

## Вещественный состав и условия образования базальных отложений уралид в бассейне р. Малая Уса (Полярный Урал)

Обобщены результаты изучения геохимии песчаников позднекембрийско-раннеордовикской хойдышорской ( $E_3-O_1hd$ ) свиты в основании палеозойского разреза на Полярном Урале. Диагностирована принадлежность песчаников хойдышорской свиты к осадочным континентальным и прибрежно-морским и морским вулканогенно-осадочным разновидностям. Показано, что химический состав песчаников хойдышорской свиты отражает различные палеогеодинамические обстановки. Высокоглиноземистые, в том числе золотоносные песчаники, содержащие материал древней метаморфизованной коры выветривания, образовались в континентальных условиях. Туфогенная природа части песчаников выявляется при использовании диаграмм, демонстрирующих их генетическую связь с рифтогенными вулканитами на континентальной коре. Песчаники прибрежно-морского происхождения характеризуются низкой степенью химической зрелости. Их состав сформировался в результате механического смешивания обломков магматических (кислых и основных) и метаосадочных пород фундамента при высокой скорости накопления осадка.

Ключевые слова: *песчаник, химический состав, условия осадконакопления, вулканиты.*

N. YU. NIKULOVA (Institute of Geology Komi SC UB RAS)

## Lithological and chemical composition and depositional conditions of basal uralides deposits in the basin of Malaya Usa River (Polar Urals)

The results of the investigations of geochemistry of Late Cambrian – Early Ordovician khoidyshorskaya ( $E_3-O_1hd$ ) suite sandstones at the base of the Paleozoic section in the Polar Urals are generalized in the article. We attributed the sandstones of khoidyshorskaya suite to sedimentary continental, coastal-marine and marine volcanic-sedimentary facies. It was shown that the chemical composition of khoidyshorskaya suite sandstones reflects different paleogeodynamic situation. The high-alumina sandstones (including gold-bearing ones) containing material of ancient metamorphosed weathering crust are formed at continental conditions. Tufogenic character of the sandstones is revealed by using diagrams demonstrating their consanguinity with the riftogenic volcanites in the continental crust. Coastal-marine sandstones are characterized by a low degree of chemical maturity. Their composition was formed as a result of mechanical mixing of magmatic (acid and basic) and metasediment basement rocks fragments at a high rate of sediment accumulation.

Keywords: *sandstone, chemical composition, sedimentary conditions, volcanites.*

**Введение.** Строение и состав базальных горизонтов нижнепалеозойских толщ определяются взаимодействием нескольких факторов (тектонические условия, характер рельефа фундамента, состав подстилающих пород, интенсивность и продолжительность гипергенных процессов) и отражают разнообразие субсинхронно существовавших обстановок и механизмов осадконакопления. Решение обратной задачи (выяснение вещественного состава горных пород) позволяет установить палеотектонические, палеогеографические условия седиментации и источники обломочного материала – параметры, имеющие принципиальное значение, в том числе и для прогнозирования древних метаморфизованных россыпей золота. В изучаемом районе, как и на всем севере Урала, проявления золотой минерализации приурочены к нижнепалеозойским терригенным отложениям в зоне структурно-стратиграфического несогласия фундамент/чехол, а ведущее значение имеют руды, локализующиеся в континентальных и мелководно-морских отложениях. Рудопроявления золота формации метаморфизованных россыпей, приуроченные к сланцам метаморфизованной коры

выветривания по вулканитам фундамента и нижнепалеозойским терригенным породам аллювиального, делювиального и морского происхождения, установлены В. С. Озеровым в нескольких разрезах в междуречье Мал. Кары и Мал. Усы [10]. Нами изучены литологические, геохимические и минералогические особенности этих отложений, состав и морфологические особенности золота [8, 9].

