Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552. 5

DOI: 10.19110/2221-1381-2018-3-17-25

ДОПАЛЕОЗОЙСКИЕ ПЕСЧАНИКИ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

Н. Ю. Никулова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Nikulova@geo.komisc.ru

Приведены результаты изучения и сравнения петрохимических характеристик допалеозойских песчаников хребтов Оченырды и Енганепэ. Сходство характеристик песчаников верхнерифейской отчетливой свиты и базальной части верхневендско-нижнекембрийской еганепэйской свиты позволяет считать эти отложения фациальными аналогами. Прослежено постепенное увеличение в составе песчаников еганепэйской свиты доли рециклированного материала измененных в коре выветривания метатерригенных пород. Установлены различия в обстановках и источниках обломочного материала, повлиявшие на формирование состава песчаников базальной и верхней частей разреза еганепэйской свиты.

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

PRE-PALEOZOIC SANDSTONES OF THE POLAR URALS

N. Yu. Nikulova

Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Nikulova@geo.komisc.ru

We studied and compared the chemical characteristics of Pre-Paleozoic sandstones of the Ochenyrd and Enganepe ridges. The similarity of characteristics of sandstones from Upper Riphean Ochtyviskaya Formation and from the basal part of Upper Vendian-Lower Cambrian Enganepe Formation allows considering these deposits as facies analogues. In the composition of sandstones of Enganepe Formation we traced a gradual increase of recycled material from metaterrigenous rocks altered in the weathering crust. We found differences in the conditions and sources of detrital material, which affected the formation of sandstone composition of the basal and upper parts of the section of Enganepe Formation.

Keywords: sandstone, chemical composition, detrital material, source areas, area of formation, sedimentation conditions.

Введение

В геологическом строении Полярного Урала образования фундамента представлены вулканогенно-терригенными комплексами, в которых значительная часть разрезов приходится на вулканогенно-терригенные и терригенные вулканомиктовые псаммиты, в составе которых наряду с вулканомиктовой компонентой присутствует обломочный материал уже сформированных интрузивных образований и блоков континентальной коры. Изучение литолого-геохимических и минералогических особенностей псаммитов позволяет определить состав источников обломочного материала, климатические условия выветривания разрушавшихся пород, климатические и динамические условия, сопровождавшие накопление исходного осадка, и последовательность постдиагенетических преобразований, сформировавших современный облик пород.

Вулканогенно-осадочные и вулканогенные поздне-рифейско-вендские образования хр. Оченырды, в настоящее время объединенные в бедамельскую серию, во второй половине XX века считались кембрийскими и разными авторами расчленялись на основании локальных петрологических особенностей на различные местные стратиграфические подразделения, возраст, объем, последовательность и названия которых менялись в зависимости от убеждений авторов. Последний этап изучения геологического строения района прове-

ден в ходе геологической съёмки ГДП-2008¹. По ее результатам в Оченырдыском районе бедамельская серия разделяется на две свиты: верхнерифейскую отчетливую, в нижней части сложенную вулканитами основного состава, вверх по разрезу сменяющимися вулканогенно-осадочными и осадочными вулканомиктовыми породами, и верхнерифейско-вендскую лядгейскую, представленную преимущественно вулканитами кислого и среднего состава. Отложения, относящиеся к еганепэйской свите, или ее возрастные аналоги в этом районе отсутствуют.

Вопросы строения, состава и стратиграфической принадлежности еганепэйской свиты были рассмотрены Б. А. Дембовским в ряде фондовых отчетов по результатам геолого-съёмочных и опытно-методических работ и публикаций печати [1, 2]. Стратиграфическое положение и возраст еганепэйской свиты определен на основе микрофитоцитов венда. Абсолютный возраст еганепэйской свиты, перекрывающей ее манитаньдской серии и их структурно-тектоническое положение установлены Н. Б. Кузнецовым и соавторами по результатам изучения детритных цирконов [3, 4].

В ходе изучения допалеозойских терригенных и вулканогенно-терригенных образований в различных

¹ Геологическое доизучение масштаба 1:200 000 листа R-41-XXXV, XXXVI (Кара-Силевская площадь) / Д. В. Зархидзе и др. Сыктывкар, 2008.

районах Полярного Урала мы обратили внимание, что ритмично построенная терригенная толща в составе верхнерифейской очетывисской (RF₃oñ) свиты по строению и литологическим характеристикам слагающих ее пород сходна с флишеидными образованиями верхне-вендско-раннекембрийской енганепэйской (V₂-E₁en) свиты. Ранее этот факт отмечали Л. И. Ефанова и соавторы, изучавшие перспективы золотоносности Енганепэйско-Манитаньрдского района².

Сопоставление литолого-геохимических характеристик позднепротерозойских и вендско-раннекембрийских отложений, развитых на хр. Оченырды и Енганепэ, позволяет выявить особенности и закономерности осадконакопления важного рубежа геологического развития территории, предшествовавшего глобальной перестройке структурно-тектонического плана региона, уточнить стратиграфическое положение и фаціальную принадлежность верхне-докембрийских толщ хр. Оченырды. В обоих случаях перекрывающимися являются терригенные отложения манитаньрдской (E₃-O₁mn) серии с фрагментарно сохранившимися в основании образованиями древней метаморфизованной коры выветривания. Прикладное значение изучения допалеозойских псаммитов обусловлено тем, что они являются источником вещества для терригенных толщ манитаньрдской серии (E₃-O₁mn), в том числе золотоносных.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются песчаники верхней части (руч. Изъя-Вож, западный склон) и основания (р. Енганеяха, восточный склон) енганепэйской свиты в южной части хр. Енганепэ, описанные и опробованные автором, и позднерифейско-вендской очетывисской свиты хр. Оченырды из коллекций А. А. Соболевой и Т. С. Каневой (рис. 1).

