ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЕРХНЕПРОТЕРОЗОЙСКИХ И ВЕРХНЕКЕМБРИЙСКО-НИЖНЕОРДОВИКСКИХ ПЕСЧАНИКОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПАЙ-ХОЯ

Т. А. Канева¹, Н. Ю. Никулова¹, Е. В. Старикова²

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, ²ЗАО «Поляргео», Санкт-Петербург
ta_kaneva@mail.ru, Nikulova@geo.komisc.ru, starspb@mail.ru

Обобщены результаты изучения вещественного состава верхнепротерозойских и верхнекембрийско-нижнеордовикских песчаников на северо-западе Пай-Хоя, позволяющие установить литохимические критерии диагностики генезиса палеонтологически немых толщ. Установлено, что областью образования туфогенных позднекембрийско-вендских песчаников морозовской и сокольнинской свит были океанические островные дуги, а основным источником обломочного материала — островодужная вулканокластика. Выявлена принадлежность верхнекембрийско-нижнеордовикских песчаников хенгурской свиты к осадочным прибрежно-морским образованиям, сформировавшимся в условиях активной и пассивной континентальных окраин. Установлено, что значительную роль в формировании их состава, наряду с вулканами основного и среднего составов, играли метаосадочные породы, а особенности вещественного состава хенгурских песчаников позволят считать их перспективным объектом при поисках древних метаморфизованных россыпей.

Ключевые слова: песчаник, химический состав, обломочный материал, область образования, условия осадконакопления, вулканиды.

MATERIAL COMPOSITION AND CONDITIONS OF FORMATION OF UPPER PROTEROZOIC AND UPPER CAMBRIAN-LOWER ORDOVICIAN SANDSTONES OF THE NORTHWESTERN PAY-KHOY

T. A. Kaneva¹, N. Yu. Nikulova¹, E. V. Starikova²

¹Institute of Geology of Komi SC UD RAS, Syktyvkar, PolarGeo Inc., St. Petersburg

We present the results of our study of the Upper Proterozoic and Upper Cambrian-Lower Ordovician sandstones in the Northwestern Pay-Khoy Ridge to find diagnostic lithochemical criteria for the paleontological silent strata genesis. We established that oceanic island arc had been the area of formation of tuffaceous Late Riphean-Vendian sandstones of morozovskaya and sokolninskaya formations and island arc volcanoclastics — the main source of detritus. We revealed the affiliation of the Upper Cambrian-Lower Ordovician sandstones of hengurskaya formation to sedimentary coastal-marine formations formed under the conditions of active and passive continental margins. We found that a significant role in the formation of their structure, alongside with basic and intermediate volcanics compositions, was played by metasedimentary rocks, and especially the material composition of the hengurskaya sandstones supports their value as a target for ancient metamorphosed placer.

Keywords: sandstone, chemical composition, clastic material, formation area, conditions of sedimentation, volcanics.

Введение

В геологическом строении северо-западной части Пай-Хоя значительную роль играют образования позднекембрийско-вендского островодужного комплекса и залегающие на них с угловым и стратиграфическим несогласием позднекембрийско-нижнеордовикские терригенные осадочные отложения. Изучение верхнепротерозойских и верхнекембрийско-нижнеордовикских пород имеет как научное, так и прикладное значение в связи с известными в них проявлениями полезных ископаемых. Вулканогенно-осадочные образования морозовской свиты (RF₃mr) являются источником вещества для золото-титан-циркониевых россыпей; с отложениями морозовской (RF₃mr) и сокольнинской (RF₃-Vsk) свит и с зонами их контакта с позднекембрийско-ран-

неордовикскими отложениями хенгурской свиты (Є₃—О₁hn) связаны объекты медной, серебряной и золото-рудной минерализации.

Первые петрологические характеристики вулкаников морозовской и сокольнинской свит были получены в ходе геологической съемки масштаба 1:50 000, проводившейся в 1965—1971 гг. Позже эти материалы использовались в сводках, посвященных анализу магматических формаций региона [1, 5, 9, 10]. В 2012—2014 гг. в ходе ГДП-200 Амдерминской площади, проведенного ЗАО «Поляргео», был получен новый фактический материал, на основе которого впервые проведена геохимическая интерпретация состава вулкаников [2, 6]. Терригенные и вулканогенно-терригенные толщи до настоящего времени оставались неизученными.

Известные разрезы позднерифейско-вендских вулканогенно-терригенных толщ на северо-западе хребта Пай-Хой достаточно однообразны, что с учетом сложности тектонического строения района, быстрой фациальной изменчивости отложений из-за выклинивания слоев/пачек вулканогенных образований и отсутствия слоев-маркеров значительно затрудняет их корреляцию. Литохимические исследования входящих в состав вулканогенно-терригенных комплексов псаммитов являются весьма актуальными для воссоздания истории эволюции доуралид региона. Анализ особенностей состава обломочных толщ позволил установить литохимические признаки, способы поступления и источники обломочного материала, проследить общие тенденции развития территории в позднепротерозойско-раннеордовикском временном интервале, уточнить палеогеографическую и палеотектоническую позицию вулканитов, субвулканических образований и перекрывающих их осадочных нижнепалеозойских толщ.

Объект и методы исследования

Для решения поставленных задач авторами проводилось изучение петрографических, минералогических и литохимических особенностей псаммитов из нескольких пространственно разобщенных разрезов вулканогенно-осадочных толщ морозовской (RF_3mr), сокольнинской (RF_3-Vsk) и хенгурской свит (ϵ_3-O_1hn). В изученную выборку (23 обр.) псаммитов вошли образцы песчаников, генетическую принадлежность которых сложно установить общегеологическими методами.

Петрографический состав песчаников изучался в прозрачных шлифах. Содержания порообразующих оксидов в породах определялись традиционным весовым химическим методом в ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар), интерпретация результатов химических анализов проводилась с использованием нескольких классификаций и методических приемов палеорекоkonструкций [8, 11, 12, 15], позволяющих оценить вклад отдельных обломочных компонентов, установить генетическую принадлежность, состав и интенсивность гипергенных преобразований материнских пород.