Согласно принятой стратиграфической схеме [13], терригенная толща в основании палеозойского разреза Полярного Урала относится к хойдышорской свите ( $E_3-O_1hd$ ), нижнему члену манитаньрдской серии ( $E_3-O_1mn$ ). Вопрос о ее возрасте и структурно-формационной принадлежности долго оставался дискуссионным – до 1998 г. она считалась молассой венд-кембрийского возраста [14], затем ее отнесли к рифтогенному комплексу уралид и переименовали в бадьяшорскую свиту [1, 2, 13], а позднее этим образованиям возвратили прежнее название – хойдышорская свита (Шишкин и др., 1998). Проведенные исследования [8–10] показали, что в составе свиты присутствуют различные по происхождению отложения.

Цель данной публикации – демонстрация особенностей вещественного состава песчаников из нижнепалеозойских базальных толщ, зависящих от них и указывающих на их генетическую принадлежность, выяснение возможности применения геохимических методов для распознавания обстановок их осадконакопления, необходимых для металлогенического прогнозирования.

**Геологическое строение района.** Изученные разрезы хойдышорской свиты расположены в верховье р. Мал. Кара, где породы фундамента, представленные терригенно-вулканогенными складчатыми образованиями отчетвисской ( $RF_3oc$ ) и лядгейской ( $RF_3-V_2ld$ ) свит, вскрываются в ядре Малокарского антиклинория (рис. 1).

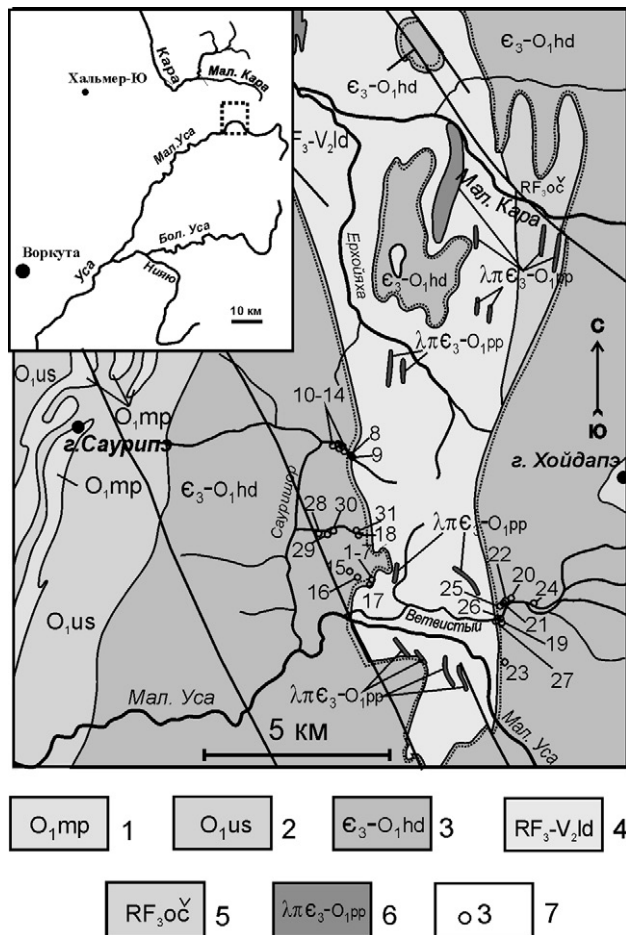
В состав эффузивно-песчано-туфосланцевой толщи отчетвисской ( $RF_3oc$ ) свиты входят эпидотхлорит-альбитовые, кварц-альбит-серицитовые, актинолит-хлорит-альбитовые, серицитовые ортосланцы, базальтовые, андезибазальты, туфы андезибазальтов, а также кварц-альбит-серицитовые, хлорит-серицит-кварц-альбитовые парасланцы, развитые по полимиктовым песчаникам. В верхней части преобладают дациты, риодациты и их лавобрекчии.

Отложения лядгейской свиты ( $RF_3ld$ ) представлены толщей переслаивания основных и кислых эффузивов и их туфов – базальтами, диабазовыми порфиридами, плагиоклазовыми и пироксен-плагиоклазовыми, и их туфами, кислыми лавами, лавовыми брекчиями и туфами.

На породах фундамента с резким угловым несогласием залегают терригенные отложения нижнего палеозоя. На контакте фундамента и чехла местами присутствуют образования кембрийской метаморфизованной коры выветривания [8, 10].

