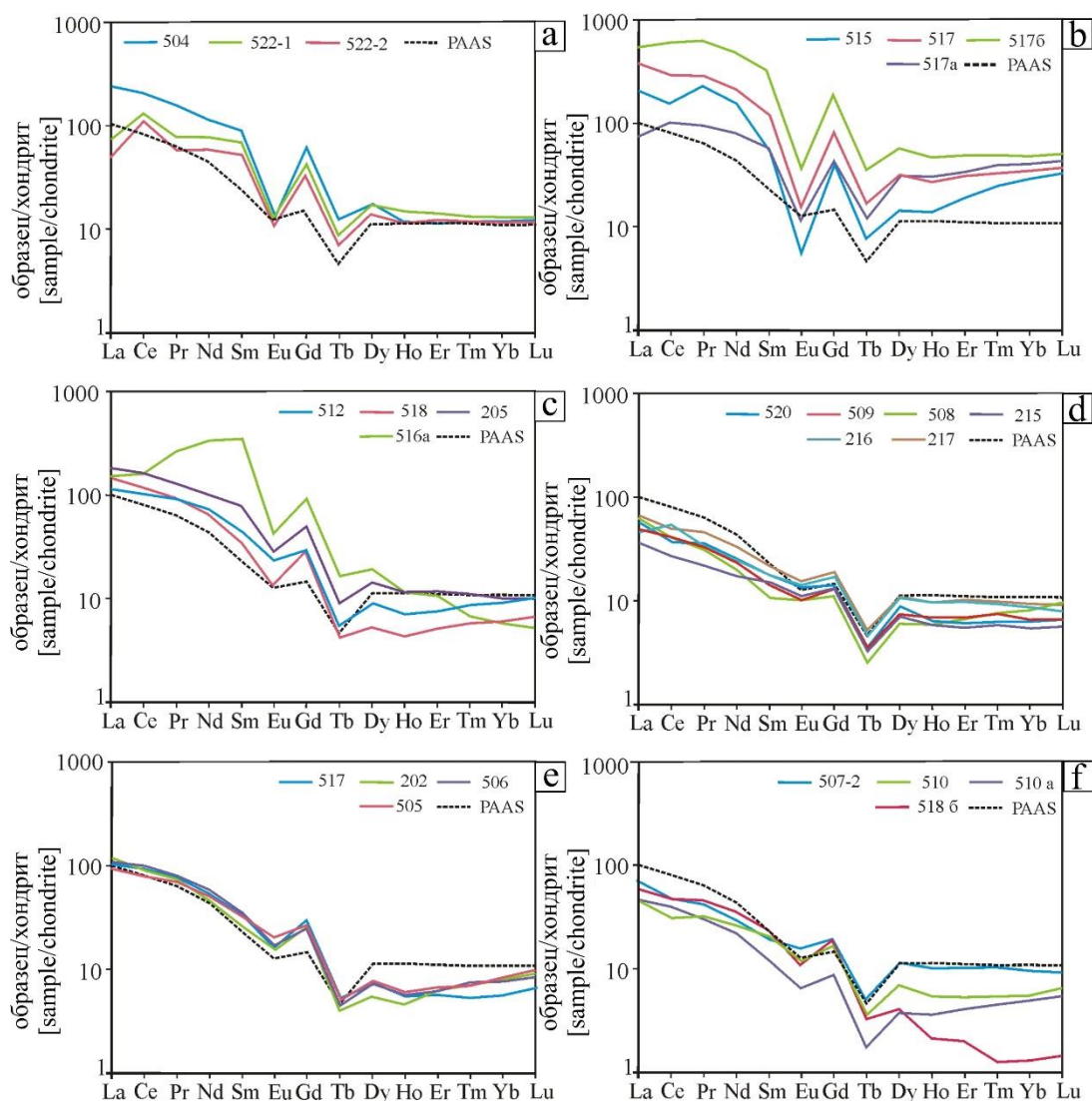
[**Fig. 8.** Position of figurative points of rock compositions on the diagrams: (*a*) –  $\text{SiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  [21]; (*b*) –  $\text{F1}$ – $\text{F2}$  [22]; (*c*) –  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  [23]. Legend in Fig. 3.]

Содержания редкоземельных (РЗЭ), малых и редких элементов, а также индикаторные соотношения, используемые для реконструкции состава источников питания и условий формирования отложений, приведены в Таблице 2. Максимальные содержания РЗЭ отмечаются в содержащих диаспор пиррофиллит-мусковитовых сланцах, минимальные – в метагравелитах обейской свиты (табл. 2). Все разновидности слагающих разрез горных пород различаются по форме нормированных на хондрит [24] графиков распределения РЗЭ (рис. 9). Содержание РЗЭ в кислых вулканитах и сланцах незначительно превышают их содержания в РААС, в метатерригенных породах алькесвожской толщи – близки, а в метапесчаниках обейской свиты – несколько ниже РААС (рис. 9). Сланцы и метапесчаники алькесвожской толщи характеризуются высокой степенью фракционирования (отношение  $\text{La}_\text{N}/\text{Lu}_\text{N}$  до 48), алькесвожские и обейские гравелиты – нормальным для аркозовых песчаников распределением РЗЭ [25]. Во всех проанализированных образцах отмечается преобладание легких РЗЭ над тяжелыми и наличие европиевого минимума, со значениями  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  от 0.12–

0.15 в пиррофиллит-мусковитовых сланцах с диаспором, до 0.85 в алькесвожских метагравелитах. Отношение  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  0.66–1.36 характерно для пород, образованных в эпиконтинентальной обстановке [26].

На диаграмме  $\text{La}/\text{Sc}$ – $\text{Th}/\text{Co}$  [27], на которую нанесены также средние составы известных в районе гранитных массивов, фигуративные точки сланцев и две точки слюдястых метапесчаников алькесвожской толщи расположены вне выделенной области, а остальные локализованы в области продуктов разрушения кислых пород (рис. 10 а). На диаграмме  $\text{GdN}/\text{YbN}$ – $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  [28] большинство фигуративных точек находятся вне выделенных полей, а минимальными значениями отношения  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  выделяются слюдястые сланцы (рис. 10 б). На диаграмме  $\text{Yb}_\text{N}$ – $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  [29] фигуративные точки, за исключением образца гравелита с гематитовым цементом, тяготеют к области постархейских гранитоидов (рис. 10 с). На диаграмме  $\text{Sc}$ – $\text{Th}/\text{Sc}$  [24] все фигуративные точки располагаются в интервале отношений  $\text{Th}/\text{Sc}$  от 1 до 10, соответствующем отложениям, в обломочной части которых присутствует материал кислых магматических пород (рис. 10 d).





**Рис. 9.** Нормированные на хондрит [24] спектры распределения содержаний РЗЭ: *a* – риолиты; *b* – диаспорсодержащие пиррофиллит-мусковитовые сланцы; *c* – сланцы с хлоритомидом; *d–e* алькесовожская толща: *d* – слюдистые гравелиты, *e* – песчаники; *f* – обезицкая свита: песчаники, гравелит с гематитовым цементом, обр. 518 б.