Геологическое строение

В геологическом строении территории Пай-Хоя принимают участие верхнепротерозойские и палеозойские отложения.

Входящая в структуру Пай-Хойского антиклинория Амдерминская антиклиналь сформирована верхнерифейско-вендскими породами, входящими в состав амдерминской, морозовской и сокольнинской свит, имеющих вулканогенно-осадочный генезис и образующих синклиналичную структуру ядра антиклинали (рис. 1). В основании позднепротерозойских образований выделяется существенно карбонатная амдерминская свита верхнерифейского возраста. Выше залегает вулканогенная верхнерифейская морозовская свита, а завершает разрез сокольнинская свита, относимая к верхнему рифею — венду [9, 10].

Палеозойские отложения залегают с разрывом и угловым несогласием на разных горизонтах доуралид.

Амдерминская свита (RF_3am) представлена карбонатными породами и разделяется на две подсвиты. Нижняя представлена однообразной толщей плитчатых слабослоистых углеродистых известняков, верхняя — органогенными массивными и слоистыми известняками. Строение свиты определяется как общей региональной структурой

(восточное крыло антиклинория), так и наличием крупного дизъюнктива по западному контакту [5, 10]. Соответственно, западная часть выходов амдерминских отложений несет следы интенсивного тектонического воздействия. С вышележащей морозовской свитой интерпретируются согласные контакты. Из-за сложноскладчатого строения определение мощности подсвиты затруднено. По всей видимости, она не превышает 2200 м.

Морозовская свита (RF_3mr) формирует осевую часть Амдерминской антиклинали и подразделяется на три подсвиты, сложенные вулканогенно-осадочными образованиями. Нижняя подсвита (RF_3mr_1) характеризуется преобладанием осадочных разновидностей горных пород — сланцев, известняков, доломитов, реже встречаются вулканомиктовые образования. Средняя подсвита (RF_3mr_2) сложена вулканомиктовыми (с редкими линзами доломитов) и туфогенными породами с подчиненным количеством эффузивов. Верхняя подсвита (RF_3mr_3) представлена в южной части вулканитами, а в северной — осадочными породами (сланцами, известняками, доломитами). Характерной особенностью всех подразделений морозовской свиты является увеличение доли осадочных образований в северной части выходов, которые южнее сменяются существенно вулканогенными породами. С перекрывающими сокольнинскими отложениями предполагаются согласные стратиграфические взаимоотношения. На части территории морозовские отложения с угловым и стратиграфическим несогласием перекрываются нижнепалеозойскими терригенными породами (нижняя хенгурская подсвита). Мощность свиты составляет 1900—2200 м.

Сокольнинская свита (RF_3-Vsk) объединяет разнообразные вулканогенно-осадочные и терригенные породы и подразделяется на две подсвиты. К нижнесокольнинским (RF_3-Vsk_1) отнесены вулканогенно-осадочные породные ассоциации, при этом в низах разреза преобладают основные вулканиты и грубообломочные породы (вулканомиктовые конгломераты, гравелиты, песчаники), которые постепенно сменяются существенно терригенными отложениями с подчиненным количеством эффузивов среднего-кислого состава и их туфов. Верхнесокольнинские (RF_3-Vsk_2) отложения распространены на крайнем северо-западе региона и включают терригенный (флиш-идный) с единичными прослоями кислых эффузивов комплекс осадков, маркирующий начальные стадии орогенеза [9]. С подстилающими породами граница тектоническая (предполагаются стратиграфические взаимоотношения с морозовскими отложениями). Общая мощность свиты 1800—2000 м.

Нижняя подсвита хенгурской свиты ($\epsilon_3-O_1hn_1$) представляет собой базальное основание палеозоя, вскрытое локально и только на изученном участке Северо-Западного Пай-Хоя в виде узких полос, окаймляющих выходы докембрийских пород. Отложения залегают с разрывом и угловым несогласием на различных свитах фундамента и объединяют пестроцветную ассоциацию конгломератов, гравелитов, песчаников, алевросланцев и кварцитопесчаников. Мощность подсвиты составляет 350—450 м.

Литохимические характеристики песчаников

Изученные среднезернистые и разноезернистые верхнепротерозойские и верхнекембрийско-нижеордовикские песчаники и туфопесчаники характеризуются блас-топсаммитовой структурой с лепидогранобластовой структурой порового, базально-порового, редко — базаль-

Рис. 1. Схема строения докембрийского выступа (Амдерминского блока) на Северо-Западном Пай-Хое (по материалам ГДП-200 ЗАО “Поляргео”, 2015 г.):

1 — палеозойские отложения нерасчлененные; 2 — хенгурская свита, нижняя подсвита ($E_3-O_1 hn_1$): конгломераты, гравелиты, песчаники, алевросланцы и кварцито-песчаники; 3 — сокольнинская свита, нижняя подсвита (RF_3-Vsk_1): песчаники, алевролиты, гравелиты, кремнистые сланцы, туфопесчаники, базальты, андезиты, риодациты, риолиты и их туфы, субвулканические образования; 4 — морозовская свита, верхняя подсвита ($RF_3 mr_3$): сланцы глинистые, известняки, доломиты, базальты, андезибазальты, андезиты, риодациты, их туфы, туфопесчаники; 5 — морозовская свита, средняя подсвита ($RF_3 mr_2$): сланцы по кислым туфам, реже — лавам, туфопесчаникам, вулканомиктовые песчаники, линзы доломитов, редко — прослои базальтов, андезибазальтов, субвулканические и экструзивно-жерловые образования; 6 — морозовская свита, нижняя подсвита ($RF_3 mr_1$): сланцы глинистые, кремнистые и углеродистые, известняки, доломиты, известковистые алевролиты и песчаники, полимиктовые конгломераты и гравелиты, туфогравелиты; 7 — амдерминская свита, верхняя подсвита ($RF_3 am_2$): кристаллические, микрофитолитовые известняки, редкие линзы кремней; 8 — амдерминская свита, нижняя подсвита ($RF_3 am_1$): тонкокристаллические углеродистые известняки; 9 — надвиги; 10 — разрывные нарушения; 11–12 — границы стратиграфических подразделений: 11 — согласные; 12 — несогласные; 13 — точки отбора проб

Fig. 1. Structural scheme of Precambrian bench (Amderminsky unit) in north-western Pay-Khoy (based on CDP-200 CJSC “Polyargeo”, 2015).