Хойдышорская свита, согласно принятой стратиграфической схеме [13], представляет собой преимущественно гравелитовую толщу, в которой залегают тела (потоки) эффузивов контрастной базальт-риолитовой формации с разрывом и угловым несогласием на разных горизонтах доуралид. Геохимическая специфика основных и кислых магматических пород манитаньрдского комплекса соответствует рифтогенным вулканитам континентальной коры [3]. Верхняя граница хойдышорской свиты проводится по подошве внутриформационных конгломератов и гравелитов грубозернистой пачки усинской свиты. В междуречье рек Кары и Мал. Усы в составе усинской свиты преобладают алевролиты и алевритистые сланцы с тонкой горизонтальной или линзовидной слоистостью. Граница с малопайпудинской свитой определяется появлением у пород зеленовато-серой окраски и носит постепенный характер через переслаивание красноцветных и зеленоцветных разностей до полного исчезновения красноцветов. Малопайпудинская свита представлена зелено-сероцветными терригенными породами с карбонатным цементом и фауной ангарелл.

В. С. Озеров и соавторы предложили для этого района особо выделить, по аналогии с Приполярным Уралом, в алькесвожскую ( $\epsilon_3-O_1al$ ) свиту сохранившиеся в тальвеговых частях палеоврезов фундамента континентальные аллювиально-пролювиальные отложения [10], в которых установлены проявления золоторудной минерализации. Выделение маломощных и фрагментарно



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта (П. С. Попов и др., 2005). На врезке район работ

1 – малопайпудинская свита: зелено-сероцветные, местами черноцветные песчаники и алевролиты с карбонатным цементом; 2 – усинская свита: красно-серые конгломераты, песчаники, алевролиты и аргиллиты; 3 – хойдышорская свита: осадочная, преимущественно гравелито-конгломератовая красноцветная толща с пластовыми телами эффузивов контрастной базальт-риолитовой формации; 4 – лядгейская свита: переслаивание основных и кислых эффузивов и их туфов; 5 – отчетвисская свита: вулканиты основного состава и их туфы, песчаники, алевролиты, сланцы; 6 – пайпудинский комплекс: субинтрузивные тела риолитов; 7 – точки отбора проб

распространенных континентальных отложений, на наш взгляд, еще более усложняет понимание строения нижнепалеозойских толщ, однако присутствие таких пород необходимо учитывать при геологическом картировании и металлогеническом прогнозировании.

**Объект и методы исследования.** В изученных нами разрезах хойдышорской свиты в верхнем течении р. Мал. Уса преобладают гравелиты и мелкогалечные конгломераты, песчаники и алевролиты встречаются довольно редко. Исключение составляет сложный преимущественно песчаниками скальный выход в зоне межформационного контакта на правом берегу р. Мал. Уса. Для геохимических исследований из нескольких разрезов, описанных и опробованных в ходе полевых исследований 2012 г., а также любезно предоставленных В. С. Озеровым и А. А. Соболевой (рис. 1), сформирована выборка (31 шт.) песчаников. В нее

вошли как образцы, генетическую принадлежность которых несложно установить общегеологическими методами, так и песчаники, не имеющие ярких диагностических признаков.

Петрографический состав песчаников изучался в прозрачных шлифах. Содержание породообразующих оксидов определялось традиционным весовым химическим методом в лаборатории Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Поскольку единой общепринятой классификации песчаников по составу обломочных компонентов не существует, а для выделения минеральных видов песчаников используются различные химико-вещественные параметры, эквиваленты и координаты, результаты химических анализов интерпретировались с использованием нескольких, наиболее часто применяемых классификаций и методических приемов палеореконострукций [12, 16, 17, 20]. Они дают возможность оценить вклад отдельных обломочных компонентов, выявить генетическую принадлежность и состав материнских пород, сравнить сходимость результатов, полученных разными способами.

