

Геохимические характеристики метапесчаников алькесвожской толщи (Приполярный Урал)

©2022 Н. Ю. Никулова[✉], О. В. Гракова

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

Аннотация

Введение: Метатерригенные отложения позднекембрийско-раннеордовикской толщи, выполняющие депрессии допалеозойского рельефа в зоне контакта рифей-вендского комплекса доуралид и каледоно-герцинского комплекса уралид содержат многочисленные рудопроявления золота типа метаморфизованных россыпей. Источником кластогенного золота для пород алькесвожской толщи считается кембрийская кора выветривания по породам фундамента. Для уточнения генетической принадлежности, условий образования и источников обломочного материала палеонтологически немых метатерригенных отложений алькесвожской толщи проведено изучение распределения петрогенных окислов, редкоземельных и редких элементов.

Методика: Изучены петрографический состав и геохимические особенности метапесчаников алькесвожской толщи, отобранных в коренных выходах на водораздельной поверхности и восточном склоне хр. Малдынырд (Приполярный Урал).

Результаты и обсуждение: На основании интерпретации результатов химических анализов и особенностей распределения РЗЭ в метапесчаниках алькесвожской толщи на хр. Малдынырд сделаны выводы о накоплении терригенной толщи в эпиконтинентальной обстановке в умеренно-теплом климате. Прослежена зависимость геохимических характеристик алькесвожских метапесчаников от состава и степени преобразования в древней коре выветривания подстилающих вулканогенных образований рифейско-вендского фундамента. Аномально высокое содержание РЗЭ в метапесчаниках из основания алькесвожской толщи, сопровождающиеся высоким содержанием фосфора, связано с присутствием в породах монацита.

Заключение: Влияние на состав метапесчаников, залегающих в основании разреза, оказали измененные в коре выветривания кислые вулканы саблегорской свиты и базиты манарагского комплекса. Вверх по разрезу произошла смена источников обломочного материала и ведущую роль стали приобретать постепенно выводимые на уровень эрозионного вреза не измененные в коре выветривания основные магматические породы нижней подсвиты саблегорской свиты.

Ключевые слова: алькесвожская толща, метапесчаники, химический состав, обломочный материал, источники сноса, условия осадконакопления, Приполярный Урал.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках тем государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (регр. номера: 1021062311457-5-1.5.6 и 1021062211107-6-1.5.6)

Для цитирования: Никулова Н.Ю., Гракова О.В. Геохимические характеристики метапесчаников алькесвожской толщи (Приполярный Урал) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. № 4. С. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/69-82>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Никулова Наталия Юрьевна, e-mail: Nikulova@geo.komisc.ru

Введение

Алькесвожская толща является уникальным геологическим объектом – первым, выявленным на севере Урала источником коренного золота в метаморфизованных осадочных породах – древней метаморфизованной россыпью. В ходе тематических исследований по изучению допалеозойских кор выветривания в основании палеозойского разреза на хр. Малдынырд (Приполярный Урал) в 1986–1989 гг. В. С. Озеровым был обнаружен ряд рудопроявлений с высокими содержаниями золота, как потенциального источника благородных металлов (Озеров и др., 1989 г.; Пыстин, Озеров, 1986 г.). Золотоносная терригенная толща была названа алькесвожской по месту первого обнаружения – ручью Алькесвож, а ее возраст на основании взаимоотношения с подстилающими и перекрывающими образованиями определен как позднекембрийско-раннеордовикский (E_3-O_1al). Позднее, геологами ОАО "Полярноуралгеология" и Института геологии Коми научного центра УрО РАН были обнаружены и изучены многочисленные проявления золоторудной минерализации в отложениях алькесвожской толщи [1–3] и подстилающих их кислых вулканитах саблегорской свиты верхнего рифея [4–7], а проведенное U/Pb-изотопное датирование детритовых цирконов подтвердило позднекембрийско-нижнеордовикский возраст алькесвожской толщи [8]. Петрографический и минералогический состав слагающих алькесвожскую толщу литологических разновидностей горных пород подробно охарактеризован Л. И. Ефановой [3].

Алькесвожская толща представляет собой выполняющие депрессии допалеозойского рельефа континентальные образования на контакте глобальных тектонических комплексов – рифей-вендских доуралид и каледоно-герцинских уралид. Считается, что источником кластогенного золота для пород алькесвожской толщи была локально сохранившаяся в основании разреза уралид кембрийская кора выветривания (kvE_3) по слагающим ядро Малдинской синклинали кислым и основным вулканитам верхнерифейско-вендской саблегорской (RF_3-V_1sb) свиты.

Установление геохимических характеристик палеонтологически немых метатерригенных отложений алькесвожской толщи, сведения о составе петрогенных, редкоземельных и редких элементов необходимы для металлогенического прогнозирования, геологического картирования, корреляции разрезов. Данные о геохимических особенностях необычных для базальных горизонтов севера Урала отложений, позволяют уточнить полученные традиционными литологическими методами выводы о генетической принадлежности, условиях формирования и источниках обломочного материала золотоносной толщи.

Геологическое положение и строение алькесвожской толщи

На хр. Малдынырд отложения допалеозойского возраста представлены вулканогенными осадками

саблегорской (RF_3-V_1sb) свиты¹, прорванными базитами манарагского (βRF_3-V) комплекса и риолитами Малдинской субинтрузии ($\lambda \Pi V$) (рис. 1). В основании разреза уралид фрагментарно сохранились образования метаморфизованной кембрийской коры выветривания (kvE_3), на которых с несогласием залегают терригенная золотоносная алькесвожская толща (E_3-O_1al). Завершают разрез базальной части палеозоя отложения обеизской (O_1ob) и саледской (O_{1-2sl}) свит.

Метаморфизованные коры выветривания (kvE_3) сложены глиноземистыми и железистыми сланцам пиррофиллитового, серицит-пиррофиллитового и серицитового составов с переменными содержаниями гематита, диаспора, турмалина, кианита и хлоритоида.

Алькесвожская толща (E_3-O_1al), кроме долины руч. Алькесвож, закартированная еще в ряде пунктов на удалении до 15 км, выполняет депрессии допалеозойского рельефа, характеризуется резкой фациальной изменчивостью, как по вертикали, так и по латерали и включает три горизонта: нижний (базальный – гравелитовый), средний (псефитовый) и верхний (ритмичный или псаммитовый). Для всех литологических типов пород алькесвожской толщи характерно присутствие переотложенного глиноземистого и железистого материала коры выветривания – диаспора, пиррофиллита, серицита, гематита, что и явилось основанием для выделения (Озеров и др., 1989 г.). Мощность алькесвожских отложений, развитых только в контурах палеодепрессий, зависит от рельефа фундамента и изменяется от первых метров до 150 м [3].

Базальный горизонт алькесвожской толщи в естественных обнажениях имеет мощность от 2 до 7 м. По данным бурения, его максимальная мощность в понижениях допалеозойского рельефа достигает 20 м. Базальный горизонт сложен песчаниками, пудинговыми песчаниками и гравелитами.

В составе среднего – псефитового горизонта преобладает обломочный материал грубой размерности: гравелитов, пудинговых песчаников с примесью гравийного материала, конгломератов. Меньшим распространением пользуются разнозернистые песчаники и алевритистые сланцы. Мощность псефитового горизонта от 40 до 62 м.

Верхний (ритмичный) горизонт представлен тонко переслаивающимися песчаниками и алевросланцами и образует многочисленные развалы на плоской водораздельной поверхности хр. Малдынырд.

Перекрывающая алькесвожскую толщу обеизская свита (O_1ob) на хр. Малдынырд сложена более чем 300-метровой толщей конгломератов с прослоями гравелитов и толщей вишневого кварцитопесчаников в основании разреза. Кварцитопесчаники встречаются

¹ Описание геологического строения приведено по отчету: «Промышленная оценка золоторудных проявлений Алькесвожского участка на хребте Малдынырд», авторы Ефанова Л. И., Онищенко Л. В. и др. Сыктывкар. ЗАО «Голдминералс». 2005 г.