Legend: 1 — undifferentiated Paleozoic deposits; 2 — hengurskaya formation, lower subformation ($E_3-O_1 hn_1$): conglomerates, gravelites, sandstones, aleurolite shales and quartz sandstones; 3 — sokolninskaya formation, lower subformation (RF_3-Vsk_1): sandstones, siltstones, gravelites, silica shales, tuff sandstones, basalts, andesites, rhyodacites, rhyolites and their tufts, subvolcanic formation; 4 — morozovskaya formation, upper subformation ($RF_3 mr_3$): clay shales, limestones, dolomites, basalts, andesites, andesibasalts, rhyodacites, their tufts, tuff sandstones; 5 — morozovskaya formation, middle subformation ($RF_3 mr_2$): shales on acidic tufts, rarer - lavas, tuff sandstones, volcanomictic sandstones, dolomite lenses, rare - layers of basalts, andesibasalts, subvolcanic and extrusive vent formations; 6 — morozovskaya formation, lower subformation ($RF_3 mr_1$): clay, silica and carbon shales, limestones, dolomites, calcareous siltstones and sandstones, polymictic conglomerates and gravelites, tuff gravelites; 7 — amderminskaya formation, upper subformation ($RF_3 am_2$): crystalline, microphytolithic limestones, rare silica lenses; 8 - amderminskaya formation, lower subformation ($RF_3 am_1$): fine crystalline carbonaceous limestones; 9 — thrusts; 10 — faults; 11–12 — boundaries of stratigraphic units: 11 — conformable, 12 — unconformable; 13 — sample points

ного цемента. Количество псаммитовых обломков составляет от 60 до 95 %, преобладает 70–85 %. Кластические зерна кварца и полевых шпатов встречаются в различных соотношениях. Выделяются мономиктовые кварцевые, олигомиктовые кварцевые, мезомиктовые кварцевые и полевошпат-кварцевые разновидности. Обломки пород представлены силицитами, тонкозернистыми кварц-полевошпатовыми и микрозернистыми кварц-гематитовыми породами и глинистыми сланцами.

По химическому составу изученная совокупность песчаников весьма неоднородна (табл. 1). Нормативный минеральный пересчет химических анализов (табл. 1, 2) показал, что для пород сокольнинской и морозовской свит основными породообразующими минералами являются кислые (№ 1–17) плагиоклазы (38.2–60.3 об. %), кварц (12.3–42.0 об. %). В породах хенгурской свиты преобладает кварц (43.7–97.8 об. %), а плагиоклазы имеют более основной состав (№ 12–40) и составляют до 16.4 об. %.

Различаются также процентные содержания и соотношения мусковита и хлорита. В большинстве изученных образцов преобладают слабоокатанные и неокатанные обломочные зерна с полигональными остроугольными очертаниями, хорошоокатанные обломки редки.

На диаграмме $K_2O - Na_2O$ [7], где песчаники разделены по соотношению плагиоклазов, отражающему состав источников обломочного материала — гранитного для аркозов и основного для граувакк — все фигуративные точки позднерифейско-вендских песчаников располагаются в поле граувакк, а позднекембрийско-раннеордовикских — в поле аркозов, при том что одна точка располагается на линии разграничения (рис. 2, а).

В поле граувакк попали вулканомиктовые песчаники и туфопесчаники, в составе которых значительное место занимают продукты разрушения вулканитов с натриевым типом щелочности. В них отмечаются максимальные (до 60.3 об. %) содержания кислых плагиоклазов (табл. 2),