**[Fig. 9.** Spectra of distribution of REE contents normalized to chondrite [24]: (*a*) – rhyolites; (*b*) – diaspore-containing pyrophyllite-muscovite schists; (*c*) – shales with chloritoid; (*d–e*) Alkesvozhskaya sequence: (*d*) – mica gravelites, (*e*) – sandstones; (*f*) – Obezskaya Formation: sandstones, gravel with hematite cement, sample. 518 b.]

**Табл. 2.** Содержания РЗЭ, малых и редких элементов, г/т  
**[Table 2.** Contents of rare earth elements, trace and trace elements, g/t]

Элемент [Ele- ment]	I			II				III				IV				V						VI			VII
	504	522-1	522-2	515	517	5176	517b	512	518	205	516a	517r	505	202	506	520	509	508	215	216	217	507-2	510	510a	5186-2
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Sc	5.3	4.1	4.0	13	23	20	17	25	9.6	9.5	8.6	5.7	24	22	11	6.4	0.29	7.7	3.9	3.0	0.23	9.0	8.9	9.1	2.9
V	17	40	41	24	11	11	30	77	47	64	31	26	117	115	119	42	41	61	37	49	48	52	25	33	66
Cr	10	49	43	8.3	7.3	5.6	9.3	146	38	82	48	110	136	163	111	89	91	77	53	78	90	66	120	53	129
Co	10	2.9	3.1	1.5	0.90	0.34	3.7	18	2.7	4.7	6.9	2.0	32	5.8	21	14	10	12	19	9.6	9.9	9.9	7.9	8.2	0.95
Ni	12	11	11	2.3	4.7	2.2	9.3	24	11	21	14	14	54	28	30	18	23	21	19	16	16	18	21	15	13
Cu	0.48	3.3	3.7	1.4	3.4	23.9	2.9	3.5	3.2	0.95	4.6	600	3.0	5.0	2.6	2.9	4.6	5.6	7.6	6.5	4.4	3.0	2.6	4.7	4.2
Zn	22	3.0	2.2	2.9	4.8	15	4.4	21	4.5	3.5	5.6	10	55	5.5	33	19	26	53	28	32	23	32	12	9.1	0.91
Ga	22	17	17	27	35	39	55	18	14	19	18	9.2	22	32	14	9.6	12	15	10	9.8	8.2	11	8.6	14	4.0
Rb	174	84	71	33	74	67	159	200	89	117	86	58	249	197	163	105	134	188	122	129	109	133	56	103	17
Sr	7.8	55	53	6.2	14	5.5	47	8.6	130	148	45	334	26	284	7.2	11	12	15	11	9.2	30	12	22	15	1572
Y	26	31	22	24	53	83	64	14	8.1	30	29	11	14	9.7	14	12	17	15	14	24	26	28	11	7.1	3.6
Zr	157	185	200	439	460	446	757	381	131	171	73	76	286	210	273	71	71	100	58	61	65	76	119	118	21

Продолжение Табл. 2  
[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Nb	31	20	24	83	90	88	107	26	19	19	7.4	11	18	19	28	8.9	6.5	8.8	5.8	6.5	8.6	7.4	8.0	16	2.0
Mo	1.0	5.3	5.0	1.7	1.2	1.2	0.84	1.7	2.4	4.4	2.1	9.6	2.4	1.4	3.0	6.0	8.5	2.9	2.8	5.1	7.1	3.2	10	3.2	9.7
Cs	6.4	2.2	2.0	0.77	1.9	1.6	5.0	7.2	2.6	3.3	2.8	2.2	10	6.0	7.0	6.9	10	14	9.1	11	10	9.7	2.8	4.1	0.44
Ba	333	122	106	46	79	65	203	378	156	210	515	117	548	370	282	449	333	506	268	321	233	326	155	227	71
La	87	27	18	74	135	199	27	42	55	68	57	39	36	44	40	20	18	22	13	17	24	25	17	17	21
Ce	200	124	108	147	282	577	98	99	115	161	162	84	78	88	97	36	39	39	26	51	47	47	30	38	45
Pr	22	11	8.3	32	40	86	13	13	14	18	37	10	9.6	9.9	11	4.9	4.4	4.2	3.0	4.6	6.2	5.6	4.4	4.1	6.3
Nd	82	55	43	115	154	349	58	53	49	73	249	37	37	32	43	18	16	14	12	17	24	21	18	16	25
Sm	20	16	13	13	28	73	14	11	8.2	18	84	8.2	7.6	6.2	8.1	4.1	3.3	2.5	3.5	4.1	4.9	4.6	4.7	2.8	5.5
Eu	1.3	1.2	0.94	0.52	1.4	3.3	1.1	2.0	1.2	2.4	3.7	1.4	1.8	1.4	1.5	1.2	0.87	0.89	0.96	1.2	1.3	1.4	1.0	0.57	0.95
Gd	19	13	10	13	26	59	14	9.4	8.8	16	28	9.1	8.1	7.8	7.6	4.4	4.0	3.4	4.0	5.2	5.8	5.8	4.9	2.7	5.7
Tb	1.9	1.4	1.1	1.3	2.7	5.8	2.1	0.86	0.67	1.4	2.6	0.84	0.79	0.66	0.72	0.55	0.52	0.40	0.52	0.73	0.79	0.77	0.57	0.28	0.54
Dy	6.6	6.6	5.2	5.5	12	22	12	3.4	2.1	5.5	7.5	2.7	3.0	2.1	2.8	3.4	2.8	2.3	2.7	4.1	4.3	4.5	2.7	1.5	1.6
Ho	1.0	1.3	0.99	1.2	2.4	4.2	2.7	0.62	0.38	1.0	1.00	0.47	0.53	0.41	0.52	0.55	0.59	0.51	0.51	0.82	0.83	0.88	0.47	0.31	0.19
Er	2.9	3.6	3.0	4.9	7.9	13	8.8	1.9	1.3	2.9	2.7	1.4	1.7	1.6	1.6	1.5	1.7	1.7	1.4	2.5	2.6	2.6	1.4	1.0	0.51
Tm	0.43	0.48	0.43	0.91	1.2	1.8	1.4	0.31	0.21	0.40	0.24	0.20	0.25	0.25	0.27	0.22	0.27	0.27	0.21	0.33	0.35	0.37	0.20	0.16	0.048
Yb	3.0	3.3	2.8	7.5	8.8	12	10	2.3	1.6	2.6	1.5	1.4	2.1	2.1	1.9	1.6	1.6	2.0	1.4	2.2	2.3	2.4	1.4	1.2	0.34
Lu	0.50	0.51	0.45	1.3	1.5	2.0	1.7	0.40	0.26	0.39	0.21	0.26	0.38	0.35	0.33	0.25	0.25	0.37	0.22	0.30	0.35	0.35	0.25	0.21	0.055
Hf	5.2	7.3	7.7	18	18	18	30	12	4.4	4.8	2.4	2.7	7.8	6.4	7.4	2.3	2.0	2.6	1.6	1.7	1.9	2.1	3.9	3.7	0.64
W	2.4	2.6	2.8	4.3	3.9	3.9	1.9	7.7	1.9	2.2	3.1	2.1	3.9	6.9	3.2	1.8	2.1	1.9	0.89	0.80	1.1	1.3	3.7	3.6	1.5
Pb	2.9	2.6	2.7	2.5	2.0	1.9	7.3	3.1	2.3	1.3	2.2	12	9.1	4.3	4.5	7.4	9.1	9.8	8.1	6.4	8.4	7.5	5.5	4.0	3.8
Th	24	28	24	97	119	98	97	40	27	17	13	19	22	35	24	47	8.9	8.3	5.4	8.8	12	10.3	21	18	3.6
U	2.8	3.9	4.0	6.6	8.2	9.3	7.0	6.0	2.1	2.4	2.1	1.4	1.7	2.7	4.4	1.9	1.1	1.5	0.95	0.85	1.1	1.2	3.9	3.9	1.3
Th/Co	2.2	9.6	7.7	66.3	132.4	285.8	26.7	2.2	9.9	3.7	1.9	9.3	0.7	6.1	1.2	3.4	0.9	0.7	0.3	0.9	1.2	1.0	2.7	2.2	3.8
La/Sc	16.6	6.5	4.6	5.6	5.9	9.9	1.6	1.7	5.7	7.2	6.6	6.9	1.5	2.0	3.8	3.2	61.8	2.9	3.3	5.6	105	2.8	1.9	1.9	7.3
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	19.7	5.4	4.3	6.7	10.3	11.0	1.8	12.5	23.4	17.9	26.5	18.9	11.5	14.3	13.9	8.8	7.4	7.5	6.5	5.3	6.9	7.0	8.1	9.3	42.3
Eu/Eu*	0.20	0.24	0.24	0.12	0.15	0.15	0.24	0.61	0.43	0.43	0.19	0.85	0.73	0.93	0.79	0.81	0.76	0.49	0.68	0.60	0.56	0.82	0.63	0.63	0.51
Gd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	5.2	3.2	2.9	1.4	2.4	3.9	1.1	3.3	4.5	4.9	15.9	5.2	3.1	3.0	3.2	2.3	2.0	1.4	2.4	2.0	2.0	1.9	2.8	1.8	13.5
Ce/Ce*	1.08	1.61	1.90	0.66	0.88	0.97	1.12	0.98	0.99	1.06	0.70	0.84	1.03	0.95	0.96	1.36	0.91	0.98	0.98	0.99	1.06	0.92	0.82	1.06	0.90
La/Th	3.7	1.6	1.0	0.8	4.0	1.1	1.2	1.7	1.9	2.4	2.7	2.0	0.8	2.1	6.2	0.9	1.1	4.3	2.4	1.9	2.0	6.0	2.0	2.0	2.0
Th/Sc	4.5	6.9	6.0	7.4	5.2	4.9	5.7	1.6	2.8	1.8	1.5	3.3	0.9	1.6	2.3	7.3	30.8	1.1	1.4	2.9	53.1	1.2	2.4	2.0	1.2
Zr/Sc	29.8	44.9	50.5	33.4	20.0	22.1	44.6	15.4	13.6	18.1	8.5	13.4	11.7	9.4	26.0	11.1	246	12.9	15.0	20.3	287	8.4	13.4	13.0	7.3
Σ REE	473	295	238	441	757	1490	327	252	265	401	666	109	111	109	83	135	150	208	200	207	230	149	99	92	117
LREE	412	234	191	382	642	1286	211	219	242	342	593	85	82	83	58	95	107	181	170	182	200	104	76	78	104
HREE+Y	61	61	47	59	115	203	117	33	23	60	73	25	29	26	25	40	43	27	31	25	29	45	23	14	13
ΣCe/ ΣY	11.6	7.7	7.9	10.8	10.3	10.7	4.0	11.4	15.8	11.5	13.4	6.8	6.9	7.6	5.3	5.9	6.2	11.0	10.0	11.9	12.7	5.9	6.4	10.5	11.6