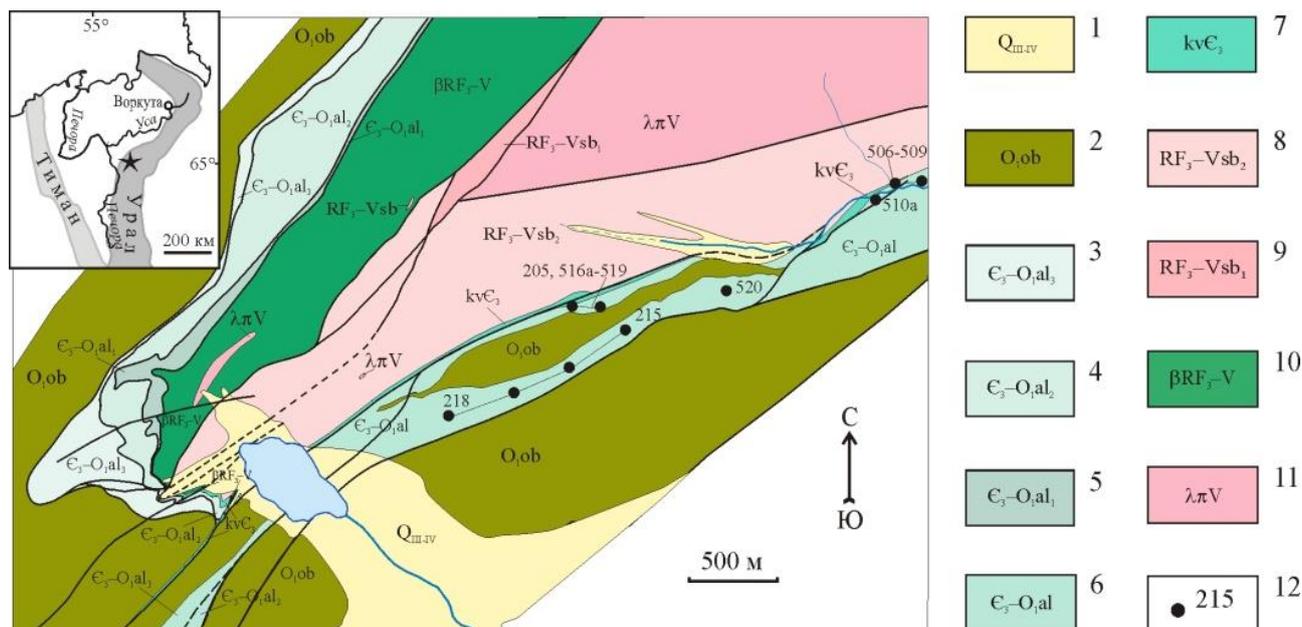


Рис. 1. Схематическая геологическая карта южной части хр. Малдынырд (по: Ефанова и др., 2005 г.). Условные обозначения: 1 – современные делювиально-солифлюкционные отложения; 2 – раннеордовикские отложения обеизской свиты: конгломераты, гравелиты, песчаники, кварцитопесчаники; 3–7 – позднекембрийско-раннеордовикские отложения алькесвожской толщи: 3 – верхний горизонт: тонкое переслаивание алевросланцев и мелкозернистых песчаников; 4 – средний горизонт: гравелиты, песчаники, конгломераты; 5 – нижний горизонт: гравелиты, конгломераты, песчаники, сланцы; 6 – нерасчлененные отложения: песчаники, гравелиты; позднекембрийско-раннеордовикские отложения алькесвожской толщи: 7 – кембрийские метаморфизованные коры выветривания: сланцы; 8–11 – позднекембрийско-раннеордовикские 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 – места отбора проб.

[Fig. 1. Schematic geological map of the southern part of the Maldynyrd range (by: Efanova et al., 2005). Legend: (1) – modern deluvial-solifluction deposits; (2) Early Ordovician deposits of the Obeiz formation: conglomerates, gravelstones, sandstones, quartzitic sandstones; (3–7) – Late Cambrian-Early Ordovician deposits of the Alkesvozhskaya stratum: (3) – upper horizon: thin interbedding of shaly silts and fine-grained sandstones; (4) – medium horizon: gravelstones, sandstones, conglomerates; (5) – lower horizon: gravelstones, conglomerates, sandstones, shales; (6) – poorly defined formations: sandstones, gravelstones; Late Riphean-Vendian volcanogenic rocks of the Sablegor formation: rhyolites, tuffs, and lava-breccias of acid composition; (7) – Cambrian metamorphised weathering crusts: shales; (8–11) – Late Riphean-Vendian metamorphised volcanogenic rocks of the Sablegor formation (8) – rhyolites, lava-breccias, clastolaves; (9) – metabasites and metaandesites; (10) – metadolerites, metagabbro, Manaragsky complex; (11) – rhyolites, rhyolite porphyries, Maldinsky complex; (12) – sampling sites.]

лишь там, где развиты отложения алькесвожской толщи, и залегают на ее различных горизонтах с угловым несогласием 15–20°. Основной объем разреза свиты слагают олигомиктовые кварц-кварцитовые конгломераты, залегающие как на кварцитопесчаниках, так и на породах фундамента.

Материалы и методы

Изучены образцы среднезернистого светлорозовато-серого слюдяного метапесчаника алькесвожской толщи, отобранные в коренных выходах у подножья на восточном склоне хр. Малдынырд, на участке «трубка Неудачная» на водораздельной поверхности и в борту долины ручья Алькесвож (рис. 1). Петрографический состав песчаников изучался в прозрачных шлифах. Содержания породообразующих оксидов в породах определялись традиционным весовым химическим методом в лаборатории химии минерального сырья. Определение содержаний редких и редкоземельных элементов проводилось на масс-спектрометре с индуктивной связанной плазмой Agilent 7700х. Для перевода пробы в раствор исполь-

зовался 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. Все аналитические работы проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Интерпретация результатов химических анализов проводилась с использованием индикаторных соотношений и коэффициентов, применяющихся для выяснения условий образования отложений.

Петрографическая и геохимическая характеристика метапесчаников

Для алькесвожских метапесчаников характерны гранобластовая структура и сланцеватая за счет ориентировки чешуек слюды текстура (рис. 2). Обломки различной степени окатанности представлены кварцем, обломками микрокристаллической кварцевой породы и пелитизированным полевым шпатом. Базальный кварц-хлорит-серицитовый цемент занимает около 20 % площади шлифа. Акцессорные минералы

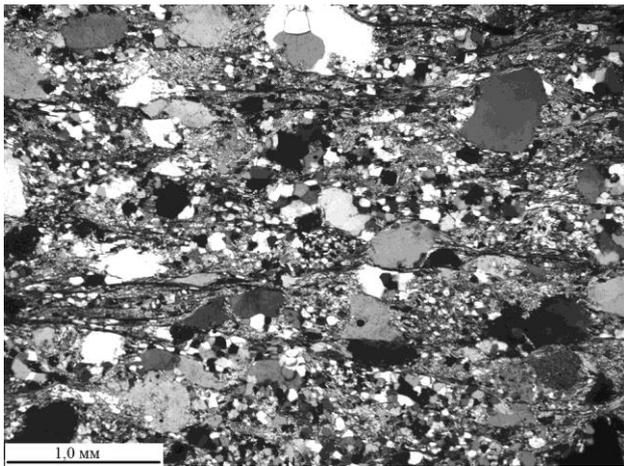


Рис. 2. Гранобластовая структура, сланцеватая текстура метапесчаников алькесвожской толщи. Николи +.
[Fig. 2. Granoblastic texture, foliaceous structure of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum. Nikoli +.]

представлены обломочными зернами эпидота, циркона и новообразованными апатитом, титанитом и турмалином.

Последний часто образует цепочки зерен вдоль сланцеватости. Гематит встречается в виде отдельных пластинчатых зерен и тонкодисперсного пигмента в цементе. В протолочной пробе встречены: рутил, ильменит, хромит, хлоритоид, монацит, ксенотим, ортит, дистен, фуксит и магнетит.

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

Метапесчаники алькесвожской толщи содержат незначительное количество щелочей при резком преобладании калия над натрием и на диаграмме K_2O-Na_2O [13] все фигуративные точки расположены в поле аркозов, что предполагает присутствие в области питания кислых магматических пород (рис. 3а). На диаграмме $\log(Fe_2O_{3\text{общ}}/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$ [14] точки метапесчаников распределены между полями лититов и аркозов (рис. 3б). На диаграмме $SiO_2-(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)-(Fe_2O_3+FeO+MgO+MnO+TiO_2)$ [9] точки расположены в поле олигомиктовых песчаников (рис 3б, с).

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

N обр.	506	507	508	509	510a	516a	205	517 г	518	519	520	215	216	217	218
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	75.52	78.94	74.68	83.88	80.36	79.58	76.97	84.23	81.47	83.28	79.98	84.07	82.55	83.27	85.01
TiO ₂	1.30	0.63	0.67	0.46	1.43	0.72	0.94	0.59	0.99	0.65	0.78	0.43	0.41	0.59	0.60
Al ₂ O ₃	9.72	9.17	11.89	7.69	8.64	10.3	11.00	7.57	10.57	8.57	8.36	7.20	7.34	6.15	6.63
Fe ₂ O ₃	6.00	3.28	3.30	2.00	4.31	3.67	3.87	3.65	1.70	2.37	3.83	2.59	2.02	2.64	2.43
FeO	0.48	0.6	0.55	0.8	0.53	0.41	0.45	0.63	0.65	0.43	0.69	0.67	0.72	0.42	0.69
MnO	0.045	0.070	0.085	0.061	0.009	0.090	0.009	0.009	0.0041	0.009	0.040	0.019	0.034	0.110	0.025
MgO	0.63	1.15	1.34	0.54	0.25	0.08	0.40	0.09	0.40	0.40	0.55	0.55	0.54	0.40	0.70
CaO	0.57	0.44	0.57	0.57	0.34	0.23	0.11	0.30	0.40	0.22	0.30	0.10	0.22	1.12	0.22
Na ₂ O	0.19	0.46	0.31	0.37	0.20	0.28	0.26	0.14	0.31	0.22	0.23	0.22	0.39	0.20	0.22
K ₂ O	3.21	3.00	4.27	2.59	2.69	2.88	3.36	1.38	2.85	2.50	2.76	2.50	2.75	2.26	2.28
P ₂ O ₅	0.082	0.086	0.095	0.046	0.020	0.11	0.081	0.08	0.056	0.037	0.14	0.027	0.046	0.046	0.057
ппп	1.53	1.68	2.42	1.23	1.80	1.43	1.63	1.27	1.07	1.27	1.40	1.21	1.40	2.59	1.04
Сумма	99.28	99.51	100.18	100.24	100.58	99.78	99.08	99.94	100.47	99.96	99.06	99.59	98.42	99.80	99.90
$\log(Na_2O/K_2O)$	-1.23	-0.81	-1.14	-0.85	-1.13	-1.01	-1.11	-0.99	-0.96	-1.06	-1.08	-1.06	-0.85	-1.05	-1.02
$\log(SiO_2/Al_2O_3)$	0.89	0.93	0.80	1.04	0.97	0.89	0.84	1.05	0.89	0.99	0.98	1.07	1.05	1.13	1.11
$\log(Fe_2O_{3\text{общ}}/K_2O)$	0.27	0.04	-0.11	-0.11	0.20	0.11	0.06	0.42	-0.22	-0.02	0.14	0.02	-0.13	0.07	0.03
A	0.13	0.12	0.16	0.09	0.11	0.13	0.14	0.09	0.13	0.10	0.10	0.09	0.09	0.07	0.08
F	8.46	5.73	5.95	3.86	6.53	4.97	5.67	4.97	3.74	3.86	5.89	4.26	3.72	4.16	4.45
M	3.97	3.90	5.15	3.53	3.23	3.39	3.73	1.82	3.56	2.94	3.29	2.82	3.36	3.58	2.72
ГМ	0.23	0.17	0.22	0.13	0.19	0.19	0.21	0.15	0.17	0.14	0.17	0.13	0.13	0.12	0.12
Na ₂ O+ K ₂ O	3.40	3.46	4.58	2.96	2.89	3.16	3.62	1.52	3.16	2.72	2.99	2.72	3.14	2.46	2.50