Химический состав песчаников, мас. %

Chemical composition of sandstone, wt. %

№ п/п No	№ обр. Sample No	Возраст Age	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ппп Ignition loss	Сумма Total
1	4701/2	RF ₃ mr ₂	57.62	0.90	15.17	1.86	4.73	0.090	3.44	4.33	5.46	0.42	0.15	4.89	99.06
2	4701/3		54.04	0.94	15.66	2.05	5.09	0.10	4.40	4.95	5.57	0.35	0.13	5.98	99.26
3	4444/2		58.26	0.84	17.42	1.41	5.00	0.06	4.20	1.90	5.60	1.12	0.17	3.88	99.86
4	4444/3		57.56	1.00	16.68	2.73	4.84	0.11	5.12	1.03	6.29	0.76	0.17	3.18	99.47
5	4450/2		72.24	0.43	12.8	1.14	1.99	0.059	1.07	1.54	4.66	1.12	0.061	2.19	99.30
6	4451/4		56.20	0.63	15.65	2.60	3.91	0.089	5.28	3.67	4.17	1.16	0.091	5.84	99.29
7	4452/2		58.37	0.87	16.3	1.75	4.54	0.048	3.03	3.13	4.26	1.92	0.15	4.62	98.99
8	4625/1	RF ₃ mr ₃	59.36	0.59	13.62	2.12	4.37	0.16	2.43	5.37	3.53	1.32	0.11	6.36	99.34
9	4473/7	RF ₃ -Vsk ₁	63.69	0.38	16.04	0.94	3.66	0.068	3.24	0.88	5.02	2.30	0.11	2.30	98.63
10	4473/8		63.24	0.59	16.37	1.14	3.51	0.060	2.64	1.24	5.06	2.84	0.11	2.28	99.08
11	4426/1		67.34	0.61	13.72	1.36	2.45	0.090	1.21	3.30	6.19	0.21	0.15	2.68	99.31
12	4800/1		62.76	0.72	15.71	1.68	4.44	0.089	3.31	1.35	5.72	0.81	0.14	2.77	99.50
13	4900/1		61.38	0.70	15.31	1.51	4.36	0.090	4.09	2.37	5.13	0.54	0.16	3.20	98.84
14	4903/1		61.82	0.74	14.27	0.57	4.26	0.080	3.73	2.78	4.24	1.37	0.15	4.11	98.12
15	4475/1		62.16	0.68	12.73	1.07	3.13	0.087	2.64	5.71	4.36	1.11	0.15	5.65	99.48
16	4483/3	C ₃ -O ₁ ln ₁	66.80	0.70	13.27	4.64	1.58	0.054	2.06	1.87	1.01	3.61	0.19	4.07	99.85
17	4483/6		69.48	0.77	12.17	4.94	1.42	0.043	2.14	1.14	1.63	2.71	0.16	2.91	99.51
18	4483/7		69.28	0.66	8.51	3.82	1.17	0.13	1.42	5.70	1.52	1.61	0.09	6.13	100.04
19	4458/8		86.80	0.38	4.11	2.29	0.40	0.075	0.18	2.18	0.20	1.03	0.075	2.5	100.22
20	4458/9		82.92	0.39	6.60	1.14	2.80	0.050	0.79	1.14	0.22	1.39	0.11	2.76	100.31
21	4484/7		63.60	0.75	13.69	4.16	2.70	0.091	2.86	2.59	0.33	3.76	0.25	5.26	100.04
22	4492/3		73.44	0.73	13.05	3.85	1.38	0.015	0.66	0.30	0.47	3.50	0.16	2.43	99.99
23	4432/5		98.34	0.08	0.40	0.12	0.11	0.005	0.20	0.10	0.003	0.11	0.039	0.03	99.54

обычно присутствующих в виде слабоокатанных зерен. Низкая окатанность обломков породообразующих минералов, часто встречающаяся оскольчатая форма кварцевых зерен, хорошая сохранность плагиоклазов также свидетельствуют в пользу их вулканомиктовой природы и незначительной дальности переноса.

Фигуративные точки песчаников нижней подсвиты хенгурской свиты попали в поле аркозов. В составе этой группы выделяются существенно кварцевые (№ 19, 20, 23) и слюдяные (№ 16, 21, 22) песчаники. Наиболее близкие по составу к грауваккам образования (№ 17 и 18) представлены плохосортированными, содержащими в цементе значительное количество карбоната песчаниками из основания хенгурского разреза.

На диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [7], более дробно разделяющей песчаники по соотношению кварца, полевых шпатов и глинистых минералов (рис. 2, б) и отражающей различия степени зрелости пород, точки верхнепротерозойских песчаников остались в поле граувакк. При характерных для всей выборки низких (< 1.3) значениях $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ наименее зрелые породы, попавшие в поле граувакк, имеют высокие (> 0) значения $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$. Песчаники нижней подсвиты хенгурской свиты не попадают в поле граувакк, а расположены в полях сублититов, лититов, аркозов или вне выделенных полей. Возможно, такой разброс отражает разнообразие процессов, оказавших влияние на формирование их состава.

На диаграмме А — F [8], разделяющей песчаники по глиноземистости (А) и фемичности (F) часть фигуративных точек песчаников, располагающихся на других диаграммах в полях аркозов и граувакк, попала в поле пород, переходных к туффитам, и туффитов, а по показателю фемичности осталась в пределах областей, соответствующих аркозам и грауваккам. Точки песчаников всех стратиграфических подразделений попали в поле граувакк, при этом точки песчаников хенгурской свиты выделяются по показателю глиноземистости и располагаются отдельной группой вблизи поля субаркозы. В поле глинистых аркозов попала фигуративная точка песчаников хенгурской свиты (№ 20) с высокой долей глинистого матрикса, по данным нормативного пересчета содержащих 8.0 об. % мусковита, 9.2 об. % хлорита и незначительное количество полевых шпатов. В поле глин располагается точка песчаника (№ 22), содержащая 25.5 об. % мусковита (табл. 2). В целом песчаники незначительно различаются по фемичности, а разброс точек по глиноземистости объясняется различной долей участия глинистого матрикса.

На треугольной диаграмме в координатах Si — Al — Fe [14] фигуративные точки изученных песчаников распределены в полях аркозов, субграувакк, граувакк, а основная часть фигуративных точек песчаников средней подсвиты морозовской свиты располагается вне обозначенных полей. Точки песчаников верхней подсвиты морозовской свиты и нижней подсвиты сокольнинской свиты расположены

Таблица 2

Нормативный минеральный состав песчаников, %
Normative mineral composition of sandstones, %