Примечания: Ce/Ce\* = (Ce<sub>N</sub>/La<sub>N</sub>+Pr<sub>N</sub>)/2, нормировано к глинам платформ [25]; Eu/Eu\* = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2, нормировано на хондрит; La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>, нормировано на хондрит [24].

[Notes: Ce/Ce\* = (Ce<sub>N</sub>/La<sub>N</sub>+Pr<sub>N</sub>)/2, normalized to platform clays [25]; Eu/Eu\* = Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>)/2, normalized to chondrite; La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>, normalized to chondrite [24].]

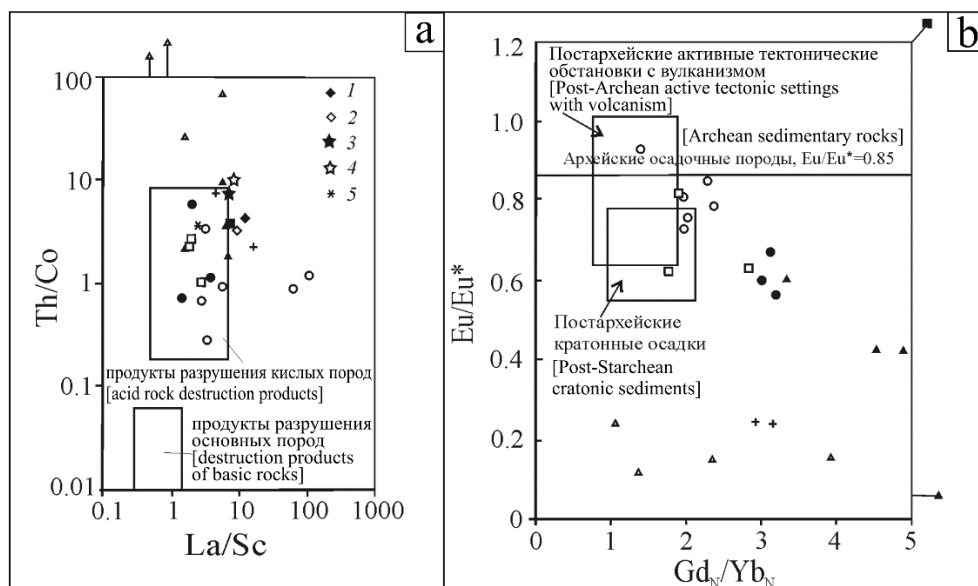
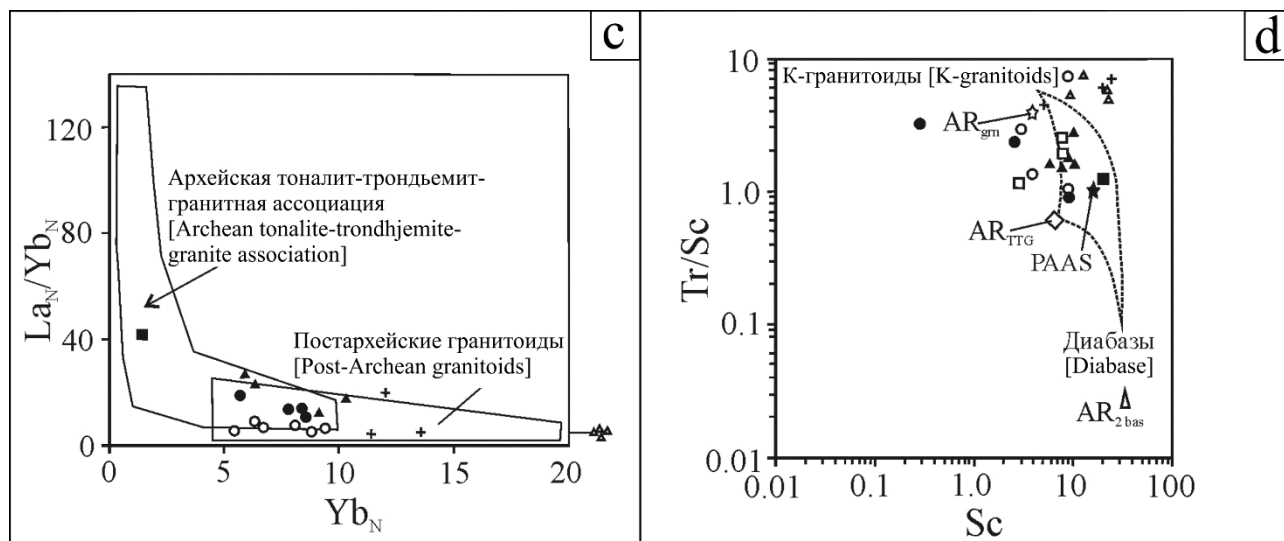
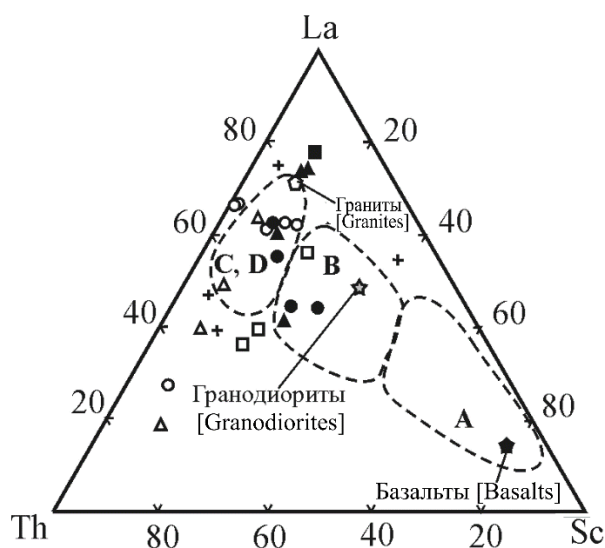