**Литолого-геохимические характеристики песчаников.** Изученные крупно-, среднезернистые и мелкозернистые песчаники характеризуются blastopсаммитовой структурой с лепидогранобластовой структурой порового, базально-порового, редко базального цемента. Количество псаммитовых обломков составляет от 60 до 95, в основном 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 (не более 5 %) представлены силицитом, тонкозернистой кварц-полевошпатовой породой с титанитом, кислым эффузивом и глинистым сланцем. Нормативный минеральный пересчет химических анализов (табл. 1, 2) показал, что содержание кварца от 28,1 до 73,9 и полевых шпатов от 4,9 до 56,6 об. %. В большинстве изученных образцов преобладают слабоокатанные и неокатанные кварцевые зерна с полигональными остроугольными очертаниями, редки хорошо окатанные обломки. Полевые шпаты – ортоклаз, средний плагиоклаз

Таблица 1

Содержание породообразующих оксидов в образцах песчаников, мас. %

Номер образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.	Сумма
1	74,50	0,37	11,75	2,17	2,28	0,019	1,43	0,63	0,34	3,96	0,031	1,49	98,97
2	70,78	0,73	13,81	3,03	1,41	0,005	1,29	0,63	0,47	4,93	0,026	2,32	99,43
3	71,04	0,40	13,98	2,51	1,66	0,011	1,21	0,63	1,00	4,77	0,056	2,27	99,54
4	74,10	0,45	12,59	2,51	0,98	0,005	1,21	0,52	1,02	4,21	0,047	2,01	99,65
5	83,86	0,36	7,63	0,90	1,04	0,005	1,36	0,52	1,35	1,81	0,019	1,18	100,03
6	83,16	0,23	8,24	1,20	0,76	0,014	1,03	0,30	2,86	0,99	0,046	0,88	99,71
7	76,01	0,25	12,62	1,38	0,43	0,014	0,40	0,40	6,53	0,23	0,049	0,52	98,83
8	80,04	1,52	6,97	2,63	2,36	0,060	1,89	0,50	1,08	0,80	0,025	2,26	100,14
9	75,72	0,84	11,51	3,99	0,37	0,015	1,49	0,75	0,99	2,23	0,080	2,46	100,45
10	64,66	1,47	14,65	0,34	6,36	0,11	3,24	0,50	2,84	2,09	0,07	3,50	99,83
11	79,49	0,40	9,76	0,45	0,40	0,02	1,18	0,02	4,39	0,36	0,04	2,61	99,11
12	79,20	0,61	9,97	2,33	0,35	0,01	1,11	0,30	4,14	0,36	0,04	0,98	99,40
13	72,60	0,92	14,23	3,83	0,63	0,03	0,67	0,54	2,40	1,76	0,08	2,24	99,92
14	86,20	1,22	5,00	2,94	0,38	0,02	0,61	0,75	0,61	0,83	0,03	1,37	99,96
15	85,40	0,36	6,86	1,72	0,25	0,010	0,60	0,53	2,06	0,57	0,077	1,01	99,45
16	63,68	1,53	16,14	8,42	0,31	0,034	1,73	0,53	0,39	1,89	0,130	4,93	99,71
17	77,94	0,30	10,54	2,37	0,73	0,011	0,90	0,53	0,83	3,58	0,100	2,11	99,94
18	81,40	0,87	6,61	2,75	1,96	0,080	1,93	0,53	1,06	0,57	0,024	2,03	99,81
19	63,30	1,49	16,64	5,19	0,58	0,052	1,19	2,12	3,47	2,97	0,100	2,27	99,37
20	76,36	0,35	10,66	2,91	0,31	0,034	0,50	0,63	3,88	3,36	0,029	0,45	99,47
21	71,30	1,29	13,06	2,53	1,33	0,046	0,88	1,16	1,72	4,12	0,027	1,91	99,37
22	85,40	0,36	7,22	0,90	0,75	0,010	0,50	0,53	2,95	0,66	0,024	0,36	99,66
23	70,26	0,8	14,48	3,07	0,70	0,030	0,89	1,16	4,98	2,22	0,078	1,23	99,90
24	83,95	0,40	7,16	2,10	0,65	0,015	0,40	0,95	2,50	1,02	0,033	0,75	99,93
25	73,88	0,71	12,69	2,71	0,77	0,019	0,63	1,17	1,94	3,60	0,031	1,60	99,75
26	75,74	0,80	11,52	2,23	0,21	0,015	0,59	0,84	5,51	0,40	0,047	0,53	98,43
27	63,43	1,06	16,10	6,28	1,11	0,066	2,04	0,89	1,64	4,31	0,100	2,73	99,76
28	71,46	0,95	13,71	4,55	0,74	0,046	1,01	0,40	2,52	2,30	0,035	1,88	99,57
29	76,56	0,69	10,85	4,44	0,82	0,040	1,02	0,52	2,35	1,63	0,098	1,50	100,52
30	76,94	0,63	10,73	3,29	0,92	0,048	1,01	0,40	3,15	1,13	0,060	1,31	99,62
31	87,60	0,26	5,54	1,13	1,13	0,019	0,66	0,30	1,72	0,47	0,015	0,66	99,50