В нижней части разреза очетывисская свита сложена базальтами, андезибазальтами, андезитами и их туфами и кластолавами с редкими прослоями туфоалевролитов и туфопесчаников. Вверх по разрезу преобладающими становятся чередующиеся обломочные (вулканогенно-обломочные) псаммиты, алевролиты и сланцы, слагающие седиментационные ритмы мощностью до 1 м. Мощность флишеидного разреза достигает нескольких сотен метров. Слабометаморфизованные песчаники характеризуются бластопсаммитовой структурой, сланцеватой текстурой, образованной ориентировкой слюдистых минералов в составе порового, реже базального цемента. Преимущественно неокатанные и слабоокатанные обломки представлены кварцем, плагиоклазом, в том числе частично замещенным карбонатом и калиевым полевым шпатом. Обломки пород представлены единичными зернами кварц-полевошпатовой мелкокристаллической породы. В нескольких шлифах встречены зерна фрамбоидального пирита [5].

Енганепэйская (V₂-E₁en) свита представлена толщей ритмичного переслаивания аргиллитов, алевролитов и тонкозернистых песчаников. Слабомета-

Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов. Условные обозначения: I — нижнепалеозойские отложения; II — доордовикские отложения; III — участки проведения исследований: 1 — хр. Оченырды; 2 — р. Енганеяха; 3 — руч. Изъя-Вож

Fig. 1. Location map of sections studied. Legend: I — Lower Paleozoic deposits; II — Pre-Ordovician deposits; III — areas of researches: 1 — Ochenyrd Ridge; 2 — Engane-Yaha River; 3 — Izya-Vozh Stream

морфизованные тонко- и мелкозернистые песчаники, залегающие в основании седиментационных ритмов, имеют бластопсаммитовую структуру, массивную или полосчатую, с элементами сланцеватой текстуры. Угловатый или слабоокатанный обломочный материал представлен зернами полевого шпата и кварца. Редкие обломки пород представлены микрокварцитами, глинисто-кремнистыми или кремнисто-глинистыми сланцами. Поровый и базальный цемент сложен микроцеллюлитным агрегатом гидрослюда и хлорита, содержит неправильной формы скопления тонкодисперсного углистого вещества. Многочисленные мельчайшие округлые зерна пирита равномерно рассеяны или образуют кучные скопления.

Диагенетический фрамбоидальный пирит, образование которого является результатом взаимодействия растворенного железа и биогенного сероводорода в условиях свободного доступа растворенного сульфат-иона, обнаружен в песчаниках обеих рассматриваемых свит. Присутствие такого пирита свидетельствует о сходстве условий формирования отложений на этапе седименто- и диагенеза.

В настоящей работе использованы данные о составе пород верхней части разреза енганепэйской свиты и очетывисских отложений, приведенные в соответствующих публикациях [5, 6], дополненные новыми данными, в том числе по нижним горизонтам енганепэйской свиты, полученными автором в результате полевых работ 2017 г., а также предоставленными А. А. Соболевой.

Петрографический состав песчаников изучался в прозрачных шлифах. Содержания породообразующих оксидов определялись весовым химическим методом в лаборатории ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Для интерпретации результатов химических анализов использованы петрохимические модули и индикаторные соотношения породообразующих оксидов [7, 8, 11–19].

² Прогнозно-поисковые работы на золото в пределах хр. Манитаньрды и Енганэ-Пэ (Республика Коми): Отчет / Ефанова Л. И. и др. Сыктывкар, 2009.

Геохимическая характеристика песчаников

Содержания главных породообразующих оксидов, литохимические модули и индикаторные соотношения, использованные для характеристики отложений и реконструкции условий их образования, приведены в табл. 1 и 2.

На диаграмме K_2O-Na_2O [7] в поле граувакк попали фигуративные точки псаммитов очетывисской свиты и основания енганепэйской свиты, что объясняется значительным вкладом в формирование их состава магматических пород с натриевым типом щелочности (рис. 2, а). Исключение составили две точки песчаников из этих разрезов, расположенные в поле