Рис. 10. Диаграммы: а – La/Sc–Th/Co [27]; б – Gd<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>–Eu/Eu\* [28]. Условные обозначения: 1 – средний архейский гранит [30]; 2 – средний протерозойский гранит [30]; 3 – средний состав риолитов малдинского комплекса [31]; 4 – средний состав дацитов малдинского комплекса [31]; 5 – средний состав гранитов малдинского гранитоидного массива [31]. AR<sub>gm</sub> – средний архейский гранит; AR<sub>TTG</sub> – средний состав пород архейских тоналит-гранодиорит-гранитных ассоциаций; AR<sub>bas</sub> – средний позднеархейский базальт.



**Рис. 10.** Диаграммы: *c* –  $Yb_N$ – $La_N/Yb_N$  [29]; *d* –  $Sc$ – $Th/Sc$  [24]. Условные обозначения: 1 – средний архейский гранит [30]; 2 – средний протерозойский гранит [30]; 3 – средний состав риолитов малдинского комплекса [31]; 4 – средний состав дацитов малдинского комплекса [31]; 5 – средний состав гранитов малдинского гранитоидного массива [31]. AR<sub>grt</sub> – средний архейский гранит; AR<sub>TTG</sub> – средний состав пород архейских тоналит-трондьемит-гранитных ассоциаций; AR<sub>2bas</sub> – средний позднеархейский базальт. [Fig. 10. Diagrams: (c) –  $Yb_N$ – $La_N/Yb_N$  [29]; (d) –  $Sc$ – $Th/Sc$  [24]. Legend: (1) – middle Archean granite [30]; (2) – middle Proterozoic granite [30]; (3) – average composition of rhyolites of the Maldinskiy complex [31]; (4) – average composition of dacites of the Maldinskiy complex [31]; (5) – average composition of granites of the Maldinskiy granitoid massif [31]. AR<sub>grt</sub> – middle Archean granite; AR<sub>TTG</sub> – average composition of rocks of Archean tonalite-trondhjemite-granite associations; AR<sub>2bas</sub> – medium Late Archean basalt.]

На диаграмме  $Th$ – $La$ – $Sc$  [22], используемой для установления палеотектонических условий осадконакопления, большинство точек расположено в области континентальной окраины (рис. 11). Две точки алькесвожских метапесчаников и по одной точке пиррофиллит-мусковит-кварцевых сланцев с хлоритоидом и обейзских песчаников попали в область пород, сформированных в условиях активной континентальной окраины. Несколько точек обейзских метапесчаников и слюдястых диаспор-содержащих сланцев оказалась вне выделенных полей.



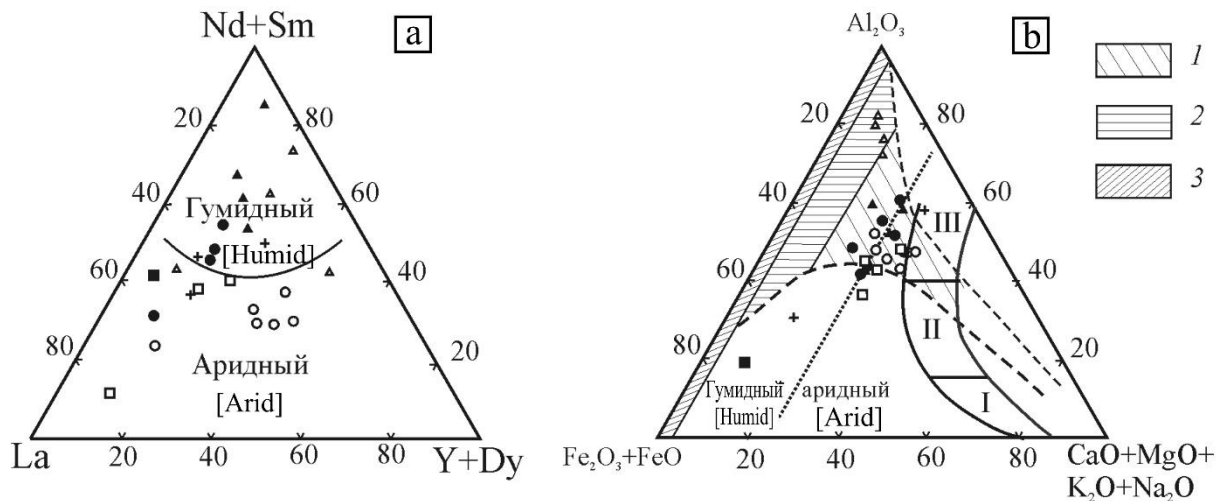
**Рис. 11.** Диаграмма  $Th$ – $La$ – $Sc$  [22]: *A* – океанические островные дуги, *B* – континентальные островные дуги, *C* – активная

континентальная окраина, *D* – пассивная континентальная окраина.

[Fig. 11.  $Th$ – $La$ – $Sc$  diagram [22]: (A) – oceanic island arcs, (B) – continental island arcs, (C) – active continental margin, (D) – passive continental margin.]