Нормативный минеральный состав песчаников, %

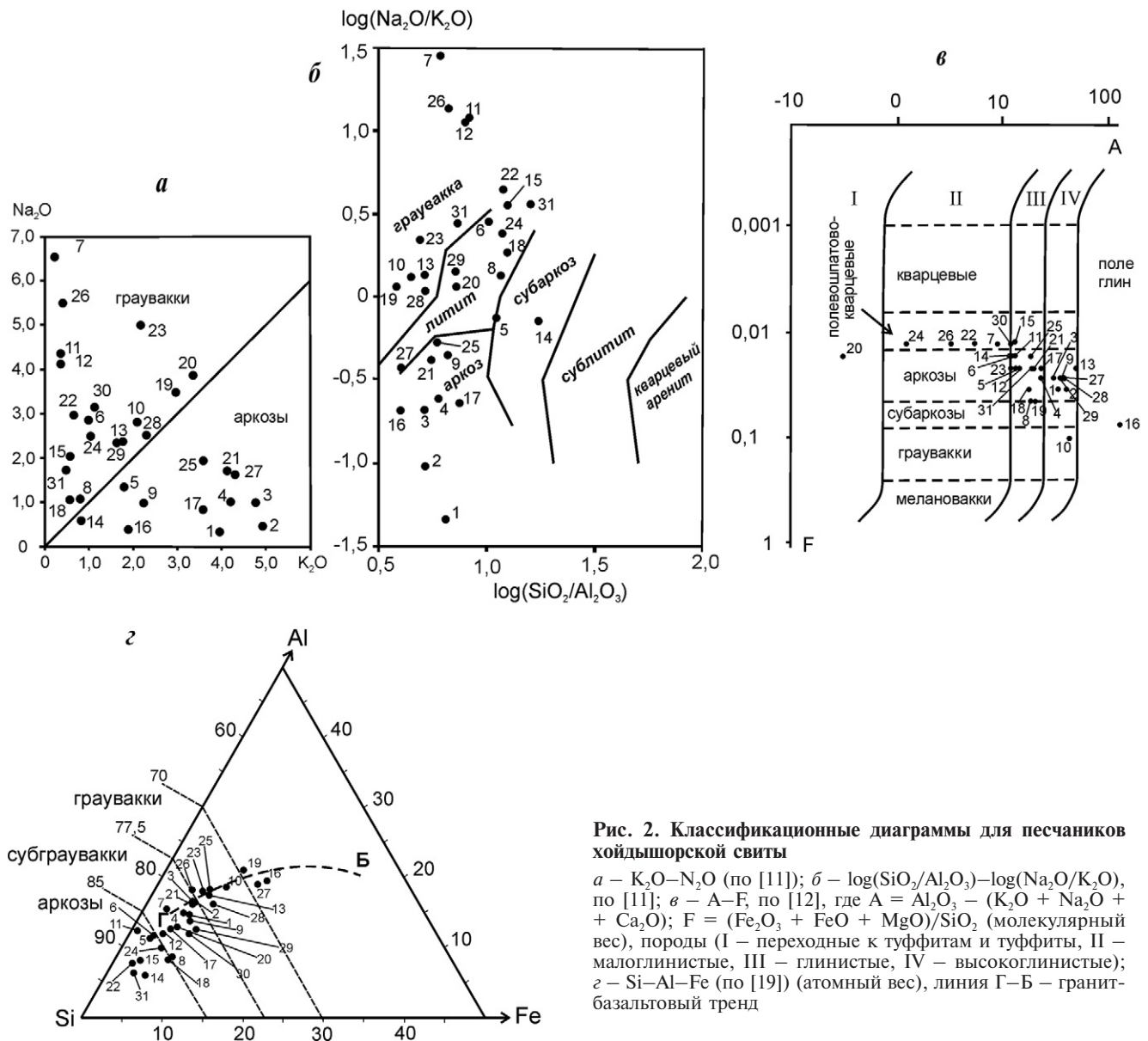
Номер образца	Кварц	Плагиоклаз (№)	Ортоклаз	Мусковит	Фенит	Парагонит	Пирофиллит	Маргарит	Хлорит	Гематит	Лейкоксен	Ильменит	Титанит	Кальцит	Апатит	Амфибол	Эпидот
1	54,3	5,4 (52)	12,2	12,0	4,3	—	—	—	8,9	1,4	0,5	—	—	0,1	—	—	—
2	46,0	7,0 (40)	14,0	15,9	6,0	—	—	—	7,2	3,0	2,1	—	—	0,1	—	—	—
3	47,1	11,2 (25)	11,1	18,0	—	—	—	—	8,0	2,6	0,5	—	—	0,1	—	—	—
4	49,8	10,6 (21)	15,6	13,5	—	—	—	—	6,4	2,6	0,6	—	—	0,1	—	—	—
5	66,6	13,7 (16)	6,1	6,4	—	—	—	—	5,3	1,0	0,5	—	—	0,1	—	—	—
6	60,20	26,1 (8)	4,5	2,4	—	—	—	—	4,9	1,3	0,3	—	—	—	—	—	—
7	36,6	56,0 (3)	0,6	0,8	—	1,4	—	—	1,0	1,4	0,3	—	—	0,3	—	—	—
8	66,7	12,6 (30)	2,8	2,3	—	—	—	—	9,3	2,6	0,9	1,5	—	0,1	—	—	—
9	59,1	10,6 (21)	1,7	16,7	—	—	—	—	5,9	4,0	1,1	—	—	—	—	—	—
10	31,6	28,8 (16)	9,5	3,8	—	—	—	—	22,2	0,3	0,9	1,4	—	—	—	—	—
11	51,5	37,2 (1)	1,7	0,8	—	—	—	—	4,9	0,5	0,5	—	—	—	—	—	—
12	65,2	24,2 (5)	0,6	2,4	—	—	—	—	3,2	2,4	0,6	—	—	0,1	—	—	—
13	50,1	13,5 (15)	2,2	12,0	—	13,0	—	—	3,1	3,8	1,2	—	—	—	—	—	—
14	77,4	7,5 (29)	1,7	4,8	—	—	—	—	2,8	2,9	1,0	—	1,0	—	—	—	—