Таблица 1. Содержание породообразующих оксидов в метапесчаниках. мас. %

Table 1. Content of rock-forming oxides in metasandstones, wt. %

N п/п	N обр. Sample No.	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 poi	Сумма Total
1	PU 15-20	67,40	1,08	14,38	0,95	5,99	0,07	1,90	0,52	3,27	1,17	0,11	2,94	99,78
2	PU 15-21	67,90	1,03	13,29	0,62	5,71	0,07	1,98	1,30	2,60	1,43	0,09	3,15	99,17
3	PU 15-22	66,52	0,97	14,42	0,79	5,38	0,06	2,17	0,60	3,79	1,19	0,11	2,85	98,85
4	PU 15-24	70,52	0,88	12,15	0,77	5,44	0,06	1,99	0,40	1,94	1,60	0,08	3,14	98,96
5	PU 15-26	67,65	0,87	14,65	0,09	5,49	0,07	1,83	0,91	2,70	1,64	0,09	3,35	99,34
6	PU 15-49	61,05	0,92	18,13	1,32	6,21	0,06	2,92	0,18	2,10	2,74	0,12	4,17	99,92
7	PU 15-51	60,03	0,79	15,77	0,98	5,45	0,13	2,45	3,51	2,16	1,70	0,08	6,35	99,40
8	PU 15-52	64,74	0,82	15,72	0,84	6,05	0,06	2,61	0,18	3,85	1,33	0,09	3,24	99,52
9	PU 15-46	68,38	0,89	13,93	1,09	4,94	0,07	1,83	1,04	2,76	1,31	0,11	3,25	99,60
10	PU 15-47	68,56	0,99	14,36	1,15	4,91	0,08	1,76	0,94	2,26	1,78	0,10	3,20	100,08
11	227	69,52	0,51	14,28	2,74	1,65	0,04	0,73	2,18	4,58	1,30	0,14	2,32	100,00
12	101	59,12	1,01	20,12	2,27	4,44	0,055	2,68	0,30	0,18	4,99	0,120	4,87	100,16
13	102	62,50	0,81	18,72	2,14	4,29	0,056	2,36	0,30	0,19	4,37	0,088	4,52	100,34
14	103	58,88	1,02	19,76	2,14	4,94	0,068	2,83	0,40	0,40	4,71	0,130	4,89	100,17
15	104	60,02	0,86	20,20	2,05	4,39	0,062	2,51	0,40	0,86	4,24	0,094	4,63	100,32
16	105	60,04	1,10	18,73	2,14	5,01	0,067	2,91	0,55	0,93	3,87	0,290	4,68	100,32
17	106	57,82	0,98	20,19	2,43	4,25	0,063	2,51	0,67	1,16	4,28	0,110	5,31	99,77
18	107	62,06	0,97	19,02	1,82	3,59	0,043	2,37	0,40	0,80	4,36	0,100	4,80	100,33
19	108	62,04	0,85	18,54	2,71	3,41	0,043	2,13	0,30	1,24	3,89	0,068	5,15	100,37
20	109	60,76	0,84	19,10	2,79	3,59	0,047	2,28	0,30	1,28	3,94	0,088	5,10	100,12
21	115	61,71	0,7	18,28	3,12	3,2	0,042	2,15	0,2	1,69	3,6	0,079	5,32	####
22	29-1	62,06	0,83	16,08	0,73	6,72	0,110	2,80	0,87	2,65	1,82	0,15	4,48	99,30
23	29-2-1	63,56	0,78	15,52	0,87	6,96	0,120	2,63	0,87	2,80	1,37	0,12	4,22	99,82
24	29-3-1	64,09	0,86	16,48	0,90	6,23	0,081	2,45	0,52	2,61	1,98	0,14	3,84	100,18
25	30-1-1	59,81	0,93	19,02	1,07	5,94	0,092	3,05	0,30	2,21	3,04	0,13	4,54	100,13
26	30-3-1	60,62	0,99	17,65	1,21	6,52	0,09	2,96	0,40	2,33	2,44	0,17	4,49	99,87
27	30-4-1	64,93	0,85	16,22	0,80	6,22	0,077	2,55	0,30	2,76	1,82	0,13	3,79	100,45
28	32-1-1	66,26	0,82	15,06	0,92	5,60	0,075	2,36	0,64	2,83	1,61	0,37	3,56	100,11
29	32-2-1	63,94	0,88	15,85	0,46	6,42	0,100	2,65	0,87	3,01	1,67	0,14	3,94	99,93
30	32-3-1	64,86	0,70	13,83	0,11	6,82	0,140	2,41	2,13	2,98	0,98	0,09	4,69	99,74
31	39	61,45	0,88	17,76	1,35	5,98	0,09	2,75	0,30	3,08	2,12	0,11	4,06	99,93

Рис. 2. Классификационные диаграммы: а — K_2O-N_2O (по: [7]); б — $\log(Fe_2O_3/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (по: [16]).

Условные обозначения: 1—3 разрезы: 1 — хр. Оченырлд, 2 — р. Енганеяха, 3 — руч. Изья-Вож

Fig. 2. Classification diagrams: а — K_2O-N_2O (according to: [7]); б — $\log(Fe_2O_3/K_2O)-\log(SiO_2/Al_2O_3)$ (according to: [16]).

Legend: 1—3 sections: 1 — Ochenyrd Ridge; 2 — Engane-Yaha River; 3 — Izya-Vozh Stream