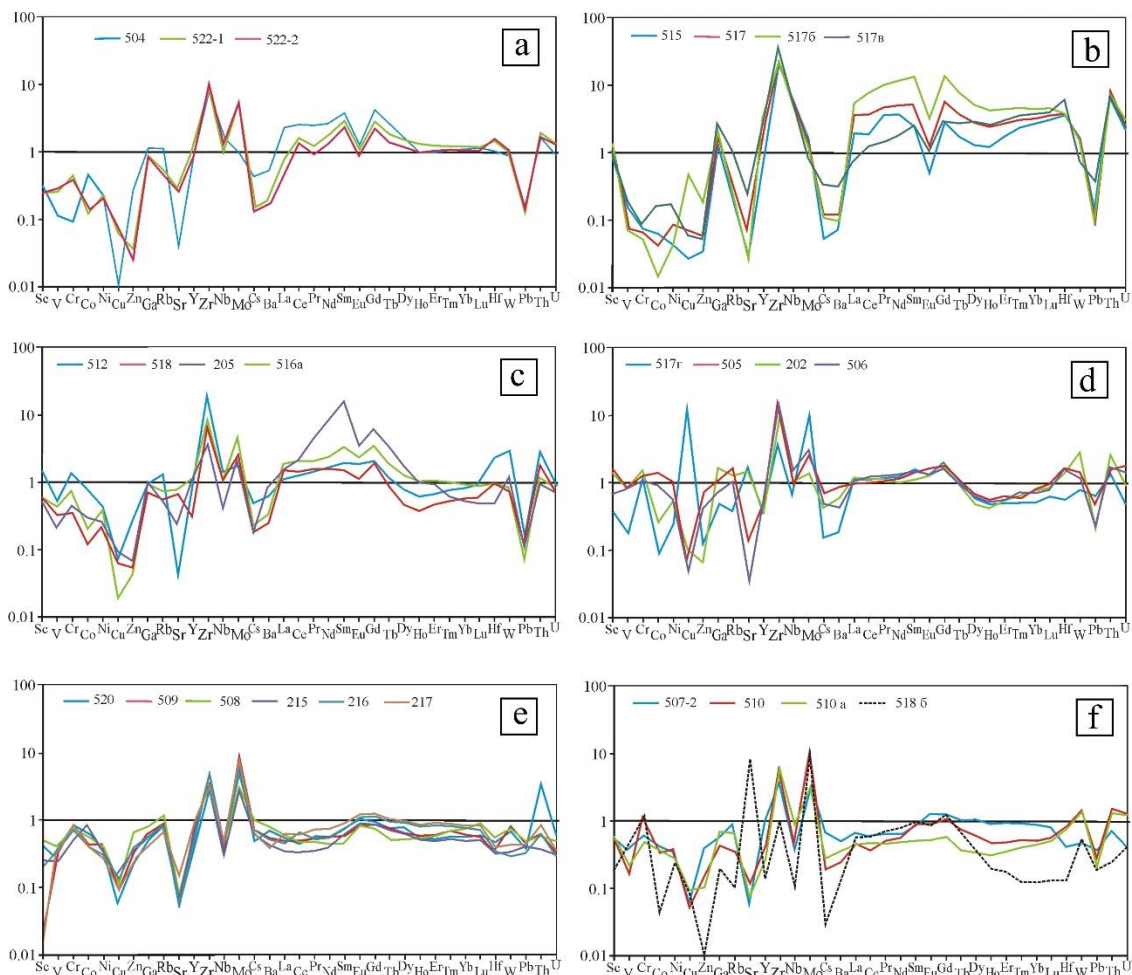
Расположение фигуративных точек на применяемой для реконструкции климатических условий осадконакопления диаграмме  $La$ – $(Nd+Sm)$ – $(Y+Dy)$  [32], позволяет предположить образование сланцев и песчаников алькесвожской толщи в условиях гумидного климата. Большинство точек алькесвожских и обейзских метагравелитов отвечает области аридного климата (рис. 12 а). Аналогичное положение (в верхней части поля 1, соответствующей гумидным условиям) занимают эти точки и на диаграмме химизма продуктов выветривания, построенной с использованием порообразующих оксидов [33]. Расположение фигуративных точек на этой диаграмме позволяет считать, что большая часть исследованных пород образована за счет накопления в условиях аридного климата обломков средне выветрелых близких по составу к кислым магматическим породам. Лишь диаспор-содержащие пиррофиллит-мусковитовые сланцы попали в поле конечных продуктов выветривания – глинистых пород (рис. 12 б).

Выделенные литологические типы пород имеют различные спектры распределения нормированных на UCC [24] элементов-примесей (рис. 13). Во всех изученных образцах отмечаются низкие, по сравнению с континентальной корой, содержания  $Cu$ ,  $Sr$ ,  $Cs$  и  $Pb$ , и повышенные  $Zr$  и  $Mo$ . Количество  $Zr$  и РЗЭ заметно уменьшается снизу вверх по разрезу.



**Рис. 12.** Диаграммы: *a* – La–(Nd+Sm)–(Y+Dy) [32]; *b* – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO+MgO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O [33], где 1–3 – поля корреляции продуктов выветривания: 1 – начальных (зона осветления и механической дезинтеграции); 2 – глинистых (глинистые продукты гипергенного преобразования горных пород); 3 – конечных (каолиновые и бокситовые глины, бокситы, железняки), I–III – поля корреляции магматических пород: I – ультраосновных; II – основных; III – средних и кислых.

[Fig. 12. Diagrams: (a) – La–(Nd+Sm)–(Y+Dy) [32]; (b) – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO+MgO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O [33], where (1–3) – correlation fields of weathering products: (1) – initial (zone of brightening and mechanical disintegration); (2) – clayey (clayey products of supergene transformation of rocks); (3) – final (kaolin and bauxite clays, bauxites, iron ores), I–III – correlation fields of igneous rocks: I – ultrabasic; II – basic; III – medium and sour.]



**Рис. 13.** Нормированное на UCC [24] содержание элементов-примесей в нижнепалеозойских терригенных отложениях хр. Малдынырд.

[Fig. 13. Normalized to UCC [24] content of trace elements in the Lower Paleozoic terrigenous deposits of the ridge Maldynyr.]



### Обсуждение результатов

По соотношению  $K_2O-Na_2O$  [13] все изученные разновидности горных пород являются аркозами, но на диаграмме  $\log(Fe_2O_{3\text{общ}}/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$  (рис. 3 б) пиррофиллит-мусковит-кварцевые сланцы с хлоритом, метагравелиты и метапесчаники распределились между полями аркозов и лититов, а пиррофиллит-мусковитовые сланцы с диапором попали в поле глинистых сланцев и вакков. Эти же сланцы отличаются высокими значениям гидролизатного модуля (ГМ) и, согласно классификации Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, являются гидролизатами – породами, содержащими материал коры выветривания (рис. 4 а). Высокие значения модуля нормированной щелочности ( $HKM > 0.3$ ) свидетельствуют о присутствии в составе обломочного материала метагравелитов и метапесчаников относительно слабо выветрелого вулканомиктового материала, а максимальные значения этого модуля, следовательно, и количество слабо выветрелых вулканомиктовых обломков, характерны для метапесчаников алькесвожской толщи. По значению титанового модуля (ТМ) большинство изученных образцов являются пониженно- или нормально-титанистыми породами, и только в трех образцах обейских метагравелитов его значение превышает 0.12, что может быть связано с концентрацией в них естественного шлиха ильменита (лейкоксена), источником которого могли быть основные вулканы саблегорской свиты и интрузии Манарагского комплекса.