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
HKM	0.35	0.38	0.39	0.38	0.33	0.31	0.33	0.20	0.30	0.32	0.36	0.38	0.43	0.40	0.38
TM	0.13	0.07	0.06	0.06	0.17	0.07	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.06	0.06	0.10	0.09
F1	-5.05	-3.60	-3.52	-3.67	-5.37	-4.05	-4.17	-4.12	-3.86	-4.10	-3.70	-4.05	-3.56	-4.21	-3.96
F2	-0.02	-0.18	-1.83	-1.64	-0.10	-1.05	-0.97	0.12	-1.20	-0.90	0.05	-1.26	-0.93	0.10	-0.30
F3	1.69	3.43	5.07	3.75	3.09	1.01	2.62	-4.44	3.79	2.75	2.08	2.87	4.95	5.05	5.14
F4	1.92	2.54	3.05	1.05	3.52	-1.10	1.01	-3.45	2.92	1.32	0.95	0.50	1.23	2.78	4.14
CIA	67	66	66	63	69	72	72	77	71	71	68	69	65	56	67
CIW	88	85	88	82	90	92	94	91	89	91	90	93	88	72	90
ICV	1.2	1.2	1.0	1.00	1.1	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.1	1.0	1.0	1.4	1.1
K ₂ O/Na ₂ O	16.89	6.52	13.77	7.00	13.45	10.29	12.92	9.86	9.19	11.36	12.00	11.36	7.05	11.30	10.36
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	7.77	8.61	6.28	10.91	9.30	7.73	7.00	11.13	7.71	9.72	9.57	11.68	11.25	13.54	12.82
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.13	0.12	0.16	0.09	0.11	0.13	0.14	0.09	0.13	0.10	0.10	0.09	0.09	0.07	0.08
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.33	0.33	0.36	0.34	0.31	0.28	0.31	0.18	0.27	0.29	0.33	0.35	0.37	0.37	0.34

Примечания [Note]: A=Al₂O₃/SiO₂; F=TiO₂+Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO; M= CaO+Na₂O+K₂O [9]

F1=0.303-0.447SiO₂-0.972TiO₂+0.008Al₂O₃-0.267Fe₂O₃+0.208FeO-3.082MnO+0.14MgO+0.195CaO+0.719Na₂O-0.032K₂O+7.51P₂O₅; F2=43.57-0.421SiO₂+1.988TiO₂-0.526Al₂O₃-0.551Fe₂O₃-1.61FeO+2.72MnO+0.881MgO-0.907CaO-0.177Na₂O-1.84K₂O+7.244P₂O₅ [10];

F3=30.638TiO₂/Al₂O₃-12.54Fe₂O₃общ/Al₂O₃+7.329MgO/Al₂O₃+12.031NaO/Al₂O₃+35.402K₂O/Al₂O₃-6.382; F4=56.5TiO₂/Al₂O₃-10.897Fe₂O₃общ/Al₂O₃+30.875MgO/Al₂O₃-5.404Na₂O/Al₂O₃+11.112K₂O/Al₂O₃-3.89 [11];

GM=(Al₂O₃+TiO₂+Fe₂O₃+FeO+MnO)/SiO₂; HKM=(N₂O+K₂O)/Al₂O₃; TM=TiO₂/Al₂O₃[12]

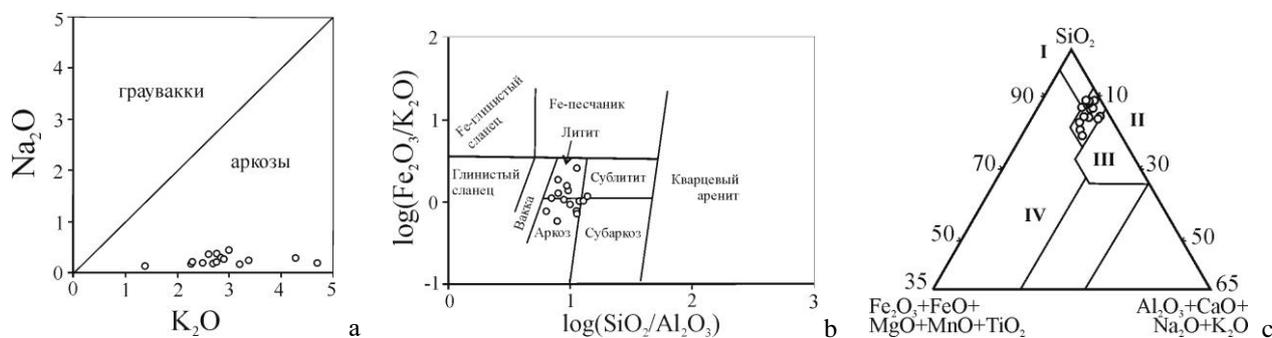


Рис. 3. Положение фигуративных точек составов метапесчаников алькесвожской толщи на классификационных диаграммах: а – K₂O–N₂O [13]; б – log(Fe₂O₃общ/K₂O)–log(SiO₂/Al₂O₃) [14]; в – SiO₂–(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)–(Fe₂O₃+FeO+MgO+MnO+TiO₂) [9]. Условные обозначения: I–IV – песчаники: I – кварцевые; II – олигомиктовые; III – полимиктовые; IV – вулканомиктовые.

[Fig. 3. Position of the figurative points of the metasandstone compositions of the Alkesvozhskaya stratum in the classification diagrams: (a) – K₂O–N₂O [13]; (b) – log(Fe₂O₃общ/K₂O)–log(SiO₂/Al₂O₃) [14]; (c) – SiO₂–(Al₂O₃+CaO+Na₂O+K₂O)–(Fe₂O₃+FeO+MgO+MnO+TiO₂) [9]. Legend: (I–IV) – sandstones: (I) – quartz; (II) – oligomictic; (III) – polymictic; (IV) – volcanomictic.]

На диаграммах A–F и A–M [9] и (FeO+MgO)/(Al₂O₃+K₂O)–SiO₂ [15], показывающих степень зрелости псаммитов и участие в их составе магматических пород, большинство фигуративных точек метапесчаников оказались вблизи или в полях кислых вулкаников (рис. 4а–с). По значениям гидролизатного модуля (ГМ) метапесчаники алькесвожской толщи относятся к нормо- и гиперсилитам (рис. 5а) – кремниевым аквагенным породам [12]. Значение НКМ для большинства метапесчаников превышает 0.3 (рис. 5б), что, по дан-

ным Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, является признаком присутствия в породе неизмененного калиевого полевого шпата [12]. Значения титанового модуля метапесчаников соответствуют нормо- и гипертитанистым породам (рис. 5с). Повышенная титанистость отражает особенности петрофонда – наследование материала коры выветривания по основным вулканикам и возможную концентрацию тяжелых титаносодержащих минералов в естественном шлихе. Минералами-носителями титана являются титанит, рутил и ильменит.