15	70,2	17,1 (8)	1,7	2,5	—	2,3	—	—	2,6	1,8	0,5	—	—	0,4	—	—	—
16	36,2	4,3 (26)	0,6	15,7	—	—	24,5	—	6,1	8,5	1,9	—	—	0,4	0,3	—	—
17	58,0	7,9 (14)	10,6	15,1	—	—	—	—	4,0	2,4	0,4	—	—	0,3	0,3	—	—
18	70,20	10,2 (20)	1,7	1,7	—	—	—	—	10,5	2,7	1,1	—	—	0,2	—	—	—
19	26,6	37,2 (22)	10,0	11,1	—	—	—	—	5,3	5,1	1,6	—	0,6	0,2	0,3	—	—
20	39,0	33,0 (6)	19,5	0,8	—	—	—	—	0,5	2,4	0,2	—	0,4	0,2	—	3,4	—
21	42,2	15,7 (11)	16,7	11,1	—	—	—	0,7	5,5	2,4	1,0	—	1,2	0,2	—	—	1,3
22	63,9	27,2 (7)	3,3	0,8	—	—	—	—	2,9	1,0	0,3	—	0,4	0,2	—	—	—
23	28,1	44,7 (8)	8,4	7,2	—	—	—	—	2,6	2,2	1,0	—	—	0,2	—	3,5	1,3
24	64,6	23,2 (9)	5,0	1,6	—	—	—	—	1,8	2,1	0,5	—	—	0,6	—	—	—
25	39,2	38,0 (15)	12,3	1,6	—	—	—	—	2,7	2,8	0,5	—	0,9	—	—	—	1,3
26	40,4	50,7 (8)	2,2	—	—	—	—	—	1,3	2,2	0,8	—	—	—	0,3	—	—
27	42,2	16,7 (19)	5,8	16,7	—	—	—	—	9,0	6,2	1,0	—	—	0,2	—	—	—
28	46,2	23,2 (6)	1,1	17,5	—	—	—	—	5,3	4,5	1,0	—	—	0,1	—	—	—
29	55,0	21,3 (7)	1,7	11,2	—	—	—	—	5,0	4,5	1,0	—	—	0,1	0,3	—	—
30	52,3	28,5 (6)	1,1	8,0	—	—	—	—	5,0	3,4	1,0	—	—	0,1	—	—	—
31	73,9	15,7 (6)	2,2	1,0	—	—	—	—	4,6	1,1	1,0	—	—	0,3	—	—	—