Минерал Mineral	Кварц Quartz	Плагиоклаз (№) Plagioclase	Ортоклаз Orthoclase	Мусковит Muscovite	Хлорит Chlorite	Апатит Apatite	Карбонат Carbonate	Титанит Titanite	Лейкоксен Leucoxene	Ильменит Ilmenite	Магнетит Magnetite	Гематит Hematite
№ обр. Sample No.												
1	17.3	50.9 (9)	2.2	—	18.1	0.3	5.8	1.8	0.2	—	2.6	0.2
2	12.4	51.4 (8)	2.2	—	20.7	0.3	6.8	2.0	0.2	—	2.6	0.3
3	17.3	48.5 (9)	5.6	1.6	20.1	—	2.5	0.4	0.9	—	1.6	0.3
4	12.3	53.4 (1)	4.5	—	20.8	0.3	1.1	1.2	0.1	0.9	3.7	0.2
5	40.8	41.4 (5)	2.6	4.8	4.4	—	2.6	—	0.2	0.5	0.7	0.6
6	19.8	37.1 (5)	5.9	3.2	21.9	0.3	6.5	—	—	0.6	1.0	1.9
7	25.4	38.2 (5)	6.6	4	14.2	0.3	5.3	0.2	0.2	1.2	1.2	1.0
8	29.8	32.1 (7)	5.6	3.2	14.8	—	8.5	—	0.2	0.8	1.6	1.0
9	35.5	30.2 (8)	13.4	—	15.9	0.3	0.7	—	0.1	0.61	1.4	—
10	42.0	22.3 (17)	16.7	—	13.9	0.3	—	0.8	—	0.5	1.2	—
11	23.1	60.3 (13)	1.1	—	7.1	0.3	3.6	1.0	—	0.4	1.9	—
12	21.6	51.6 (6)	3.9	—	16.3	0.3	0.7	0.4	—	1.1	2.3	0.2
13	23.7	47.1 (8)	1.9	—	19.4	0.3	2.1	1.0	—	0.5	1.6	0.3
14	26.4	37.7 (5)	7.7	0.8	18.3	0.3	3.9	0.2	—	1.2	0.7	0.2
15	46.7	29.2 (6)	2.3	10.7	4.2	0.2	4.6	0.2	—	—	—	1.9
16	46.2	9.5 (12)	10.0	15.9	7.0	0.3	2.2	0.6	0.1	—	2.2	3.0
17	46.4	16.4 (18)	10.6	8.0	11.0	0.3	1.0	—	0.8	—	—	5.0
18	43.7	15.8 (17)	6.7	4.0	4.8	0.3	8.7	1.0	—	0.8	1.2	3.7
19	82.5	2.7 (40)	1.1	4.5	1.0	0.3	2.8	—	0.2	—	—	2.2
20	74.0	2.9 (27)	2.8	8.0	9.2	0.3	1.8	—	0.5	—	—	1.1
21	45.7	2.9 (10)	6.7	23.1	14	0.6	3.7	0.4	—	1.1	—	4.2
22	56.6	4.8 (13)	2.8	25.5	4.4	0.3	0.2	—	0.9	—	—	3.8
23	97.8	—	—	0.8	0.5	—	0.2	—	0.1	—	—	0.2

вдоль средней части линии тренда гранит — базальт (рис. 2, г), а точки песчаников нижней подсвиты хенгурской свиты образуют свою линию тренда, отражающую, вероятно, изменение содержания обломков магматических пород.

Таким образом, на классификационных диаграммах, демонстрирующих соотношения различных породообразующих оксидов, точки расположены в полях, соответствующих разным классам пород. Мы связываем это с различиями критериев, установленными авторами классификаций. Тем не менее на всех диаграммах прослеживаются закономерности, позволяющие выделить группы фигуративных точек песчаников с близкими характеристиками. Верхнекембрийско-нижнеордовикские песчаники хенгурской свиты характеризуются наиболее однородным, существенно кварцевым или слюдисто-кварцевым составом, а большая часть песчаников сокольнинской свиты имеет, по всей видимости, туфогенную природу.

Различия в химическом составе песчаников предполагают различные источники сноса терригенного материала. Для реконструкции состава исходных пород была использована диаграмма F3 — F4 (рис. 3), на которой большинство фигуративных точек расположено в области изверженных пород среднего состава. Также несколько то-

чек попали в поле изверженных пород основного состава и две точки песчаников сокольнинской свиты — в поле изверженных пород кислого состава. Точка, соответствующая кварциту (№ 23), оказалась вне области построения.

Для наиболее полной характеристики химического состава песчаников и выявления геохимических параметров, характеризующих особенности их происхождения и преобразования, применены модульные диаграммы (рис. 4), введенные в использование Я. Э. Юдовичем и М. П. Кетрис [11].

Для количественной оценки процессов выщелачивания и гидролиза использовался ГМ (гидролизатный модуль) = $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$, позволяющий разделять породы, содержащие продукты гидролиза, и породы, в которых преобладает кремнезем (рис. 4, а). По значениям модуля ГМ песчаники характеризуются низкими уровнем зрелости и степенью химического выветривания. Все песчаники средней подсвиты морозовской свиты и верхней подсвиты сокольнинской свиты, попавшие в области нормосиаллитов (нормально-гидролизатных пород) и гипосиаллитов (пониженно-гидролизатных пород), содержат от 3.03 до 5.28 мас. % MgO (табл. 1) и являются псевдосиаллитами. По данным

Рис. 2. Классификационные диаграммы: а — K_2O — Na_2O (по: Петтиджон и др., 1976); б — $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ — $\log(Na_2O/K_2O)$ (по: Петтиджон и др., 1976); в — А—F (по: Предовский, 1980), где А = $Al_2O_3-(K_2O+Na_2O+CaO')$; $CaO' = CaO-CO_2$; F = $(Fe_2O_3+FeO+MgO)/SiO_2$ (молекулярные количества); г — Si—Al—Fe (по: Moor, Dennen, 1970) (атомные количества); I—IV — породы: I — переходные к туффидам и туффиты; II — малоглинистые; III — глинистые; IV — высокоглинистые. Условные обозначения на рис. 2, а: 1—4 свиты: 1 — хенгурская, нижняя подсвита; 2 — сокольнинская, нижняя подсвита; 3 — морозовская, верхняя подсвита; 4 — морозовская, средняя подсвита. Номера точек соответствуют нумерации образцов в табл. 1

Fig. 2. Classification diagrams: а — K_2O vs. Na_2O (by Pettidzhon et al., 1976); б — $\log(SiO_2/Al_2O_3)$ vs. $\log(Na_2O/K_2O)$ (by Pettidzhon et al., 1976); в — А vs. F (by Predovsky, 1980), where: А = $Al_2O_3-(K_2O+Na_2O+Ca_2O)$; $CaO' = CaO-CO_2$; F = $(Fe_2O_3+FeO+MgO)/SiO_2$ (molecular quantity); г — Si—Al—Fe (by Moor, Dennen, 1970) (atomic quantity); I—IV — rocks: I — the transition to tuffites and tuffites; II — little argillaceous; III — argillaceous; IV — high argillaceous. Legend: 1—4 formation: 1 — hengurskaya, 2 — sokolninskaya, 3 — morozovskaya, upper subformation; 4 — morozovskaya, middle subformation. Points numbers correspond to numeration of samples in table 1

Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, породы с содержанием $MgO > 3.0$ мас. % в большинстве случаев являются «базитовыми туффоидами или их прямыми дериватами» [11, с. 49]. На диаграмме F3 — F4 (рис. 3) эти точки расположены в поле песчаников, образовавшихся за счет размыва изверженных пород основного, среднего и кислого составов.