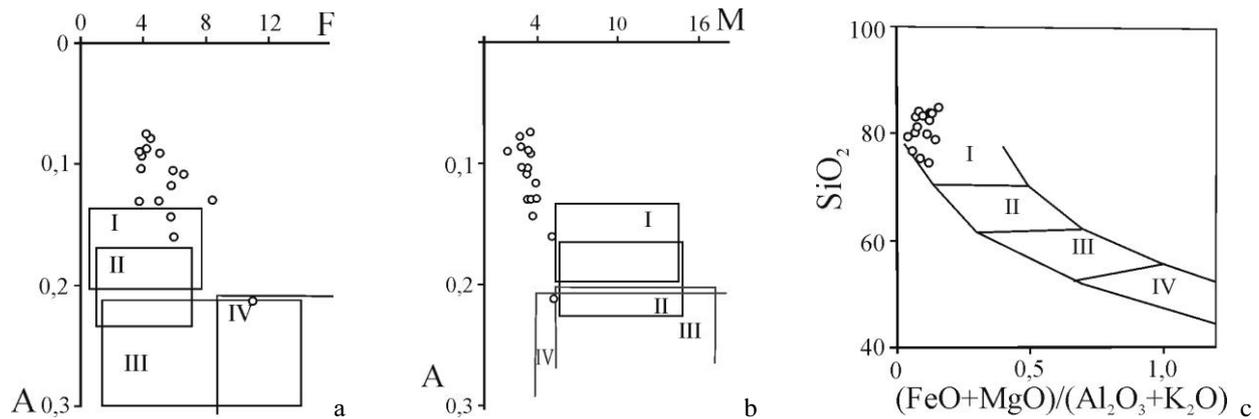


Рис. 4. Положение точек составов метапесчаников алькесвожской толщи на диаграммах: *a* – A–F; *b* – A–M [9], где: A=Al₂O₃/SiO₂; F=TiO₂+Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO; M=CaO+Na₂O+K₂O; I – липаритодациты; II – граниты; III – гранодиориты; IV – андезитобазальты; *c* – (FeO+MgO)/(Al₂O₃+K₂O)–SiO₂; где: I – риолиты, граниты; II – дациты, гранодиориты; III – андезиты, диориты; IV – базальты, габбро [15].

[Fig. 4. Position of the points of the metasandstone compositions of the Alkesvozhskaya stratum in the diagrams: (a) – A–F; (b) – A–M [9], where: A=Al₂O₃/SiO₂; F=TiO₂+Fe₂O₃+FeO+MnO+MgO; M=CaO+Na₂O+K₂O; (I) – liparite-dacites; (II) – granites; (III) – granodiorites; (IV) – basaltic andesites; (c) – (FeO+MgO)/(Al₂O₃+K₂O)–SiO₂; where: (I) – rhyolites, granites; (II) – dacites, granodiorites; (III) – andesites, diorites; (IV) – basalts, gabbro [15].]

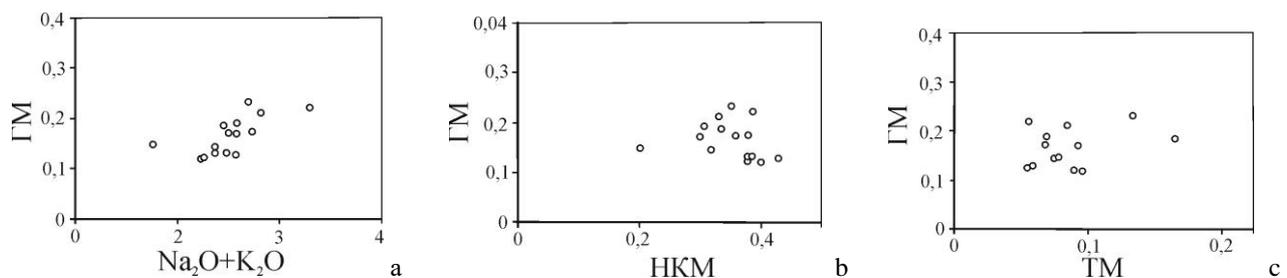


Рис. 5. Положение фигуративных точек составов метапесчаников алькесвожской толщи на модульных диаграммах: *a* – (Na₂O+K₂O)–GM; *b* – НКМ–GM; *c* – ТМ–GM [12].

[Fig. 5. Position of the figurative points of the metasandstone compositions of the Alkesvozhskaya stratum in modular diagrams: (a) – (Na₂O+K₂O) – GM; (b) – NCM–GM; (c) – TM–GM [12].]

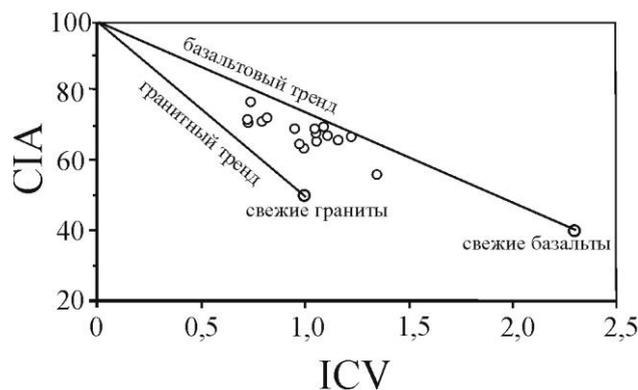


Рис. 6. Положение фигуративных точек метапесчаников алькесвожской толщи на диаграмме ICV–CIA [18].

[Fig. 6. Position of the figurative points of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum in the ICV–CIA diagram [18].]

Значения индекса химического выветривания CIA [16] изменяются от 63 до 72, что соответствует обстановке умеренно теплого климата в области размыва (табл. 1). Индекс изменения состава ICV [17] от 0.7 до 1.4 отражает содержание в метапесчаниках обломочного материала различной степени седиментационной зрелости (табл. 1). На диаграмме ICV–CIA [18]

большинство фигуративных точек метапесчаников алькесвожской толщи, расположены между линиями гранитов и базальтов, несколько точек тяготеют к центральной части базальтового тренда, соответствующей средней степени выветрелости обломочного материала (рис. 6).

Индекс выветривания CIW [10] находится в ин-

тервале 82–92 и, лишь в обр. 217, содержащем максимальное для всех изученных образцов количество СаО (1.12 мас. %) уменьшается до 72. В шлифе этого песчаника встречены единичные идиоморфные зерна карбоната, размеры которых сопоставимы с размерами обломочных зерен.

Значения калиевого модуля K_2O/Al_2O_3 [17], отражающего степень переработки материала в области размыва для большинства образцов превышает значение 0.3, соответствующее породам, содержащим невыветрелый обломочный материал (табл. 1), в трех образцах близок к нему, а в метапесчанике обр. 517г, существенно ниже. Низкое (0.18) значение

калиевого модуля указывает на присутствие в составе породы материала коры выветривания.

На всех диаграммах, применяемых для реконструкции палеогеодинамических условий, точки метапесчаников алькесвожской толщи попали в области пород, образованных в условиях пассивной континентальной окраины (рис. 7).

Содержания РЗЭ, малых и редких элементов, рассчитанные индикаторные соотношения, используемые при реконструкции состава материнских пород и условий формирования для метапесчаников алькесвожской толщи, приведены в Таблице 2.

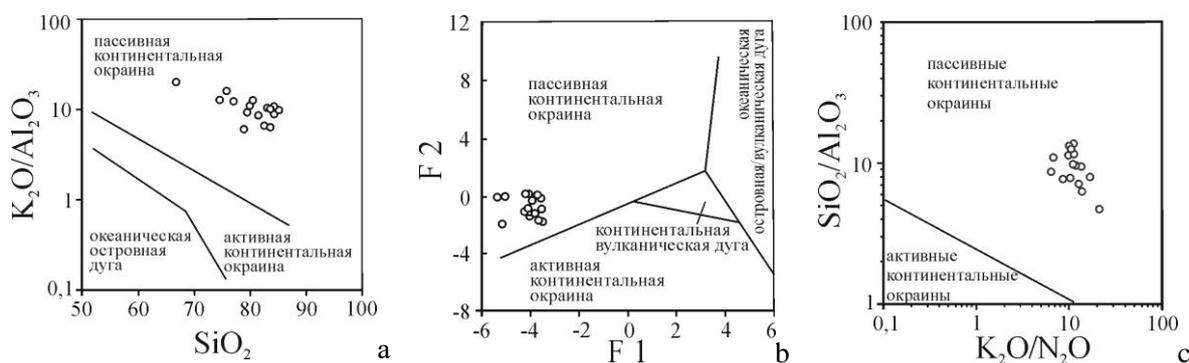


Рис. 7. Положение фигуративных точек составов метапесчаников алькесвожской толщи на диаграммах: а – $SiO_2 - K_2O/Na_2O$ [11]; б – $F1 - F2$ [10]; в – $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ [19].

[Fig. 7. Position of the figurative points of the metapsandstone compositions of the Alkesvozhskaya stratum in the diagrams: (a) – $SiO_2 - K_2O/Na_2O$ [11]; (b) – $F1 - F2$ [10]; (c) – $K_2O/Na_2O - SiO_2/Al_2O_3$ [19].]