Таблица 2. Индикаторные соотношения и модули

Table 2. Indicator ratios and modules

№ п/п	№ обр. Sample No.	log (Na ₂ O /K ₂ O)	log (SiO ₂ / Al ₂ O ₃)	log (Fe ₂ O ₃ / K ₂ O)	F1	F2	F3	F4	K ₂ O / Na ₂ O	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + MgO	CIA	ICV	CIW	Fe/ Mn	(Fe+Mn) /Ti	Al/ (Al+Fe +Mn)	K ₂ O/ Al ₂ O ₃	HKM	ГМ	ТМ
1	PU 15-20	0,45	0,67	-0,09	0,64	-0,93	-3,25	-0,89	0,36	4,69	0,21	2,85	65	1,00	69	90,41	6,68	0,61	0,08	0,31	0,33	0,08
2	PU 15-21	0,26	0,71	-0,36	0,22	-1,19	-3,06	-0,24	0,55	5,11	0,20	2,60	62	1,13	67	89,48	6,53	0,61	0,11	0,30	0,31	0,08
3	PU 15-22	0,50	0,66	-0,18	1,17	0,26	-3,11	-1,13	0,31	4,61	0,22	2,96	63	1,10	66	102,85	6,63	0,64	0,08	0,35	0,32	0,07
4	PU 15-24	0,08	0,76	-0,32	-0,58	-1,13	-3,28	-0,13	0,82	5,80	0,17	2,76	68	1,02	76	101,86	7,38	0,59	0,13	0,29	0,27	0,07
5	PU 15-26	0,22	0,66	-1,27	0,41	-1,66	-3,06	-1,28	0,61	4,62	0,22	1,92	65	0,94	71	73,69	7,16	0,65	0,11	0,30	0,31	0,06
6	PU 15-49	-0,12	0,53	-0,32	0,34	-2,53	-2,17	0,43	1,30	3,37	0,30	4,24	73	0,89	83	109,98	8,29	0,65	0,15	0,27	0,44	0,05
7	PU 15-51	0,10	0,58	-0,24	0,59	-1,33	-3,93	-0,74	0,79	3,81	0,26	3,44	57	1,25	61	44,70	8,47	0,65	0,11	0,24	0,39	0,05
8	PU 15-52	0,46	0,61	-0,20	1,36	-0,73	-3,46	-1,26	0,35	4,12	0,24	3,45	66	1,04	70	107,40	8,79	0,63	0,08	0,33	0,36	0,05
9	PU 15-46	0,32	0,69	-0,08	0,23	-0,56	-3,63	-1,35	0,47	4,91	0,20	2,92	64	1,03	68	72,34	6,87	0,64	0,09	0,29	0,31	0,06
10	PU 15-47	0,10	0,68	-0,19	-0,41	-1,50	-2,73	-0,58	0,79	4,77	0,21	2,91	66	0,96	73	71,36	6,18	0,65	0,12	0,28	0,31	0,07
11	101	-1,44	0,47	-0,34	-1,71	-4,40	2,25	3,37	27,72	2,94	0,34	4,95	76	0,79	98	97,92	6,07	0,72	0,25	0,26	0,47	0,050
12	102	-1,36	0,52	-0,31	-1,93	-4,54	1,38	2,49	23,00	3,34	0,30	4,50	77	0,75	98	92,50	7,28	0,71	0,23	0,24	0,42	0,043
13	103	-1,07	0,47	-0,34	-1,33	-4,20	1,80	3,27	11,78	2,98	0,34	4,97	75	0,83	96	85,60	6,51	0,70	0,24	0,26	0,47	0,052
14	104	-0,69	0,47	-0,32	-1,26	-4,07	1,05	2,09	4,93	2,97	0,34	4,56	75	0,77	93	84,50	6,94	0,73	0,21	0,25	0,46	0,043
15	105	-0,62	0,51	-0,26	0,20	-1,55	1,11	3,34	4,16	3,21	0,31	5,05	74	0,90	91	87,91	6,10	0,69	0,21	0,26	0,45	0,059
16	106	-0,57	0,46	-0,25	-1,03	-3,13	1,57	2,45	3,69	2,86	0,35	4,94	72	0,84	90	83,64	6,13	0,72	0,21	0,27	0,48	0,049
17	107	-0,74	0,51	-0,38	-1,54	-3,01	2,35	3,11	5,45	3,26	0,31	4,19	74	0,80	93	101,11	5,10	0,75	0,23	0,27	0,41	0,051
18	108	-0,50	0,52	-0,16	-1,66	-2,76	1,79	2,22	3,14	3,35	0,30	4,84	73	0,81	91	106,17	6,11	0,74	0,21	0,28	0,41	0,046
19	109	-0,49	0,50	-0,15	-1,39	-2,68	1,59	2,17	3,08	3,18	0,31	5,07	73	0,82	91	101,66	6,47	0,73	0,21	0,27	0,43	0,044
20	115	-0,39	0,53	-0,16	-1,25	-1,97	-0,51	0,58	2,44	3,37	0,30	5,02	73	0,85	88	104,28	6,93	0,73	0,2	0,28	0,41	0,04
21	29-1	0,16	0,59	-0,40	1,25	-1,34	-2,78	0,22	0,69	3,86	0,26	3,53	67	1,03	73	63,19	9,59	0,61	0,11	0,28	0,39	0,052
22	29-2-1	0,31	0,61	-0,20	1,08	-1,78	-3,93	-0,69	0,49	4,10	0,24	3,50	67	1,03	71	60,41	10,65	0,59	0,09	0,27	0,38	0,050
23	29-3-1	0,12	0,59	-0,34	0,85	-2,08	-2,28	0,02	0,76	3,89	0,26	3,35	69	0,93	76	80,78	8,68	0,63	0,12	0,28	0,38	0,052
24	30-1-1	-0,14	0,50	-0,45	0,50	-2,30	-0,75	1,41	1,38	3,14	0,32	4,12	72	0,90	82	68,83	7,78	0,67	0,16	0,28	0,45	0,049
25	30-3-1	-0,02	0,54	-0,30	0,88	-1,60	-2,96	0,07	1,05	3,43	0,29	4,17	71	0,95	79	74,91	8,03	0,64	0,14	0,27	0,42	0,06
26	30-4-1	0,18	0,60	-0,36	0,87	-1,77	-1,93	0,50	0,66	4,00	0,25	3,35	70	0,93	76	84,27	8,70	0,63	0,11	0,28	0,37	0,052
27	32-1-1	0,24	0,64	-0,24	2,57	0,78	-2,87	-0,44	0,57	4,40	0,23	3,28	67	1,01	72	79,07	8,25	0,64	0,11	0,29	0,34	0,054
28	32-2-1	0,26	0,61	-0,56	1,32	-1,30	-2,84	-0,13	0,55	4,03	0,25	3,11	66	1,04	71	65,35	8,50	0,62	0,11	0,30	0,37	0,056
29	32-3-1	0,48	0,67	-0,95	1,32	-1,77	-3,28	-0,21	0,33	4,69	0,21	2,52	58	1,23	61	48,39	11,13	0,58	0,07	0,29	0,33	0,051
30	39	0,16	,54	-0,20	0,85	-1,51	-3,06	-0,81	0,69	3,46	0,295,	4,1	69	0,95	76	69,11	8,44	0,65	0,12	0,29	0,44	0,05