Характеризующие изменение состава пород на палеоводосборах индексы CIA, CIW и IGV указывают на связь пиррофиллит-мусковитовых сланцев (табл. 1) с корой выветривания. Положение фигуративных точек на диаграмме IGV–CIA (рис. 5 д) указывает на присутствие в составе обейских метагравелитов средне выветрелых магматических образований кислого и основного составов. Вверх по разрезу, по мере выведения на уровень эрозионного вреза неизмененных в коре выветривания основных магматических пород, например, образований нижней подсвиты саблегорской свиты и интрузий Манарагского комплекса, значения индексов, отражающих степень выветривания, уменьшаются.

Использование рентгено-дифрактометрического метода исследования глинистых минералов позволило установить, что слоистые алюмосиликаты в диапор-содержащих сланцах представлены преимущественно пиррофиллитом, незначительные содержания которого диагностированы и метатерригенных породах алькесвожской толщи (рис. 7).

На всех диаграммах, используемых для реконструкции палеогеодинамических условий осадконакопления, фигуративные точки составов метатерригенных образований расположены в полях пассивной континентальной окраины (рис. 8).

Формы кривых распределения РЗЭ и элементов-примесей (рис. 9 и 13) свидетельствуют о накоплении в коре выветривания минералов-концентраторов РЗЭ, относительно стабильных источников обломочного материала, во время накопления алькесвожской толщи

и присоединении новых источников обломков основного состава, при формировании залегающих выше обейских отложений. Характер кривых распределения элементов-примесей отражает зависимость состава метатерригенных пород от подстилающих пород и повторяет геохимические особенности риолитов, отличающихся присутствием так называемого «малдинского геохимического феномена», заключающегося в низких содержаниях Ni и Cu, и повышенных – летучих элементов грейзенового парагенезиса [31, 35]. Вверх по разрезу источники обломочного вещества сменяются породами, менее измененными процессами выветривания. На постепенное уменьшение влияния кислых вулканических и сформированной по ним коры выветривания, а также участие в формировании состава нескольких источников обломочного материала указывает положение фигуративных точек на дискриминантных диаграммах, построенных на соотношении редких и редкоземельных элементов (рис. 10).

### Заключение

Проведенное изучение нижнепалеозойских отложений в зоне контакта фундамент/чехол на хребте Малдыньрд позволило охарактеризовать геохимические особенности различных литологических типов слагающих разрез пород: сланцев, метагравелитов и метапесчаников. Субстратом для образования пиррофиллит-мусковитовых сланцев была сформированная в условиях гумидного климата кора выветривания по кислым вулканитам верхней подсвиты саблегорской свиты.

Диапор-содержащие мусковит-пиррофиллитовые сланцы, отличающиеся наиболее высокими показателями индексов химического выветривания и содержащие максимальные количества РЗЭ, сохранили и сконцентрировали геохимические особенности подстилающих кислых вулканических саблегорской свиты. В последних существенно преобладают легкие РЗЭ над тяжелыми и низкие содержания Ni и Cu. Алькесвожские породы часто включают переотложенный слюдястый материал подстилающей метаморфизованной коры выветривания и в разной степени измененные обломки собственно кислых вулканических. Практически одинаковые кривые распределения РЗЭ, свидетельствуют о неизменяющихся за время накопления алькесвожской толщи источниках обломочного материала. Отличительными признаками отложений обейской свиты являются минимальные значения индексов химического выветривания, наименьшее из слагающих разрез пород содержание РЗЭ и присутствие в составе продуктов разрушения магматических пород как кислого, так и основного состава.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Озеров В. С. Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала // *Руды и металлы*. 1996. № 4. С. 28–37.
2. Озеров В. С. Особенности металлогении золота области

- Центрально-Уральского поднятия на севере Урала. *Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов*. Сыктывкар: Геопринт, 1998. С. 14–16.
3. Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Моралев Г. В., Соболева А. А., Иванова Т. И. Золото-платиноидная минерализация на Приполярном Урале. *Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов*: Материалы Всерос. конф. Сыктывкар: Геопринт, 1998. С. 13–14.
4. Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Моралев Г. В. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала // *Геология рудных месторождений*. 1996. Т. 38. № 1. С. 15–30.
5. Ефанова Л. И. Алюкесовожская толща на севере Урала. Стратиграфия, литология, металлоносность: авторефер. дис. канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2001. 24 с.
6. Ефанова Л. И., Повонская Н. В. Минералогические особенности и золотоносность базальной части разреза уральд хребта Малдынырд (Приполярный Урал). *Сыктывкарский минералогический сборник. Тр. ИГ Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар, 1999. № 28. Вып. 101. С. 155–164.
7. Козырева И. В., Юдович Я. Э., Швецова И. В., Кетрис М. П., Ефанова Л. И. Глиноземистые породы Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 101 с.
8. Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Ефанова Л. И., Чупров Г. В. Золото коренных проявлений в Кожимском районе Приполярного Урала // *Сыктывкарский минералогический сборник*. Сыктывкар, 2001. С. 116–133.
9. Шумилов И. Х., Остащенко Б. А. Минералого-технологические особенности Au-Pd-TR оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт. 2000. 104 с.
10. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука. 2000. 479 с.
11. Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Первые U/Pb-данные о возрасте детритовых цирконов из песчаников золотоносной позднекембрийско-раннеордовикской алюкесовожской толщи (Приполярный Урал) // *Вестник Геонаук*. 2022. № 5. С. 3–10. DOI: 10.19110/geov.2022.5.1
12. Никулова Н. Ю., Гракова О. В., Хубанов В. Б. Морфология, строение и состав циркона из метапесчаников алюкесовожской толщи (Приполярный Урал) // *Вестник Пермского университета*. 2023. Т. 22. № 2. С. 99–104. DOI: 10.17072/psu.geol.22.2.99
13. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. Москва: Мир. 1976. 536 с.
14. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sed. Petrol.* 1988. Vol. 58. pp. 820–829.
15. Коссовская А. Г., Тучкова М. И. К проблеме минералогическо-петрохимической классификации и генезиса песчаных пород // *Литология и полезные ископаемые*. 1988. № 2. С. 8–24.
16. 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 (5). pp. 293–306.
17. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea // *Sedimentary Geology*. 2002. Vol. 149. pp. 219–235.
18. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review // *J. Sed. Res.* 1995. Vol. 65. pp. 1–12.
19. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. Vol. 299. pp. 715–717.
20. Tugeon S., Brumsack H. J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian boundary events (Cretaceous) in the Umbria-March Basin of central Italy // *Chem. Geol.* 2006. Vol. 234. pp. 321–339.
21. 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 (5). pp. 635–650.
22. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // *The Journal of Geology*. 1983. Vol. 91 (6). pp. 611–627.
23. Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // *Geol. Soc. Spec. Publ.* L. 1982. Vol. 10. pp. 551–561.
24. Тейлор С. З., МакЛеннон С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир. 1988. 384 с.
25. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука. 1976. 268 с.
26. Murray R. W., Buchholtz ten Brink M. R., Gerlach D. C. et al. Rare earth, major and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California Assessing REE sources to fine-grained marine sediment // *Geochim. Cosmochim.* 1991. Vol. 55. pp. 1875–1895.
27. Cullers R. L. Implications of elements concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem. Geol.* 2002. Vol. 191 (4). pp. 305–327.
28. Taylor S. R. The geochemical evolution of the continental crust. S. R. Taylor, S. M. McLennan // *Rev. Geophys.* 1995. Vol. 33. pp. 241–265.
29. Маслов А. В., Крупенин М. Т., Ронкин Ю. Л., Гареев Э. З., Лепихина О. П., Попова О. Ю. Тонкозернистые алюмосилико-кластические образования стратотипического разреза среднего Рифея на Южном Урале: особенности формирования, состав и эволюция источников сноса // *Литология и полезные ископаемые*. 2004. № 4. С. 414–441.
30. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust contrasting results from surface and shales // *Chem. Geol.* 1993. Vol. 104. pp. 1–37.
31. Соболева А. А. Вулканы и ассоциирующие с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН. 2004. 146 с.
32. Шатров В. А., Войцеховский Г. В. Применение лантаноидов для реконструкций обстановок образования в фанерозое и протерозое (на примере разрезов чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы) // *Геохимия*. 2009. № 8. С. 805–824.
33. Ерофеев В. С., Цеховский Ю. Г. Парагенетические ассоциации континентальных отложений (семейство аридных парагенезов. Эволюционная периодичность). М.: Наука. 1983. 192 с.
34. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Строение зоны межформационного контакта на руч. Алюкесвож. В кн: *Геохимия древних толщ Севера Урала*. Сыктывкар: Геопринт. 2002. С. 54–67.