Табл. 2. Содержания РЗЭ, малых и редких элементов в метапесчаниках алькесвожской толщи, г/т
[Table 2. Content of REE, small and rare elements the metapsandstones of the Alkesvozhskaya stratum, g/t]

N обр.	506	507	508	509	510 а	516а	205	517 г	518	519	520	215	216	217
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sc	0.66	0.56	0.48	0.02	0.57	0.54	0.59	0.36	0.60	0.50	0.40	0.24	0.19	0.14
V	0.79	0.35	0.41	0.27	0.22	0.21	0.42	0.17	0.31	0.19	0.28	0.24	0.33	0.32
Cr	1.01	0.60	0.70	0.83	0.49	0.43	0.75	1.00	0.34	0.68	0.81	0.48	0.71	0.82
Co	0.90	0.43	0.54	0.44	0.35	0.30	0.20	0.09	0.12	0.09	0.60	0.83	0.42	0.43
Ni	0.54	0.34	0.39	0.42	0.28	0.26	0.38	0.25	0.21	0.21	0.33	0.34	0.30	0.29
Cu	0.05	0.06	0.11	0.09	0.09	0.09	0.02	0.12	0.06	0.05	0.06	0.15	0.13	0.09
Zn	0.39	0.37	0.63	0.31	0.11	0.07	0.04	0.12	0.05	0.03	0.22	0.33	0.37	0.26
Ga	0.69	0.57	0.77	0.58	0.69	0.91	0.96	0.46	0.70	0.59	0.48	0.52	0.49	0.41
Rb	1.02	0.83	1.18	0.84	0.64	0.54	0.73	0.37	0.55	0.49	0.66	0.76	0.81	0.68
Sr	0.04	0.06	0.07	0.06	0.07	0.22	0.74	1.67	0.65	0.37	0.06	0.06	0.05	0.15
Y	0.50	1.02	0.54	0.63	0.26	1.08	1.11	0.39	0.30	0.28	0.46	0.51	0.89	0.95
Zr	13.01	3.61	4.75	3.39	5.62	3.49	8.14	3.63	6.24	4.66	3.36	2.78	2.90	3.11
Nb	1.46	0.39	0.46	0.34	0.83	0.39	1.01	0.60	1.01	0.67	0.47	0.31	0.34	0.46
Mo	3.04	3.23	2.92	8.48	3.17	2.06	4.45	9.61	2.39	6.87	5.97	2.82	5.15	7.13
Cs	0.47	0.65	0.92	0.67	0.27	0.19	0.22	0.15	0.17	0.16	0.46	0.61	0.71	0.67
Ba	0.43	0.50	0.78	0.51	0.35	0.79	0.32	0.18	0.24	0.20	0.69	0.41	0.49	0.36
La	1.04	0.66	0.59	0.47	0.44	1.50	1.79	1.03	1.44	1.06	0.54	0.34	0.44	0.63
Ce	1.21	0.58	0.49	0.49	0.47	2.02	2.01	1.05	1.44	1.08	0.45	0.32	0.64	0.59
Pr	1.27	0.63	0.47	0.50	0.46	4.16	2.04	1.15	1.52	1.18	0.55	0.34	0.51	0.70
Nd	1.33	0.65	0.44	0.52	0.49	7.79	2.29	1.17	1.52	1.25	0.56	0.38	0.54	0.73

Продолжение Табл. 2
[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sm	1.44	0.82	0.44	0.59	0.50	15.07	3.30	1.46	1.46	1.33	0.73	0.62	0.72	0.88
Eu	1.34	1.25	0.81	0.79	0.52	3.39	2.22	1.27	1.09	0.99	1.08	0.87	1.11	1.21
Gd	1.62	1.22	0.73	0.85	0.57	6.06	3.32	1.93	1.87	1.50	0.94	0.84	1.11	1.23
Tb	0.94	1.00	0.52	0.68	0.36	3.40	1.83	1.08	0.87	0.68	0.72	0.68	0.95	1.02
Dy	0.64	1.02	0.52	0.65	0.34	1.71	1.25	0.62	0.47	0.38	0.77	0.62	0.94	0.98
Ho	0.52	0.88	0.51	0.59	0.31	1.00	1.00	0.47	0.38	0.33	0.55	0.51	0.82	0.83
Er	0.55	0.90	0.57	0.60	0.35	0.94	1.01	0.49	0.46	0.46	0.52	0.48	0.85	0.89
Tm	0.67	0.92	0.68	0.67	0.40	0.61	1.00	0.50	0.52	0.46	0.56	0.52	0.84	0.88
Yb	0.69	0.86	0.71	0.59	0.44	0.52	0.92	0.50	0.56	0.49	0.56	0.48	0.77	0.83
Lu	0.76	0.81	0.87	0.59	0.50	0.48	0.90	0.60	0.60	0.50	0.59	0.50	0.70	0.81
Hf	1.48	0.41	0.51	0.40	0.74	0.48	0.96	0.54	0.89	0.68	0.47	0.32	0.34	0.38
W	1.18	0.47	0.72	0.79	1.33	1.16	0.83	0.76	0.72	0.63	0.68	0.33	0.29	0.42
Pb	0.23	0.38	0.49	0.45	0.20	0.11	0.07	0.61	0.12	0.07	0.37	0.41	0.32	0.42
Th	1.64	0.71	0.57	0.61	1.26	0.91	1.18	1.27	1.82	1.36	3.21	0.37	0.60	0.83
U	1.43	0.38	0.48	0.36	1.25	0.68	0.79	0.45	0.69	0.61	0.60	0.31	0.27	0.35
Th/Co	1.16	1.00	0.67	0.89	2.20	1.91	3.71	9.30	10.00	9.90	3.40	0.30	0.92	1.20
La/Sc	3.77	2.80	2.88	61.80	1.90	6.59	7.21	6.90	6.00	5.00	3.20	3.30	5.59	10.0
La _N /Yb _N	13.91	7.03	7.52	7.37	9.29	26.48	17.92	18.87	23.37	19.70	8.83	6.46	5.27	6.94
Eu/Eu*	0.57	0.82	0.93	0.73	0.63	0.19	0.43	0.49	0.43	0.45	0.85	0.79	0.81	0.76
Gd _N /Yb _N	3.20	1.93	1.40	1.98	1.78	15.92	4.92	5.23	4.51	4.15	2.28	2.37	1.97	2.01
Ce/Ce*	1.06	0.92	0.95	1.03	1.06	0.70	1.06	0.98	0.99	0.98	0.84	0.96	1.36	0.91
La/Th	1.66	2.44	2.69	2.01	0.92	4.29	3.95	2.12	2.06	2.02	0.44	2.40	1.91	1.98
Th/Sc	2.27	1.15	1.07	30.79	2.02	1.54	1.83	3.27	2.76	2.47	7.34	1.39	2.92	5.25
Zr/Sc	25.97	8.41	12.92	246.24	13.00	8.49	18.09	13.41	13.62	12.17	11.05	15.04	20.29	28.36
Cr/Th	4.63	6.40	9.31	10.21	2.91	3.61	4.77	5.90	1.43	3.75	1.89	9.83	8.92	7.48
LREE	200	104	83	82	78	593	342	181	242	185	85	58	95	107
HREE+Y	29	45	26	29	14	73	60	27	23	20	25	25	40	43
∑ REE	230	149	109	111	92	666	401	208	265	206	109	83	135	150
∑Ce/∑Y	6.81	2.30	3.23	2.85	5.37	8.09	5.72	6.70	10.36	9.21	3.39	2.37	2.38	2.51

Примечание: Ce/Ce* = (Ce_N/La_N+Pr_N)/2, нормировано к глинам платформ [20]; Eu/Eu = Eu_N/(Sm_N+Gd_N)/2, La_N/Yb_N, нормировано на хондрит [21].

[Note: Ce/Ce* = (Ce_N/La_N+Pr_N)/2, normalized to platform clays [20]; Eu/Eu = Eu_N/(Sm_N+Gd_N)/2, La_N/Yb_N, normalized to chondrite [21].]

Суммарные содержание РЗЭ в метапесчаниках алькесвожской толщи изменяется от 83 до 666 г/т (табл. 2). Наибольшие количества REE и, в частности, аномально высокие содержания LREE, отмечаются метапесчаниках обр. 516а, содержащих наибольшее количество Р₂О₅, входящего в состав монацита, ксенотима, флоренсита, голяцита и других.

Графики распределения РЗЭ в метапесчаниках алькесвожской толщи по характеру наклона кривых и интенсивности европиевого минимума делятся на два типа: относительно крутые в области LREE и ярко проявленным европиевым минимумом; пологие со слабо выраженным европиевым минимумом.

(рис. 8). В первую группу попали образцы метапесчаников из базальной части, во вторую – отобранные в нескольких метрах от основания разреза алькесвожской толщи. Образцы метапесчаников из первой группы характеризуются высокой степенью

фракционирования РЗЭ – отношение La_N/Lu_N составляет 13.91–23.37, для второй группы этот показатель существенно меньше – 5.27–9.29. По сравнению с PAAS метапесчаники первой группы обогащены LREE и обеднены HREE. Содержания REE в метапесчаниках второй группы близки к PAAS. Значения Eu/Eu* для метапесчаников первой группы 0.19–0.57, что несколько ниже осадочных пород фанерозоя, для второй – 0.63–0.85 – близки к значениям субщелочных базальтов [20].

Отношение Ce/Ce* в метапесчаниках алькесвожской толщи соответствует значениям, характерным для эпиконтинентальных обстановок и составляет 0.84–1.36 (в обр. 516а – 0.7) [22].