аркозов вблизи линии разграничения. Все точки песчаников из кровли енганепэйской свиты попали в поле аркозов.

Фигуративные точки на диаграмме $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [16] расположены на границе глинистых сланцев и вакков, в поле вакков, аркозов на границе с вакками и вне выделенных полей (рис. 2, б; табл. 2). При этом существенно калиевые песчаники из верхней части разреза, на диаграмме $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ попавшие в область аркозов, оказались на границе глинистых сланцев и вакков. Такое положение точек обусловлено высокой глиноземистостью содержащих песчаников с существенно слюдистым цементом (табл. 1).

На диаграмме F3—F4 [19], позволяющей охарактеризовать источники поступления обломочного ма-

Рис. 3. Положение точек составов песчаников на диаграмме F3—F4 (по: [19]). Условные обозначения — на рис. 2

Fig. 3. Position of points of sandstone compositions on diagram F3—F4 (according to: [19]). See legend in Fig. 2

териала, фигуративные точки псаммитов отчетливо сконцентрированы вблизи границы полей изверженных пород среднего и основного состава (рис. 3). Точки псаммитов верхней части енганепэйской свиты группируются в области богатых кварцем осадочных образований. Расположенная в этом поле точка песчаников из нижней части енганепэйской свиты соответствует образцу наиболее слюдистого песчаника.

По значениям гидролизатного модуля (ГМ) в соответствии с классификацией Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [11] практически все песчаники относятся к типу сиаллитов, при том что большинство песчаников отчетливой свиты являются пониженно-гидролизатными породами, песчаники из нижней части енганепэйской свиты (р. Енганеяха) — нормально-гидролизатными, а из верхней части енганепэйской свиты — повышено-гидролизатными. Такая градация отражает степень седиментационной зрелости пород. Большая часть изученных псаммитов имеет значение НКМ меньше 0.3 (рис. 4, а), что является, по данным Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, критерием присутствия в породе неизмененного калиевого полевого шпата [11], в соответствии с которым максимальное количество вулканогенной примеси содержится в трех образцах песчаников отчетливой свиты.

Зависимость между щелочностью и титанистостью обратная — наименее гидролизатные породы являются наиболее титанистыми. По значению титанового модуля песчаники относятся к нормотитанистым [11] породам (табл. 2; рис. 4, б). Значение титанового модуля всех енганепэйских псаммитов близко к средним значениям для песчаных пород рифея, а четырех отчетливских незначительно превышают и близки к вулканомиктовым отложениям. Очевидно, что повышенная титанистость части песчаников отчетливой свиты обусловлена особенностями петрофонда и зависит от «субстратного» фактора — состава присутствующего в породах вулканогенного материала.

Значения индекса химического выветривания CIA [18], изменяющиеся в отчетливских песчаниках и песчаниках из основания енганепэйской свиты от 57 до 73, отражают периодические изменения климата. В песчаниках верхней части разреза енганепэйской

Рис. 4. Модульные диаграммы: а — ГМ—НКМ; б — НКМ—ТМ (по: [11]). Условные обозначения — на рис. 2

Fig. 4. Module diagrams: а — ГМ—НКМ; б — НКМ—ТМ (according to: [11]). See legend in Fig. 2

свиты CIA изменяются незначительно (73—77) и соответствуют обстановке гумидного климата в области размыва (табл. 2).

Индекс изменения состава ICV [14] для песчаников очетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты близок или превышает пороговое значение 1, характерное для незрелого обломочного материала, а для верхней части енганепэйской свиты составляет 0.77—0.82, что соответствует однородным, содержащим существенное количество глинистых минералов породам (табл. 2).

На диаграмме ICV—CIA [17] фигуративные точки песчаников выстраиваются в собственный тренд, направление которого отражает изменение соотношения гранитной и базальтовой составляющих и степень зрелости обломочного материала (рис. 5). Точки песчаников нижней части енганепэйской свиты и очетывисской свиты занимают промежуточное положение между линиями, соответствующими составам размываемых основных и кислых пород, а точки песчаников кровли енганепэйской свиты располагаются вблизи базальтового тренда.