НКМ (модуль нормированной щелочности) = $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3$ — коэффициент Миддлтона [13] — позволяет распознавать примесь в осадочных породах по-

левошпатовой пирокластике [11]. Значение НКМ > 0.31 указывает на присутствие в породе калиевого полевого шпата, так как других высококалийных минералов при изучении шлифов в песчаниках не было обнаружено. Поскольку на величину НКМ кроме полевошпатовой пирокластике влияет присутствие бесщелочных алюмосиликатов, модуль НКМ был использован также в паре с фемическим модулем (ФМ), значения которого (> 0.1) свойственны вулканокластическим грауваккам. Значе-

Рис. 3. Диаграмма F3 — F4 (по: Roser, Korsch, 1986), где $F3 = 30.638 \cdot \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 12.541 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 7.329 \cdot \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 12.031 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 35.402 \cdot \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 6.382$; $F4 = 56.5 \cdot \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 10.897 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 30.875 \cdot \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 5.404 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 11.112 \cdot \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 3.89$. Условные обозначения — см. рис. 2

Fig. 3. F3 vs. F4 diagram (by Roser, Korsch, 1986), where F3 and F4 are mentioned above. Symbols as in Fig. 2

ния $\Phi\text{М} < 0.1$ имеют точки песчаников хенгурской свиты и по одному образцу песчаников верхней и средней подсвиты морозовской свиты. Таким образом, присутствие полевошпатовой пирокластики устанавливается всего в трех образцах песчаников (№ 5, 11 и 18). Близкие значения фемического модуля имеют № 9, 10, 15, 16, 17. На диаграммах НКМ — ГМ и НКМ — ФМ выделяются области, в которых группируются точки песчаников различного возраста. Наиболее древние песчаники средней подсвиты морозовской свиты характеризуются максимальными значениями ГМ и ФМ и занимают промежуточное положение по щелочности. Песчаники сокольнинской свиты имеют низкие значения модулей ГМ и ФМ и максимально высокие НКМ. Нижнепалеозойские хенгурские песчаники характеризуются наименьшими значениями всех рассматриваемых модулей.

Диаграммы зависимости фемического (ФМ) и гидрозатного (ГМ) модулей от титанового ($\text{ТМ} = \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) модуля позволяют судить о составе источников обломочного материала, отражают динамические условия осадконакопления и характер эпигенетических процессов (рис. 4, г, е). По значению титанового модуля большинство песчаников, согласно классификации [11], относятся к нормотитанистому, а единичные образцы песчаников нижней

подсвиты хенгурской свиты — к супер- и гипертитанистому хемотипам. Значение титанового модуля нормотитанистых песчаников близко к средним значениям ТМ для песчаных пород палеозоя, а в супер- и гипертитанистых значительно превышает таковые. Высокие значения гидрозатного модуля (ГМ) для псевдосиаллитов указывают на отсутствие динамической сортировки и обусловлены преимущественно «субстратным» фактором — присутствием туфогенного материала. Повышенная титанистость песчаников нижней подсвиты хенгурской свиты (№ 19 и 23) является, вероятно, следствием накопления тяжелых минералов титана в результате естественного шлихования. Таким образом, использованные модульные диаграммы (рис. 4) позволяют подтвердить туфогенную природу песчаников морозовской и сокольнинской свит.

Поскольку состав песчаников зависит от источника сноса, который определяется породными ассоциациями в области эрозии, мы воспользовались диаграммами, с помощью которых были установлены геодинамические обстановки [12, 15] областей питания (рис. 5, а, б) и седиментации (рис. 5, в, г).

На петрохимических диаграммах М. Бхатия [12] (рис. 5, а, б) большая часть песчаников верхней подсвиты морозовской свиты попала в поля пород, образовавшихся в бассейнах, сопряженных с океаническими островными дугами, или расположена рядом с этой областью. Такая картина распределения точек обусловлена тем, что при формировании этих толщ разрушались комплексы, содержащие большое количество вулканогенных пород, образовавшихся на островодужной стадии развития байкалитид [3, 4], а основным источником материала была островодужная вулканокластика. Из песчаников нижней подсвиты хенгурской свиты лишь три образца попали в поля островных дуг на диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (рис. 5, а). На диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ все фигуративные точки хенгурских песчаников расположены вне стандартных полей, что объясняется низким содержанием в этих породах полевых шпатов — породообразующих минералов-носителей Ca и Na. Можно предположить, что на диаграммах разделяются петрогенные породы первого цикла выветривания и сложенные рециклированным материалом песчаники нижней подсвиты хенгурской свиты.

На диаграммах F1 — F2 и $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (рис. 5, в, г), отражающих геодинамические обстановки бассейнов седиментации, фигуративные точки песчаников морозовской (средней и верхней подсвиты) и сокольнинской (нижней подсвиты) свит также соответствуют океанической островной дуге, а песчаники хенгурской свиты (нижней подсвиты) попадают в поля активной и пассивной континентальных окраин. Такое распределение точек обусловлено тем, что для песчаников морозовской и сокольнинской свит характерно преобладание натрия над калием (табл. 1), а в хенгурских песчаниках наблюдается обратная картина, что связано со значительным содержанием в них мусковита (табл. 2). Две точки песчаников морозовской свиты, попавшие в поле бассейнов континентальных вулканических дуг (рис. 5, в), отличаются низкими содержаниями MgO (табл. 1) и относительно высоким содержанием кварца.