Сделать предположения о составе пород областей питания позволяют диаграммы La/Sc–Th/Co, Yb_N–La_N/Yb_N, Gd_N/Yb_N–Eu/Eu* и Hf–La/Th, (рис. 9а–с). На диаграмму La/Sc–Th/Co [23], для сравнения нанесены

средние составы архейских, протерозойских гранитов, а также гранитов Малдинского гранитного массива и обрамляющих их вулканитов малдинского комплекса. На этой диаграмме все фигуративные точки метапесчаников алькесвожской толщи локализованы в области продуктов разрушения кислых пород и по составу наиболее близки к среднепротерозойским гранитам и гранитам Малдинского комплекса (рис. 9а). На диа-

грамме Yb_N-La_N/Yb_N [24] точки алькесвожских метапесчаников находятся в области перекрытия полей архейской тоналит-тродьемит-гранитной ассоциации и постархейских гранитоидов (рис. 9б). На диаграмме $Gd_N/Yb_N-Eu/Eu^*$ [25] большинство точек метапесчаников алькесвожской толщи расположены вне выделенных полей. Максимальными значениями отношения Gd_N/Yb_N характеризуются метапесчаники из

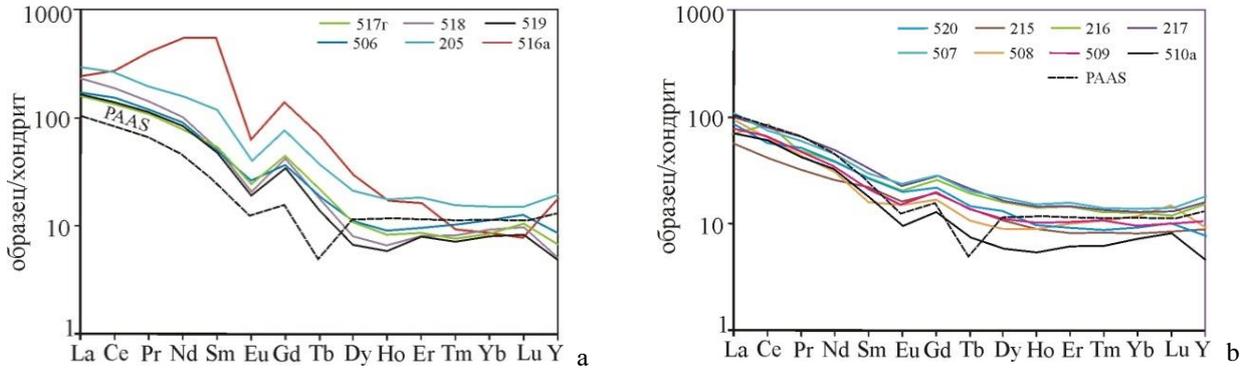


Рис. 8. Нормированные на хондрит [21] спектры распределения содержаний РЗЭ в метапесчаниках алькесвожской толщи. [Fig. 8. Normalised to chondrite [21] spectra of REE content distribution in the metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum.]

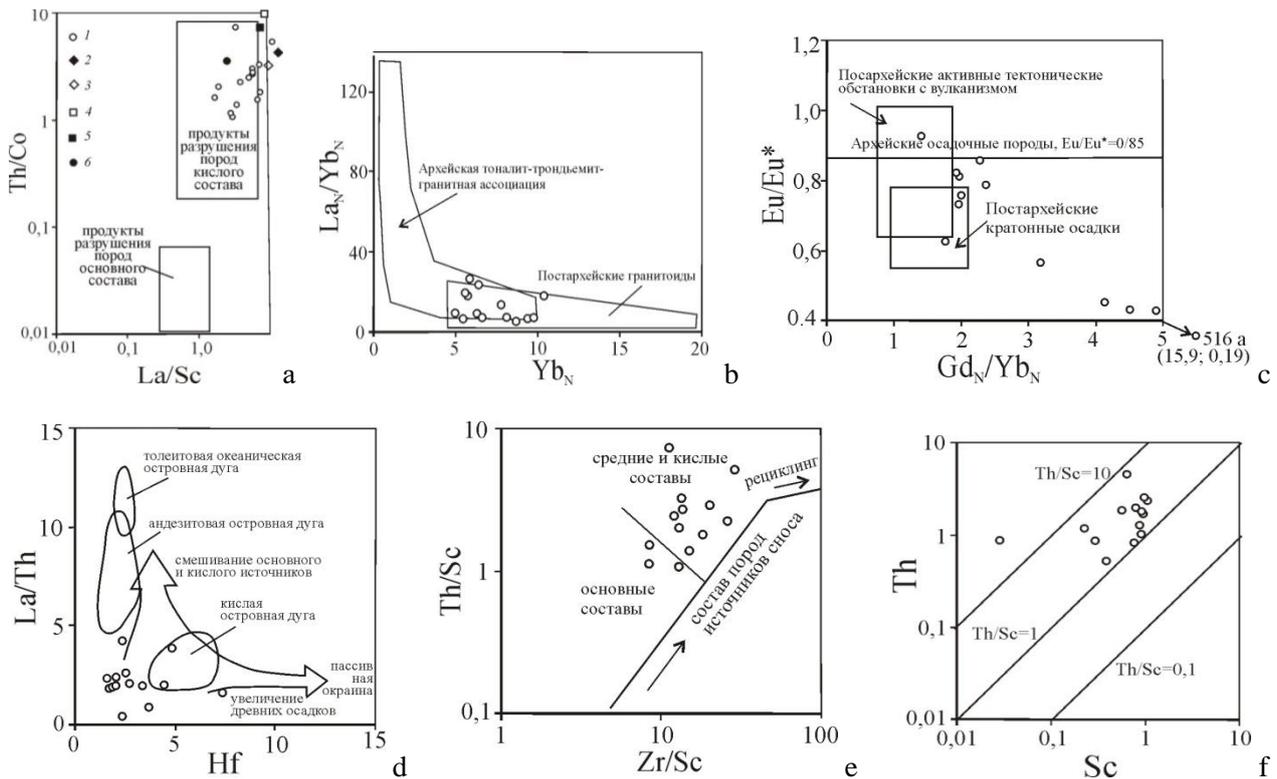


Рис. 9. Положение фигуративных точек метапесчаников алькесвожской толщи на диаграммах: а – $La/Sc-Th/Co$ [23]; б – Yb_N-La_N/Yb_N [24]; в – $Gd_N/Yb_N-Eu/Eu^*$ [25]; д – $Hf-La/Th$ [26]. Условные обозначения: 1 – кварцитопесчаники воротинской толщи; 2 – средний архейский гранит [28]; 3 – средний протерозойский гранит [28]; 4 – средний состав риолитов малдинского комплекса [29]; 5 – средний состав дацитов малдинского комплекса [29]; 6 – средний состав гранитов Малдинского гранитоидного массива [29]; е – $Zr/Sc-Th/Sc$ [27]; ф – $Sc-Th$ [21].

[Fig. 9. Position of the figurative points of the metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum in the diagrams: (a) – $La/Sc-Th/Co$ [23]; (b) – Yb_N-La_N/Yb_N [24]; (c) – $Gd_N/Yb_N-Eu/Eu^*$ [25]; (d) – $Hf-La/Th$ [26]. Legend: (1) – quartzitic sandstones of the Vоротinsky stratum; (2) – average Archean granite [28]; (3) – average Proterozoic granite [28]; (4) – average composition of rhyolites of the Maldinsky complex [29]; (5) – average composition of dacites of the Maldinsky complex [29]; (6) – average composition of granites of the Maldinsky granitoid massif [29]; (e) – $Zr/Sc-Th/Sc$ [27]; (f) – $Sc-Th$ [21].]

основания толщи (рис. 9с). Точки метапесчаников алькесвожской толщи на диаграмме Hf–La/Th [26] располагаются в основании трендов кислого и основного составов, а два состава метапесчаников из основания свиты обнаруживают связь с породами, образованными в условиях кислой островной дуги (рис. 9d). Отношения Zr/Sc–Th/Sc [27] для большинства образцов метапесчаников соответствуют породам, унаследовавшим обломочный материал среднего состава (рис. 9е). На диаграмме Sc–Th [21] точки метапесчаников алькесвожской толщи располагаются в интервале отношений Th/Sc от 1 до 10, соответствующем породам, в обломочной части которых преобладает материал изверженных пород кислого состава (рис. 9f).

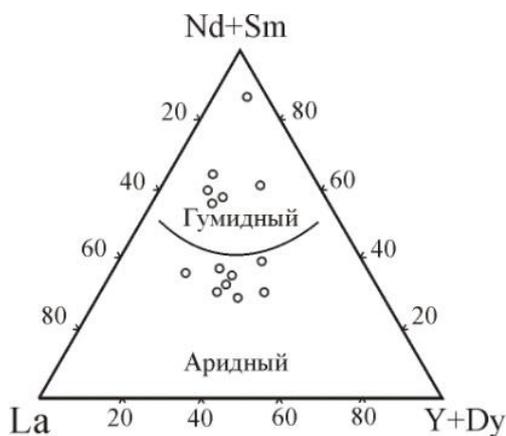


Рис. 10. Положение фигуративных точек метапесчаников алькесвожской толщи на диаграмме La–(Nd+Sm)–(Y+Dy) [30].
[Fig. 10. Position of the figurative points of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum in the La–(Nd+Sm)–(Y+Dy) diagram [30].]

Отношения $\Sigma Ce/\Sigma Y$ в метапесчаниках первой группы 5.72–10.36, характерны для континентальных пород, образованных в гумидном климате, значения этого показателя для второй группы – 2.30–3.39 (только в обр. 510а – 5.37), что соответствует отложениям, сформированным в семигумидно-семиаридных условиях [20]. На треугольной диаграмме La–(Nd+Sm)–(Y+Dy) фигуративные точки метапесчаников расположены в полях гумидного и аридного (вблизи линии разграничения) климатов (рис. 10).