Рис. 5. Положение фигуративных точек песчаников на диаграмме ICV—CIA (по: [17])

Fig. 5. Position of figurative points of sandstones on ICV—CIA diagram (according to: [17])

Индексы выветривания CIW [15] большинства образцов песчаников очетывисской и базальных слоев енганепэйской свиты составляют 61—76 и соответствуют средней степени разложения исходных пород (табл. 2). По одному образцу песчаников из этих групп имеют значения $CIW > 80$, обусловленные значительным содержанием слюды в цементе. Максимальные значения индекса (до 98), соответствующие верхнему интервалу разреза енганепэйской свиты, указывают на вовлечение в область размыва территорий с развитой корой выветривания.

Минимальные значения соотношения Fe/Mn [8], используемого в качестве фациального индикатора для осадочных отложений, в песчаниках очетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты составляют 44 и 48 и соответствуют мелководным морским отложениям (табл. 2). Большинство значений этого индикаторного соотношения для изученных песчаников соответствует породам, образование которых проходило в прибрежно-морских условиях. Вещественным подтверждением мелководности бассейна являются отмечаемые всеми исследователями

знаки ряби на поверхностях напластования песчано-глинистых сланцев из верхних частей седиментационных ритмов.

Титановый модуль $(Fe+Mn)/Ti$ [10] в интервале 6.07—11.13 и алюминиевый модуль $Al/(Al+Fe+Mn)$ [13] в интервале 0.58—0.73 характеризуют породы как не содержащие примесь экзотического материала (табл. 2).

Значения калиевого модуля K_2O/Al_2O_3 [14] 0.07—0.25 соответствуют породам, сформированным преимущественно за счет рециклированного материала (табл. 2). Максимальные значения (0.21—0.25) этого параметра характерны для песчаников верхней части разреза енганепэйской свиты, а минимальные (0.07—0.08) — для нижней части енганепэйской свиты и очетывисских песчаников. Низкие значения калиевого модуля K_2O/Al_2O_3 , отражающего степень переработки материала в области размыва, соответствуют наиболее измененным процессами химического выветривания отложениям. В нашем случае минимальные значения этого модуля в песчаниках нижней части енганепэйской свиты и очетывисской свиты объясняются малым содержанием калия в размываемых вулканитах с натриевым типом щелочности.

Для выяснения палеогеодинамических условий формирования отложений построены диаграммы K_2O/Na_2O-SiO_2 [19] и F1—F2 [12], разграничивающие предполагаемые области осадконакопления на основании соотношений различных петрогенных оксидов (рис. 6).

На диаграмме SiO_2-K_2O/Na_2O [19] большинство точек песчаников очетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты попали в поле океанических островных дуг, а точки песчаников из кровли енганепэйской свиты распределились между полями активной и пассивной континентальных окраин (рис. 6, а). На диаграмме F1—F2 [12] почти все точки оказались в поле активной континентальной окраины и две точки попали в поле континентальной вулканической дуги (рис. 6, б). На этих диаграммах выделяются две группы точек, одну из которых составляют песчаники очетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты, в составе которых преобладают продукты разрушения подстилающих вулканитов среднего/основного состава при возможном присутствии незначительного количества собственно вулканогенного материала. Отдельно на диаграмме расположены точки песчаников верхней части енганепэйской свиты. В их составе участвуют и другие источники обломочного материала, в том числе разрушавшиеся древние континентальные блоки.

Обсуждение результатов

Анализ индикаторных соотношений, петрохимических модулей и расположения фигуративных точек составов песчаников на различных диаграммах показал сходство практически всех характеристик пород очетывисской свиты и нижних горизонтов енганепэйской свиты. Вещественным подтверждением сходства условий образования является присутствие в породах фрамбоидального пирита, максимальное количество

Рис. 6. Положение фигуративных точек составов песчаников на диаграмме: а — SiO_2 — $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (по:[19]); б — F1 — F2 (по:[12]). Условные обозначения — на рис. 2

Fig. 6. Position of figurative points of sandstone compositions on diagram: а — SiO_2 — $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (according to:[19]); б — F1 — F2 (according to:[12]). See legend in Fig. 2

которого содержится в нижней части енганепэйской свиты.

На классификационных и дискриминационных диаграммах фигуративные точки псаммитов из верхних горизонтов енганепэйской свиты образуют отдельную группу. На диаграммах, применяемых для реконструкции палеогеодинамических обстановок, фигуративные точки составов песчаников попадают в поля, соответствующие различным обстановкам (рис. 6), при том что обе диаграммы отражают снижение тектонической активности в ходе накопления толщи енганепэйской свиты. Расположение фигуративных точек этих песчаников на диаграмме SiO_2 — $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ зависит от смены источников обломочного материала — уменьшения влияния вулканитов и вовлечения в область размытия древних метаморфических пород континентальных блоков. По данным геологической съёмки, вулканиты, составляющие нижнюю часть отчетывисской свиты, образовались в тыловых условиях островной дуги (Зархидзе и др., 2008 г.). Проводившие изотопное датирование детритных цирконов из песчаников основания енганепэйской свиты в юго-западной части хр. Енганепэ Н. Б. Кузнецов и соавторы [3, 4] установили, что источниками позднерифейско-вендских цирконов, составляющих 65 % от изученных зерен, являются комплексы островодужных образований протоуралид-тиманид. Разрушение бедамельских вулканитов и формирование существенно вулканомиктовых терригенных толщ енганепэйской свиты началось уже на фоне последних всплесков вулканической активности, возраст которой по цирконам составляет 552—559 млн лет и совпадает с возрастом туфов из верхней части бедамельской серии [9]. Изотопное датирование детритных цирконов средней части разреза енганепэйской свиты, проведенное А. А. Соболевой с соавторами, показало, что древние цирконы составляют лишь треть от изученного количества зерен [20]. За время накопления более чем километровой толщи енганепэйской свиты произошла постепенная стабилизация тектонического режима и смена источника