## Geodynamic and paleogeographic features of the formation of metaterrigenous deposits at the base of the Paleozoic section of the ridge Maldynyrd (Subpolar Urals)

©2024 N. Yu. Nikulova<sup>✉</sup>, O. V. Grakova, Yu. S. Simakova

*Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya st., 167982, Syktyvkar, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** The article presents the results of a geochemical study of metaterrigenous deposits at the base of the Paleozoic section of the ridge Maldynyrd (Subpolar Urals). In order to trace changes in the material composition of Lower Paleozoic sediments from bottom to top along the section, to clarify the geodynamic, climatic conditions of sedimentation and nutrition sources, the distribution features of petrogenic, rare earth and rare elements in various lithological types of rocks in the foundation/cover contact zone were studied. Interest in these studies is caused, among other things, by the fact that gold ore occurrences discovered at the end of the 20th century are associated with the contact of Riphean-Vendian and Paleozoic deposits in the study area.

**Methodology:** The contents of rock-forming oxides in the rocks were determined by the gravimetric chemical method, the determination of the contents of rare and rare earth elements was carried out on an Agilent 7700x inductive coupled plasma mass spectrometer, the phase composition of the rocks was determined on a Haoyuan DX-2700BH X-ray diffractometer.

**Results and discussion:** Geochemical characteristics of sediments of various genetic types in the foundation/cover contact zone from the central part of the ridge Maldynyrd (Subpolar Urals) showed that the maximum REE contents are observed in diaspore-containing pyrophyllite-muscovite shales, the minimum - in metagraywackes of the Obeizskaya Formation. The CIA, CIW and ICV values indicate the association of pyrophyllite-muscovite schists with the weathering crust. The position of the figurative points on the ICV–CIA diagram indicates the presence of moderately weathered magmatic formations of felsic and mafic compositions in the Obeizskaya metagraywackes. In the reconstruction diagrams of paleogeodynamic settings, the figurative composition points of all metaterrigenous formations are located in the fields of the passive continental margin.

**Conclusions:** The studies showed that the substrate for the formation of pyrophyllite-muscovite schists at the base of the Paleozoic section was the weathering crust of the acidic volcanics of the upper subformation of the Sablegorskaya Formation. Diaspore-bearing muscovite-pyrophyllite shales preserved and concentrated the geochemical features of the underlying acidic volcanics. Rocks of Alkesvozhskaya Formation often contain redeposited micaceous material from the underlying metamorphosed weathering crust and, to varying degrees, altered fragments of acidic volcanics themselves. In the sediments of the Obeizskaya Formation, the destruction products contain igneous rocks of felsic and basic composition.

**Keywords:** weathering crust, geochemical characteristics, Paleozoic deposits, sedimentation conditions, Subpolar Urals

**Funding:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the IG Federal Research Center Komi Scientific Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Natalia Yu. Nikulova, e-mail: [Nikulova@geo.komisc.ru](mailto:Nikulova@geo.komisc.ru)

*For citation:* Nikulova N. Yu., Grakova O. V., Simakova Yu. S. Geodynamic and paleogeographic features of the formation of metaterrigenous deposits at the base of the Paleozoic section of the ridge Maldynyrd (Subpolar Urals) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 49–65. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/49-65>