По форме нормированных на UCC [21] спектров распределения элементов-примесей метапесчаники алькесвожской толщи, также как и по форме спектров РЗЭ, делятся на два типа (рис. 11). К первому относятся метапесчаники из базальных слоев, отличающиеся незначительно превышающими UCC содержаниями легких редких земель и пониженными тяжелыми. В метапесчаниках второго типа распределение РЗЭ зеркальное, характерное для основных магматических пород – пониженное, по сравнению с UCC, содержание легких, и близкое к 1 – тяжелых. В метапесчаниках обоих типов отмечаются низкие, по сравнению с

UCC, содержания Ni, Cu, Pb и U и повышенные Zr и Mo. В породах первого типа существенно понижены по сравнению с UCC содержания Cs и Pb, второго – Sr. Такой характер кривых подтверждает зависимость состава метапесчаников базальной части от состава подстилающих пород и отражают влияние геохимической специализации риолитов малдинского комплекса – носителей так называемого «малдинского геохимического феномена» – низким содержанием Ni и Cu и повышенным содержанием летучих элементов грейзенового парагенезиса [12, 29]. По мере накопления толщи, источник обломочного вещества стабилизируется и сменяется основными слабо измененными в коре выветривания породами.

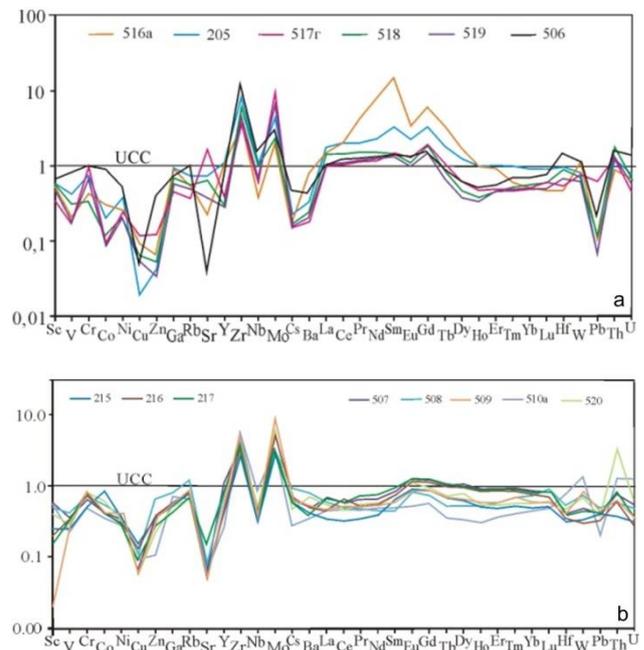


Рис. 11. Нормированное на UCC [21] содержание элементов-примесей в метапесчаниках алькесвожской толщи.
[Fig. 11. Normalised to UCC [21] content of elements-impurities in the metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum.]

На диаграмме зависимости Ni–Cr [21] все точки алькесвожских метапесчаников попали в область постаршейских образований, не содержащих продуктов размыва древних метаморфических пород континентальных блоков (рис. 12).

Обсуждение результатов

Анализ распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов, их соотношений, характера спектров и положения фигуративных точек составов на различных диаграммах показал изменение характеристик метапесчаников алькесвожской толщи, отражающих локальные особенности подстилающих отложений, а также изменения состава от подошвы к кровле.

По значению гидролизатного (ГМ) модуля метапесчаники относятся к аквагенным осадочным породам невысокой степени седиментационной зрелости,

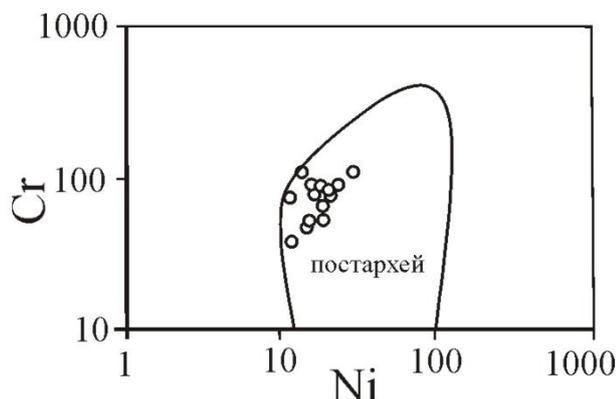


Рис. 12. Положение фигуративных точек метапесчаников алькесвожской толщи на диаграмме Ni–Cr [21].

[Fig. 12. Position of the figurative points of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum in the Ni–Cr diagram [21].

содержащим невыветрелые полевые шпаты. По значению титанового модуля большинство кварцитопесчаников относятся к нормотитанистым породам, повышенная титанистость ($TM > 0.12$) установленная в двух образцах метапесчаников, может быть обусловлена проявлением в составе терригенного материала обломков основных пород или образованием обогащенных рудными минералами слоев (естественным шлихованием).

На диаграмме определения состава пород источников обломочного материала, параметры которой основаны на содержании петрогенных оксидов (рис. 3 г), почти все фигуративные точки метапесчаников алькесвожской толщи попали в поле пород, образованных за счет разрушения богатых кварцем осадочных образований вблизи границы с изверженными породами кислого состава. Анализ химических индексов изменения состава пород на палеоводосборах CIA, CIW и ICV (табл. 1, рис. 5) показал, что в метапесчаниках из основания разреза алькесвожской толщи присутствуют существенно измененные в кембрийской коре выветривания обломки кислых вулканитов саблегорской свиты, а вверх по разрезу, по мере выведения на уровень эрозионного вреза, увеличивается влияние неизмененных гипергенными процессами основных вулканитов. Изменение источников питания и степени выветрелости материала палеоводосборов подтверждается значениями отношений редких и редкоземельных элементов (табл. 2, рис. 7 и 8). Отношения $\Sigma Ce/\Sigma Y$ в метапесчаниках первой группы 5.72–10.36, характерны для континентальных пород, образованных в гумидном климате, значения этого показателя для второй группы – 2.30–3.39 (только в обр. 510а – 5.37) соответствуют отложениям, сформированным в семигумидно-семиаридных условиях [20].

На диаграммах, позволяющих установить палеогеодинамическую обстановку и тектоническое положение области осадконакопления все фигуративные точки составов метапесчаников расположены в полях обстановок пассивной континентальной окраины (рис. 6). Отношение Ce/Ce^* в метапесчаниках аль-

кесвожской толщи соответствует значениям, характерным для эпиконтинентальных обстановок.

Однотипная форма спектров распределения РЗЭ и других элементов-примесей для метапесчаников средней части разреза свидетельствует о единстве источников питания и условий осадконакопления. Более вариативные спектры для метапесчаников основания разреза отражают неоднородность субстрата коры выветривания.

Вывод о формировании метапесчаников за счет разрушения местных постархейских образований согласуется с данными, полученными нами результатами U/Pb датирования детритового циркона [8].

Заключение

Проведенное изучение особенностей распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов позволяет сделать вывод о том, что метапесчаники в основании алькесвожской толщи образованы в эпиконтинентальной обстановке в условиях умеренно теплого климата за счет размыва и переотложения в различной степени подвергшихся выветриванию подстилающих пород позднерифейско-вендского фундамента при практически полном отсутствии более древнего материала.

Основное влияние на состав метапесчаников, залегающих в основании разреза оказали местные источники питания – измененные в коре выветривания кислые вулканиты саблегорской свиты, от которых метапесчаники унаследовали характерный набор РЗЭ и редких элементов и, в меньшей степени, базиты манаргского комплекса. Вверх по разрезу произошла постепенная смена источников обломочного материала и ведущую роль стали приобретать постепенно выводимые на уровень эрозионного вреза не измененные в коре выветривания основные магматические породы нижней подсвиты саблегорской свиты.

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. Ефанова Л. И. Алькесвожская толща на севере Урала. Стратиграфия, литология, металлоносность: автореф. дис. ... канд. геол. мин. наук. Сыктывкар: 2001. 24 с.
4. Кузнецов С.К., Тарбаев М.Б., Моралев М.Б., Соболева А.А., Иванова Т.И. Золото-платиноидная минерализация на Приполярном Урале // *Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов*. Сыктывкар: Геопринт. 1998. С. 13–14.
5. 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.