Закключение

Различия химических составов песчаников морозовской (средняя и верхняя подсвиты), сокольнинской (нижняя подсвита) и хенгурской (нижняя подсвита) свит

позволили установить различия в источниках обломочного материала, геодинамических обстановках осадконакопления. По литохимическим критериям четко выделяются две группы, одну из которых составляют высокоглиноземистые и хорошо сортированные песчаники хенгурской свиты, вторую — сходные между собой вулканомиктовые песчаники морозовской и соколинской свит.

Областью образования песчаников морозовской и соколинской свит были океанические островные дуги, а основным источником обломочного материала — островодужная вулканокластита. Область образования песчаников соколинской свиты смещена относительно области образования песчаников морозовской свиты в сторону континентальной окраины, что сопровождалось изменением состава источников питания и ин-

Рис. 4. Модульные диаграммы: а — $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ — ГМ; б — НКМ — ГМ; в — НКМ — ФМ; г — ТМ — ФМ; д — НКМ — ТМ; е — ТМ — ГМ для песчаников (по: Юдович, Кетрис, 2000). Условные обозначения — см. рис. 2

Fig. 4. Modular diagrams: а — $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. GM; б — NKM vs. GM; в — NKM vs. FM; г — TM vs. FM; д — NKM vs. TM; е — TM vs. GM for sandstones (by Yudovich, Ketris, 2000). Symbols as in Fig. 2

тенсивности вулканических процессов, увеличением поступления продуктов размыва сиалических (континентальных) пород. Песчаники морозовской и соколинской свит характеризуются низкой степенью химической зрелости и сортированности. Накопление обломочных толщ сопровождалось поступлениями рыхлого вулканокластического материала, переносившегося воздушным путем непосредственно в бассейн седиментации и смывавшегося со склонов. Количества такого материала в некоторые интервалы времени были настолько значительны, что химический состав песчани-

ков оказался фактически идентичен составу распространенных в районе вулканитов.

В составе песчаников нижнепалеозойской хенгурской свиты, формирование которых проходило в условиях континентальной окраины, присутствуют обломки магматических пород основного и среднего составов и метасадочных пород, в составе цемента этих песчаников преобладает мусковит, а часть плагиоклазов серицитизирована. Относительно высокая для нормальных осадочных пород фемичность и глиноземистость части песчаников хенгурской свиты указывают на присутствие в их составе

Рис. 5. Диаграммы составов песчаников из различных геодинамических обстановок: а — $Fe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/SiO_2$; б — $Fe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$; в — $F_1 - F_2$, где $F_1 = 0.303 - 0.0447 \cdot SiO_2 - 0.972 \cdot TiO_2 + 0.008 \cdot Al_2O_3 - 0.267 \cdot Fe_2O_3 + 0.208 \cdot FeO - 3.082 \cdot MnO + 0.14 \cdot MgO + 0.195 \cdot CaO + 0.719 \cdot Na_2O - 0.032 \cdot K_2O + 7.51 \cdot P_2O_5$, $F_2 = 43.57 - 0.421 \cdot SiO_2 + 1.988 \cdot TiO_2 - 0.526 \cdot Al_2O_3 - 0.551 \cdot Fe_2O_3 - 1.61 \cdot FeO + 2.72 \cdot MnO + 0.881 \cdot MgO - 0.907 \cdot CaO - 0.177 \cdot Na_2O - 1.84 \cdot K_2O + 7.244 \cdot P_2O_5$ (а — в по: Bhatia, 1983); г — $SiO_2 - K_2O/Na_2O$ (по: Roser, Korsch, 1986). Пунктирной линией ограничены поля значений геохимических параметров из бассейнов, сопряженных: А — с океаническими островными дугами; В — с континентальными островными дугами; С — с активными континентальными окраинами; D — с пассивными континентальными окраинами. Fe_2O_3 — суммарное железо в пересчете на Fe_2O_3 . Условные обозначения — см. рис. 2

Fig. 5. Diagrams of sandstone compositions from different geodynamic settings: а — $Fe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/SiO_2$; б — $Fe_2O_3 + MgO - Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$; в — $F_1 - F_2$, where F_1 and F_2 were mentioned above (а—в by Bhatia, 1983); г — SiO_2 vs. K_2O/Na_2O (by Roser, Korsch, 1986). Fields values of geochemical parameters of the pools are indicated by the dotted line, coupled with: А — oceanic island arcs; В — with the continental island arcs; С — with the active continental margins; D — with passive continental margins. Fe_2O_3 — total iron calculated as Fe_2O_3 . Symbols as in Fig. 2

обломков пород, подвергшихся химическому выветриванию в результате перерыва, предшествовавшего накоплению этих песчаников, и позволяют считать такие песчаники перспективным объектом при поисках древних метаморфизованных россыпей.