питания за счет постепенного вовлечения в область размытия территорий древних континентов, сложенных метаосадочными породами с развитыми корами выветривания.

Заключение

Обобщение полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Петрохимические особенности песчаников отчетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты имеют очевидное сходство. Терригенная часть верхнерифейской отчетывисской свиты является фациальным и аналогом нижней (вендской) части енганепэйской свиты, а учитывая особенности их состава и положения в разрезе, можно предположить синхронное или весьма близкое время накопления. Для подтверждения этого предположения необходимо проведение U/Pb -датирования детритных цирконов из песчаников отчетывисской свиты.

Песчаники отчетывисской свиты и нижней части енганепэйской свиты формировались преимущественно за счет продуктов разрушения подстилающих вулканитов среднего/основного состава, возможно при участии незначительного количества собственно вулканогенного материала. В составе песчаников верхней части енганепэйской свиты заметную роль играли другие источники поступления обломочного материала, в том числе материал разрушавшихся древних континентальных блоков.

За время накопления енганепэйской свиты произошла постепенная смена тектонического режима, климатических условий и источников поступления обломочного материала. Петрохимические характеристики песчаников енганепэйской свиты отражают повышение снизу вверх по разрезу седиментационной зрелости осадка — от относительно железистых низкоглиноземистых, сложенных слабовыветрелым вулканомиктовым материалом, до высокоглиноземистых слюдистых разновидностей, в которых преобладают рециклированные обломки метатерригенных пород,

измененных в коре выветривания, существовавшей на древнем континенте.

Работа выполнена по теме госзадания (ГР № АААА-А17-117121270034-3) при частичной финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект 18-5-5-31).

Литература

1. Дембовский Б. Я. Структурно-фациальная зональность и покровы Полярного Урала и Пай-Хоя: Автореф. ... дис. канд. геол.- мин. наук. М., 1985. 22 с.

2. Дембовский Б. Я., Дембовская З. П., Ключина М. Л., Наседкина В. А. Новые данные по стратиграфии верхнего протерозоя и нижнего палеозоя западного склона севера Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 62 с.

3. Кузнецов Н. Б., Куликова К. В., Удоратина О. В. Структурные особенности протоуралид поднятия Енганепэ (Полярный Урал) как отражение кембрийской коллизии Балтики и Арктиды // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 1. С. 77—82.

4. Кузнецов Н. Б., Натанов Л. М., Белоусова Е. А. и др. Первые результаты изотопного датирования детритных цирконов из кластогенных пород комплексов протоуралид-тиманид: вклад в стратиграфию позднего докембрия поднятия Енганепэ (запад Полярного Урала) // Докл. РАН. 2009. Т. 424. № 3. С. 363—368.

5. Никулова Н. Ю., Козырева И. В. Вещественный состав и особенности формирования метасаммитов хребта Оченырда (Полярный Урал) // Известия УрО РАН. 2016. № 4. С. 101—111.

6. Никулова Н. Ю., Шмелева Л. А., Исаенко С. И. Литологические, минералогические и петрохимические особенности песчаников верхнедевонско-нижнекембрийской енганепэской свиты (хр. Енганепэ, Полярный Урал) // Отечественная геология. 2017. № 3. С. 58—68.

7. Петтидзон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. Москва: Мир, 1976. 536 с.

8. Розен О. М., Журавлев Д. З., Ляпунов С. М. Геохимические исследования осадочных отложений Тимано-Печорской провинции // Разведка и охрана недр. 1994. № 1. С. 18—21.

9. Соболева А. А., Удоратина О. В., Кузнецов Н. Б., Миллер Е., Гроув М. Возраст покровной фации наиболее поздних вулканитов доуралид Полярного Урала по данным U-Pb-датирования цирконов // От минералогии до геохимии: Сборник научных трудов к 130-летию со дня рождения акад. А. Е. Ферсмана. АР Крым, 2013. С. 192—194.

10. Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 300 с.

11. Юдович Я. Э., Кетпис 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. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments / Stockholm Contrib. Geol. 1973. V. 27. No. 2. P. 148—243.

14. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review / J. Sed. Res. 1995. V. 65. P. 1—12.

15. Harnois L. The CIW index: a new chemical index of weathering / Sed. Geol. 1988. V. 55. No. 3/4. P. 319—322.

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

17. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea // Sedimentary Geology. 2002. V. 149. P. 219—235.

18. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715—717.

19. 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.

20. Soboleva A. A., Udoratina O. V., Miller E. L., Grove M., Gehrels G. E. Magmatic source rocks for late Neoproterozoic-early Cambrian of the Enganepe Uplift, western Polar Urals/ abstracts AGU—2010/ 2010 AGU Fall meeting 13—17 December, San Francisco, California, USA, T. 31A—2134.