6. 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.
7. Шумилов И.Х., Осташенко Б.А. Минералоготехнологические особенности Au-Pd-TR оруденения на Приполярном Урале. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 104 с.
8. Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Первые U/Pb-данные о возрасте детритовых цирконов из песчаников золотоносной позднекембрийско-раннеордовикской алькесвожской толщи (Приполярный Урал) // *Вестник Геонаук*. 2022. № 5. С. 3–10.
9. Коссовская А. Г., Тучкова М. И. К проблеме минералогопетрохимической классификации и генезиса песчаных пород // *Литология и полезные ископаемые*. 1988. № 2. С. 8–24.
10. Bhatia M. R. (1983) Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // *The Journal of Geology*. 1983. No 91 (6). P. 611–627.
11. Roser B. P., Korsch R. J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // *The Journal of Geology*. 1986. No 94 (5). P. 635–650.
12. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
13. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир. 1976. 536 с.
14. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sed. Petrol.* 1988. No 58. P. 820–829.
15. Kusunoki T., Musashino M. Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin // *Earth Science*. 2001. No 55 (5). P. 293–306.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. No 299. P. 715–717.
17. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review // *J. Sed. Res.* 1995. No 65. P. 1–12.
18. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea // *Sedimentary Geology*. 2002. No 149. P. 219–235.
19. Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // *Geol. Soc. Spec. Publ. L.* 1982. No 10. P. 551–561.
20. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука. 1976. 268 с.
21. Тейлор С. З., МакЛеннон С. М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
22. 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. P. 1875–1895.
23. 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. No 191(4). P. 305–327.
24. Маслов А. В., Крупенин М. Т., Ронкин Ю. Л., Гарев 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. No 4. С. 414–441.
25. Taylor S. R. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. S. R. Taylor, S. M. McLennan // *Rev. Geophys.* 1995. No 33. P. 241–265.
26. Asiedu D. K., Suzuki S, Nogami K., Shibata T. Geochemistry of Lower Cretaceous sediments, Inner Zone of Southwest Japan: Constraints on provenance and tectonic environment // *Geochemical Journal*. 2000. No 34. P.155–173.
27. McLennan S.M., Hemming S.R., Taylor S. R., Eriksson K. A. Early Proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America // *Geochim. Cosmochim.* 1995. Vol. 59. P. 1153–1177.
28. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust contrasting results from surface and shales // *Chem. Geol.* 1993. No 104. P. 1–37.
29. Соболева А. А. Вулканыты и ассоциирующие с ними гранитоиды Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 146 с.
30. 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.

Никулова Наталья Юрьевна – д. г.-м. н., ведущий научный сотрудник, Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация; E-mail: Nikulova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0002-1511-6124

Гракова Оксана Васильевна – к. г.-м. н., научный сотрудник, Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация; E-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0001-5917-9218

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Nikulova Natalia Yu. – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Senior Research Fellow, Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Syktывkar, Russian Federation; E-mail: Nikulova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0002-1511-6124

Grakova Oksana V. – PhD in Geol.-Min., Senior Research, Institute of Geology, FIC Komi Scientific Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Syktывkar, Russian Federation; E-mail: ovgrakova@geo.komisc.ru; ORCID 0000-0001-5917-9218

Authors have read and approved the final manuscript.

Geochemical characteristics of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum (Nether-Polar Urals)

©2022 N. Yu. Nikulova[✉], O. V. Grakova

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

Abstract

Introduction: Metaterrigenous deposits of the Late Cambrian-Early Ordovician stratum depressing the pre-Paleozoic relief in the contact zone of the Riphean-Vendian complex of preuralids and the Caledonian-Hercynian complex of uralids contain numerous metamorphised gold-ore occurrences. Cambrian weathering crust on the basement rocks is considered to be the source of clastogenic gold for the rocks of the Alkesvozhskaya stratum. To determine the genotype, formation conditions, and sources of the fragmentary material of paleontologically barren metaterrigenous deposits of the Alkesvozhskaya stratum, a study of the distribution of petrogenic oxides, rare-earth and rare elements was carried out.

Methods: The authors studied the petrographic composition and geochemical features of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum selected from the bedrock exposures on the divide and the eastern slope of the Maldynyrd range (Nether-Polar Urals).

Results and discussion: The interpretation of the results of chemical analyses and the peculiarities of REE distribution in the metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum in the Maldynyrd range allowed concluding that the terrigenous strata accumulated in the epicontinental environment in a moderate warm climate. The study revealed a dependence of the geochemical characteristics of Alkesvozhskaya metasandstones on the composition and degree of transformations in the ancient weathering crust of underlying volcanogenic formations of the Riphean-Vendian basement. The abnormally high REE content in metasandstones from the basement of the Alkesvozhskaya strata accompanied by a high content of phosphorus is associated with the presence of monazite in the rocks.

Conclusions: The composition of metasandstones at the base of the section was influenced by acidic volcanites of the Sablegor formation and the basites of the Manaragsky complex altered in the weathering crust. In the younger stratigraphic levels, there was a change in the sources of fragmentary material and the leading role was taken by main magmatic rocks of the lower subformation of the Sablegor formation, which had not changed in the weathering crust and were gradually brought to the level of erosional truncation.

Keywords: Alkesvozhskaya stratum, metasandstones, chemical composition, fragmentary material, provenance sources, sedimentation conditions, Nether-Polar Urals.

Funding: The work was carried out within the framework of the topics of the state task of the IG FIT Komi NC UrO RAS (register. numbers: 1021062311457-5-1.5.6 and 1021062211107-6-1.5.6)

For citation: Nikulova N. Yu., Grakova O. V. Geochemical characteristics of metasandstones of the Alkesvozhskaya stratum (Nether-Polar Urals). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 4, pp. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/69-82>

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



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Natalia Yu. Nikulova, e-mail: Nikulova@geo.komisc.ru

REFERENCES

1. 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.)
2. 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*, 1998. pp. 14–16. (In Russ.)
3. Efanova L. I. Al'kesvozhskaja tolshha na severe Urala Stratigrafija, litologija, metallonosnost' Diss. kand. geol. min. nauk. [Alkesvozhskaya formation in the north of the Urals. Stratigraphy, lithology, metal content. Diss. kand. geol. min. nauk Sciences]. Syktyvkar, 2001. 24 p. (In Russ.)
4. 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*, 1998, pp. 13–14. (In Russ.)
5. Kuznecov S.K., Tarbaev M.B., Efanova L.I., Chuprov G.V. Zoloto korennyh projavlenij v Kozhimskom rajone Pripoljarnogo Urala [Gold from primary occurrences in the Kozhimsky region of the Subpolar Urals]. *Syktyvkar'skij mineralogicheskij sbornik – Syktyvkar mineralogical collection*, 2001. pp. 116–133. (In Russ.)
6. Tarbaev M.B., Kuznecov S.K., Moralev G.V. Novyj zoloto-palladievij 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.)
7. 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.)
8. Nikulova N. Ju., Hubanov V. B. Pervye U/Pb-dannye o vozraste detritovyh cirkonov iz peschanikov zolotonosnoj pozdnekembrijsko-ranneordovikskoj al'kesvozhskoj tolshhi (Pripoljarnyj Ural) [The first U/Pb data on the age of detrital zircons from sandstones of the gold-bearing Late Cambrian-Early Ordovician Alkesvozh formation (Polar Urals)]. *Vestnik Geonauk – Bulletin of Geosciences*, 2022, no 5. pp. 3–10. (In Russ.)
9. Kossovskaja A. G., Tuchkova M. I. K probleme mineralogopetrohimicheskoj klassifikacii i genezisa peschanyh 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.)
10. Bhatia M. R. (1983) Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, 1983, no 91(6). pp. 611–627.
11. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 1986, no 94 (5). pp. 635–650.
12. Judovich Ja. Je., Ketris M. P. *Osnovy litohimii* [Fundamentals of lithochemistry]. Saint Petersburg, Nauka publ., 2000. 479 p. (In Russ.)
13. Pettidzhon F., Potter P., Siver R. (1976) Peski i peschaniki [Sands and sandstones]. Moscow, Mir publ., 1976, 536 p. (In Russ.)
14. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log date. *J. Sed. Petrol.*, 1988, no. 58. pp. 820–829.
15. Kusunoki T., Musashino M. Comparison of the Middle Jurassic to Earliest Cretaceous sandstones from the Japanese Islands and South Sikhote-Alin. *Earth Science*, 2001, no. 55 (5). pp. 293–306.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, no. 299. pp. 715–717.
17. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *J. Sed. Res*, 1995, no. 65. pp. 1–12.
18. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea. *Sedimentary Geology*, 2002, no. 149. pp. 219–235.
19. Maynard J. B., Valloni R., Yu H.-Sh. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Geol. Soc. Spec. Publs. L.*, 1982, no. 10. pp. 551–561.
20. Balashov Ju. A. *Geohimija redkozemel'nyh jelementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka publ., 1976, 268 p. (In Russ.)
21. 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.)
22. 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.
23. 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, no. 191(4). pp. 305–327.
24. Maslov A. V., Krupenin M. T., Ronkin Ju. L., Gareev Je. Z., Lepihina O. P., Popova O. Ju. Tonkozernistye aljmosilikoklasticheskie obrazovanija stratotipicheskogo razreza srednego Rifeja na Juzhnom Urale: osobennosti formirovanija, 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.)
25. Taylor S. R. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. S. R. Taylor, S. M. McLennan. *Rev. Geophys*, 1995, no. 33, pp. 241–265.
26. Asiedu D. K., Suzuki S, Nogami K., Shibata T. Geochemistry of Lower Cretaceous sediments, Inner Zone of Southwest Japan: Constraints on provenance and tectonic environment. *Geochemical Journal*, 2000, no. 34, pp. 155–173.
27. McLennan S.M., Hemming S.R., Taylor S. R., Eriksson K. A. Early Proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochim. Cosmochim*, 1995, vol. 59, pp. 1153–1177.
28. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust contrasting results from surface and shales. *Chem. Geol.*, 1993 no. 104, pp. 1–37.
29. 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.)
30. Shatrov V. A., Vojcehovskij G. V. (2009) Primenenie lantanoidov dlja rekonstrukcij obstanovok obrazovanija 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)]. *Geohimija – Geochemistry international*, 2009, no. 8. pp. 805–824. (In Russ.)