Литература

1. Дембовский Б. Я., Дембовская З. П., Ключина М. Л. и др. Новые данные по стратиграфии верхнего протерозоя и нижнего палеозоя западного склона севера Урала: Препринт. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1988. С. 63.
2. Канева Т. А. Геохимическая характеристика пород морозовской свиты (RF_{3ms}) Пай-Хоя // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. Т. II. С. 301—304.
3. Кузнецов Н. Б., Соболева А. А., Удоратина О. В. и др. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Протоуралиды, тиманиды и доордовикские гранитоидные вулcano-плутонические ассоциации севера Урала и Тимано-Печорского региона // Литосфера. 2006. № 4. С. 3—22.
4. То же. Статья 2. Позднедокембрийско-кембрийская коллизия Балтики и Арктиды // Литосфера. 2007. № 1. С. 32—45.
5. Маслов М. А., Шляхова Х. Т. Стратиграфия доордовикских метаморфических образований Пай-Хоя // Стратиграфия и литология докембрия и нижнего палеозоя Урала. Свердловск, 1972. С. 55—67. (Труды Ин-та геологии и геохимии УНЦ АН СССР. Вып. 91).
6. Никулова Н. Ю., Пономаренко Е. С., Старикова Е. В. Подводно-морские вулканы в верхнерифейских отложениях Пай-Хоя // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 6. С. 26—32.
7. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 536 с.
8. Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л.: Наука, 1980. 152 с.
9. Терешко В. В. Стратиграфия верхнепротерозойских отложений Северо-Западного Пай-Хоя // Верхний докембрий севера европейской части СССР. Сыктывкар, 1983. С. 130—134.
10. Тимонин Н. И., Юдин В. В., Беляев А. А. Палеогеодинамика Пай-Хоя. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 226 с.
11. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
12. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // The Journal of Geology. 1983. V. 91. № 6. P. 611—627.
13. Middleton G. V. Chemical composition of sandstones // Geological Society of America Bulletin. 1960. V. 71. P. 1011—1026.
14. Moor B. R., Dennen W. H. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments // Journ. Of sediment. Petrol. 1970. V. 40. № 4. P. 1147—1152.
15. 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. V. 94. № 5. P. 635—650.
2. Kaneva T. A. *Geohimicheskaya karakteristika porod morozovskoi svity (RF_{3ms}) Pai-Hoya (The geochemical characteristics of the rocks morozovskoi formation (RF_{3ms}) Pay-Khoy). Geologiya i mineralnye resursy Evropeiskogo Severo-Vostoka Rossii: Materialy XVI Geologicheskogo syezda Respubliki Komi (Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proceedings of XVI Congress of Geology of the Komi Republic). Vol. 2, Syktyvkar: Institute of Geology of Komi Science Centre, 2014, pp. 301—304.*
3. Kuznetsov N. B., Soboleva A. A., Udoratina O. V. i dr. *Douralskaya tektonicheskaya evoliutsiya severo-vostochnogo i vostochnogo obramleniya Vostochno-Evropeiskoi platform. Statya 1. Protouralidy, timanidy i doordovikskie granitoidnye vulkano-plutonicheskie associacii severa Urala i Timano-Pechorskogo regiona (Pre-Uralian tectonic evolution of the North-East and East frame of the Eeast-European Craton. Part 1. Pre-uralides, Timanides and Pre-Ordovician granitoid volcano-plutonic associations of the North Urals and Timan-Pechora region). Lithosphere, No. 4, 2006, pp. 3—22.*
4. Kuznetsov N. B., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Gerceva M. V., Andreichev V. L., Dorohov N. S. *Douralskaya tektonicheskaya evoliutsiya severo-vostochnogo i vostochnogo obramleniya Vostochno-Evropeiskoi platformy. Statya 2. Pozdnedokembriisko-kembriiskaya kolliziya Baltiki i Arktidy (Pre-Uralian tectonic evolution of the North-East and East frame of the Eeast-European Craton. Part 2. Neo-Proterozoic-Cambrian Baltica-Arctida collision). Lithosphere, No. 1, 2007, pp. 32—45.*
5. Maslov M. A., Shlyahova H. T. *Stratigrafiya doordovikskih metamorficheskikh obrazovaniy Pai-Hoya (Stratigraphy Pre-Ordovician metamorphic formations of the Pay-Khoy). Stratigrafiya i litologiya dokembriya i nizhnego paleozoya Urala (Stratigraphy and lithology of Precambrian and Lower Paleozoic of the Urals). Sverdlovsk, 1972, pp. 55—67. (Tr. Inst Geology and Geochemistry Ural Scientific Center of the Academy of Sciences USSR. Vol. 91).*
6. Nikulova N. U., Ponomarenko. E. S., Starikova E. V. *Podvodno-morskie vulkanity v verhneryfeiskikh otlozheniyah Pai-Hoya (Underwater-marine volcanic rocks in the Upper Riphean deposits of Pay-Khoy). Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Centre UB RAS, No. 6 (246), pp. 26—32.*
7. Pettidzhon F., Potter P., Siver R. *Peski i peschaniki (Sands and sandstones). Moscow, Mir, 1976, 536 p.*
8. Predovskii A. A. *Rekonstrukciya uslovii sedimentogeneza i vulkanizma rannego dokembriya (Reconstruction of conditions of sedimentation and volcanism in the Early Precambrian). Leningrad, Nauka, 1980, 152 p.*
9. Tereshko V. V. *Stratigrafiya verhneproterozoiskikh otlozhenii Severo-Zapadnogo Pai-Hoya (Stratigraphy Upper Proterozoic sediments northwest of Pay-Khoy). Verhnii dokembrii severa Evropeiskoi chasti SSSR (Upper Precambrian North European part of the USSR). Syktyvkar, 1983, pp. 130—134.*
10. Timonin N. I., Judin V. V., Belyaev A. A. *Paleogeodinamika Pai-Hoya (Paleogeodynamics of Pai-Khoy). Ekaterinburg, Ural Branch of the Academy of Sciences, 2004, 226 p.*
11. Yudovich Y. E., Ketris M. P. *Osnovy litohimii (Basics lithochemistry). St. Petersburg, Science, 2000, 479 p.*
12. Bhatia M. R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // The Journal of Geology. 1983. V. 91. № 6. P. 611—627.
13. Middleton G. V. Chemical composition of sandstones / Geological Society of America Bulletin. 1960. V. 71. P. 1011—1026.
14. Moor B. R., Dennen W. H. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments // Journ. Of sediment. Petrol. 1970. V. 40. № 4. P. 1147—1152.
15. 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. V. 94. № 5. P. 635—650.

References

1. Dembovskii B. Y., Dembovskaya Z. P., Kluzhina M. L. i dr. *Novye dannye po stratigrafii verhnego proterozoya i nizhnego paleozoya zapadnogo sklona severa Urala (New data on the stratigraphy of the Upper Proterozoic and Lower Paleozoic western slope of the northern Urals). Sverdlovsk, Preprint, Publisher Ural Branch of the Academy of Sciences USSR, 1988, 63 p.*