References

1. Dembovsky B. Ya. *Strukturno-fatsialnaya zonalnost i pokrovy Polyarnogo Urala i Pai-Hoya* (Structural facies zonality and cover of Polar Urals and Pay-Khoy): Extended abstract of PhD thesis. Moscow: 1985, 22 pp.

2. Dembovsky B. Ya., Dembovskaya Z. P., Klyuzhina M. L., Nasedkina V. A. *Novye dannye po stratigrafii verhnego proterozoya i nizhnego paleozoya zapadnogo sklona severa Urala* (New data on stratigraphy of Upper Proterozoic and Lower Paleozoic of western slope of north of Urals). Sverdlovsk, UrB USSR AS, 1988, 62 pp.

3. Kuznetsov N. B., Kulikova K. V., Udoratina O. V. *Strukturnye osobennosti protouralid podnyatiya Engane-pe (Polyarnyi Ural) kak otrazhenie kembriiskoi kollizii Baltiki i Arktidy* (Structural features of protouralides of Engana-Pe Uplift (Polar Urals) as reflection of Cambrian collision of Baltics and Arctide). Doklady Earth Sciences, 2007, V. 415, No.1, pp. 77—82.

4. Kuznetsov N. B., Natapov L. M., Belousova E. A. et al. *Pervye rezultaty izotopnogo datirovaniya detritnykh tsirkonov iz klas-togennykh porod kompleksov protouralid-timanid: vklad v stratigrafii-yu pozdnego dokembriya podnyatiya Engane-Pe (zapad Polyarnogo Urala)* (First results of isotope dating of detrital zircons from clastogenic rocks of protouralide-timanide complexes: contribution to stratigraphy of Late Precambrian Engane-Pe uplift (western polar urals). Doklady Earth Sciences, 2009, V. 424, No. 3, pp. 363—368.

5. Nikulova N. Yu., Kozyreva I. V. *Veschestvennyi sostav i osobennosti formirovaniya metapsammitov hrebta Ochenyrd (Polyarnyi Ural)* (Material composition and features of formation of metapsammites of Ochenyrd Ridge (Polar Urals). Izvestiya UB RAS, 2016, No. 4, pp. 101—111.

6. Nikulova N. Yu., Shmeleva L. A., Isaenko S. I. *Litologicheskie, mineralogicheskie i petrohimicheskie osobennosti peschani- kov verhnenevndsko-nizhnkembriiskoi enganapeiskoi svity (hr. Engane-Pe, Polyarnyi Ural)* (Lithological, mineralogical and petrochemical features of sandstones of Upper Devonian-Lower Cambrian Engane-Pe suite (Engane-Pe ridge, Polar Urals). Otechestvennaya geologiya, 2017, No. 3, pp. 58—68.

7. Pettidzhon F., Potter P., Siver R. *Peski i peschaniki* (Sands and sandstones). Moscow: Mir, 1976, 536 pp.

8. Rozen O. M., Zhuravlev D. Z., Lyapunov S. M. *Geochimicheskie issledovaniya osadochnykh otlogeny Timano-Pecherskoy provintzii* (Geochemical studies of sedimentary deposits in the Timan-Pechora province). *Razvedka I ochrana nedr* (Exploration and protection of mineral resources). 1994, No 1, pp. 18—21.

9. Soboleva A. A., Udoratina O. V., Kuznetsov N. B., Miller E., Grouv M. *Vozrast pokrovnoi fatsii naibolee pozdnykh vulkanitov douralid Polyarnogo Urala po dannym U-Pb datirovaniya*

tsirkonov (Age of cover facies of the latest vulcanites of preuralides of Polar Urals according to U-Pb data of zircons). Beregovoe, AR Krym, 2013, pp. 192–194.

10. Strachov N. M. *Problemy geokhimii sovremennogo okeanskogo litogeneza* (Problems of Geochemistry of modern oceanic lithogenesis). Moscow: Nauka, 1976, 300 p.

11. Yudovich Y. E., Ketris M. P. *Osnovy litokhimii* (Basics of litochemistry). St. Petersburg, Science, 2000, 479 p.

12. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*. 1983, V. 91, No. 6, pp. 611–627.

13. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments. *Stockholm Contrib. Geol.* 1973, V. 27, No. 2, pp. 148–243.

14. Cox R., Lowe D. R. Controls of sediment composition on a regional scale: a conceptual review. *J. Sed. Res.* 1995, V. 65, pp. 1–12.

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

16. Herron M. M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sed. Petrol.* 1988, V. 58, pp. 820–829.

17. Lee Y. I. Provenance derived from the geochemistry of late Paleozoic-early Mesozoic mudrocks of the Pyeongann Supergroup, Korea. *Sedimentary Geology*, 2002, V. 149, pp. 219–235.

18. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, V. 299, pp. 715–717.

19. 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, No. 5, pp. 635–650.

20. Soboleva A. A., Udoratina O.V., Miller E. L., Grove M., Gehrels G. E. Magmatic source rocks for late Neoproterozoic-early Cambrian of the Enganepe Uplift, western Polar Urals/ abstracts AGU-2010/ 2010 AGU Fall meeting 13–17 December, San Francisco, California, USA, T. 31A-2134