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

- Ozerov V. S. Metamorfizovannye rossypi zolota Pripoljarnogo Urala [Metamorphosed placers of gold in the Subpolar Urals]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 1996, no. 4, pp. 28–37. (In Russ.)
- Ozerov V. S. Osobennosti metallogenii zolota oblasti Central'no-Ural'skogo podnjatija na severe Urala [Features of gold metallogeny in the region of the Central Ural uplift in the north of the Urals]. *Zoloto, platina i almazy Respubliki Komi i sopredel'nyh regionov* [Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and adjacent regions]. Syktyvkar: Geoprint, 1998, pp. 14–16. (In Russ.)
- Kuznecov S. K., Tarbaev M. B., Moralev M. B., Soboleva A. A., Ivanova T. I. Zoloto-platinoidnaja mineralizacija na Pripoljarnom Urale [Gold-platinoid mineralization in the Subpolar Urals]. *Zoloto, platina i almazy Respubliki Komi i sopredel'nyh regionov* [Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and adjacent regions]. Syktyvkar: Geoprint, 1998, pp. 13–14. (In Russ.)
- Tarbaev M. B., Kuznecov S. K., Moralev G. V. Novyj zoloto-palladijevyj tip mineralizacii v Kozhimskom rajone Pripoljarnogo Urala [New gold-palladium type of mineralization in the Kozhimsky region of the Subpolar Urals]. *Geologija rudnyh mestorozhdenij – Geology of ore deposits*, 1996, vol. 38, no. 1, pp. 15–30. (In Russ.)
- Efanova L. I. *Al'kesvovzhskaja tolshha na severe Urala Stratigrafija, litologija, metallonosnost'* Diss. kand. geol.-min. nauk [Alkesvovzhskaya formation in the north of the Urals. Stratigraphy, lithology, metal content. Diss. PhD. geol. min. Science]. Syktyvkar, IG FRC Komi SC UB RAS, 2001, 24 p. (In Russ.)
- Efanova L. I., Povonskaya N. V. Mineralogicheskie osobennosti i zolotonosnost' bazal'noi chasti razreza uralid khrebtta Maldynyrd (Pripoljarnyj Ural) [Mineralogical features and gold content of the basal part of the Uralides section of the Maldynyrd ridge (Subpolar Urals)]. *Syktyvskarskij mineralogicheskij sbornik, Tr. IG Komi SC UB RAS – Syktyvkar mineralogical collection, IG Komi SC UB RAS*, Vol. 101, Syktyvkar, 1999, no. 28, pp. 155–164. (In Russ.)
- Kozyreva I. V., Judovich Ja. Je., Shvecova I. V., Ketris M. P., Efanova L. I. *Glinozemistye porody Pripoljarnogo Urala* [Aluminous rocks of the Subpolar Urals]. Ekaterinburg: UrO RAN publ., 2003, 101 p. (In Russ.)
- Kuznecov S. K., Tarbaev M. B., Efanova L. I., Chuprov G. V. Zoloto korennyh pojavlenij v Kozhimskom rajone Pripoljarnogo Urala [Gold from primary occurrences in the Kozhimsky region of the Subpolar Urals]. *Syktyvskarskij mineralogicheskij sbornik – Syktyvkar mineralogical collection*, Syktyvkar, 2001, pp. 116–133. (In Russ.)
- Shumilov I.H., Ostashenko B.A. *Mineralogo-tehnologicheskie osobennosti Au-Pd-TR orudnenija na Pripoljarnom Urale* [Mineralogical and technological features of Au-Pd-TR mineralization in the Subpolar Urals]. Syktyvkar: Geoprint publ., 2000, 104 p. (In Russ.)
- Judovich Ja. Je., Ketris M. P. *Osnovy litohimii* [Fundamentals of lithochemistry]. Saint Petersburg: Nauka publ., 2000, 479 p. (In Russ.)
- Nikulova N. Ju., Hubanov V. B. Pervye U/Pb-dannye o vozraste detritovykh cirkonov iz peschanikov zolotonosnoj pozdnekembrijsko-ranneordovikskoj al'kesvovzhskoj tolshhi (Pripoljarnyj Ural) [The first U/Pb data on the age of detrital zircons from sandstones of the gold-bearing Late Cambrian-Early Ordovician Alkesvovzh formation (Polar Urals)]. *Vestnik Geonauk – Bulletin of Geosciences*, 2022, no. 5, pp. 3–10. (In Russ.)
- Nikulova N. Ju., Grakova O. V., Hubanov V. B. Morfologija, stroenie i sostav cirkona iz metapeschanikov al'kesvovzhskoj tolshhi (Pripoljarnyj Ural) [Morphology, structure and composition of zircon from metasandstones of the Alkesvovzhskaya strata (Subpolar Urals)]. *Vestnik Permskogo universiteta – Bulletin of Perm University*, 2023, Vol. 22, no. 2, pp. 99–104. DOI: 10.17072/psu.geol.22.2.99 (In Russ.)
- Pettidzhon F., Potter P., Siver R. *Peski i peschaniki* [Sands and sandstones]. Moscow: Mir publ., 1976, 536 p. (In Russ.)
- Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sed. Petrol.*, 1988, vol. 58, pp. 820–829.
- Kossovskaja A. G., Tuchkova M. I. K probleme mineralogopetrohimicheskoi klassifikacii i genezisa peschanykh porod [On the problem of mineralogical and petrochemical classification and genesis of sandy rocks]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 1988, no. 2, pp. 8–24. (In Russ.)
- 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 (5), pp. 293–306.
- Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea. *Sedimentary Geology*, 2002, vol. 149, pp. 219–235.
- Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *J. Sed. Res.*, 1995, vol. 65, pp. 1–12.
- Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717.
- Tugeon S., Brumsack H. J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian boundary events (Cretaceous) in the Umbria-March Basin of central Italy. *Chem. Geol.*, 2006, vol. 234, pp. 321–339.
- 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 (5), pp. 635–650.
- Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 1983, Vol. 91 (6), pp. 611–627.
- Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Geol. Soc. Spec. Publ. L.*, 1982, vol. 10, pp. 551–561.
- Tejlor S. Z., MakLennon S. M. (1988) *Kontinental'naja kora: ee sostav i jevoljucija* [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow: Mir publ., 1988, 384 p. (In Russ.)
- Balashov Ju. A. *Geohimija redkozemel'nyh jelementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka publ., 1976, 268 p. (In Russ.)



26. Murray R. W., Buchholtz ten Brink M. R., Gerlach D. C. et al. Rare earth, major and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California Assessing REE sources to fine-grained marine sediment. *Geochim. Cosmochim.*, 1991, vol. 55, pp. 1875–1895.
27. Cullers R. L. Implications of elements concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, 2002, vol. 191 (4), pp. 305–327.
28. Taylor S. R. The geochemical evolution of the continental crust. S. R. Taylor, S. M. McLennan. *Rev. Geophys.*, 1995, vol. 33, pp. 241–265.
29. Maslov A. V., Krupenin M. T., Ronkin Ju. L., Gareev Je. Z., Lepihina O. P., Popova O. Ju. Tonkozernistye aljunosilikoklasticheskie obrazovaniya stratotipicheskogo razreza srednego Rifeja na Juzhnom Urale: osobennosti formirovaniya, sostav i jevoljucija istochnikov snosa [Fine-grained aluminosilicic-clastic formations of the stratotype section of the Middle Riphean in the Southern Urals: features of formation, composition and evolution of provenances]. *Litologija i poleznye iskopaemye – Lithology and minerals*, 2004, no. 4, pp. 414–441. (In Russ.)
30. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust contrasting results from surface and shales. *Chem. Geol.*, 1993, vol. 104, pp. 1–37.
31. Soboleva A. A. Vulkanity i asociirujushhie s nimi granitoidy Pripoljarnogo Urala [Volcanites and associated granitoids of the Subpolar Urals]. Ekaterinburg: UrO RAN publ., 2004, 146 p. (In Russ.)
32. Shatrov V. A., Vojcehovskij G. V. Primenenie lantanoidov dlja rekonstrukcij obstanovok obrazovaniya v fanerozoe i proterozoe (na primere razrezov chehla i fundamenta Vostochno-Evropejskoj platformy) [The use of lanthanides for the reconstruction of formation settings in the Phanerozoic and Proterozoic (on the example of sections of the cover and basement of the East European Platform)]. *Geochemistry international*, 2009, no. 8, pp. 805–824. (In Russ.)
33. Erofeev V. S., Cehovskij Ju. G. *Parageneticheskie asociacii kontinental'nyh otlozhenij (semejstvo aridnyh paragenезov. Jevoljucionnaja periodichnost')* [Paragenetic associations of continental sediments (family of arid parageneses. Evolutionary periodicity)]. Moscow, Nauka publ., 1983, 192 p. (In Russ.)
34. Judovich Ja. Je., Ketris M. P. Stroenie zony mezhformacionnogo kontakta na ruch. Al'kesvozh [Structure of the interformation contact zone on the stream. Alkesvozh]. V kn: *Geohimija drevnih tolshh Severa Urala – In the book: Geochemistry of ancient strata of the North of the Urals*, Syktyvkar, Geoprint publ., 2002, pp. 54–67.

Никулова Наталья Юрьевна, д.г.-м.н., в.н.с., Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, РФ; e-mail: Nikulova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0002-1511-6124

Гракова Оксана Васильевна, к.г.-м.н., н.с., Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, РФ; e-mail: ov-grakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0001-5917-9218

Симакова Юлия Станиславовна, к.г.-м.н., с.н.с., Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН), Сыктывкар, РФ; e-mail: simakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0003-0409-4019

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Natalia Yu. Nikulova, PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Senior Research Fellow, Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: Nikulova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0002-1511-6124

Oksana V. Grakova, PhD in Geol.-Min., Senior Research, Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0001-5917-9218

Yulia S. Simakova, PhD in Geol.-Min., Senior Research Fellow, Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: : simakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0003-0409-4019

Authors have read and approved the final manuscript.