и альбит — встречаются в виде слабоокатанных и таблитчатых зерен. Низкая окатанность обломков породообразующих минералов, часто встречающаяся оскольчатая форма кварцевых зерен, хорошая сохранность плагиоклазов позволяют предположить вулканомиктовую природу таких песчаников (обр. 18, 20, 23) при незначительной дальности переноса, высокой скорости седиментации и слабom химическом выветривании. Часть песчаников (обр. 5, 8, 9, 14, 22) отличается лучшей окатанностью как кварцевых, так и полевошпатовых зерен. В шлифах встречены единичные зерна циркона, апатита, цоизита, эпидота и титанита. Два последних минерала присутствуют как в виде обломочных, так и новообразованных зерен. Глинистая составляющая песчаников представлена мусковитом и хлоритом в различных соотношениях (табл. 2), в трех образцах, по результатам нормативного пересчета, присутствует парагонит, по одному образцу содержат пирофиллит и маргарит. В протолочных пробах

в знаковых количествах обнаружены также барит, рутил, хромит и фуксит.

По химическому составу изученная совокупность песчаников весьма неоднородна (табл. 1). Соотношение плагиоклазов, отражающее состав источников обломочного материала (гранитного для аркозов и основного для граувакк) [11], в 19 образцах соответствует грауваккам и в 12 аркозам (рис. 2, а).

В поле аркозов и в нижнем углу поля граувакк ( $\text{Na}_2\text{O} < 2$ ) располагаются точки, соответствующие песчаникам из самых нижних (первые метры) частей разрезов с наименьшим содержанием полевых шпатов и повышенной слюдистостью (табл. 2). Значительное содержание в песчаниках  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , попавших в поле граувакк, объясняется вкладом пород основного состава с резко выраженным натриевым типом щелочности ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  до 68) или высококальциевых кислых магматических пород.



**Рис. 2.** Классификационные диаграммы для песчаников хойдышорской свиты

*a* –  $K_2O-N_2O$  (по [11]); *б* –  $\log(SiO_2/Al_2O_3)-\log(Na_2O/K_2O)$ , по [11]; *в* –  $A-F$ , по [12], где  $A = Al_2O_3 - (K_2O + Na_2O + Ca_2O)$ ;  $F = (Fe_2O_3 + FeO + MgO)/SiO_2$  (молекулярный вес), породы (I – переходные к туффидам и туффиты, II – малоглинистые, III – глинистые, IV – высокоглинистые); *г* –  $Si-Al-Fe$  (по [19]) (атомный вес), линия Г–Б – гранит-базальтовый тренд

На диаграмме  $\log(SiO_2/Al_2O_3)-\log(Na_2O/K_2O)$ , более дробно разделяющей песчаники по соотношению кварца, полевых шпатов и глиноземистого цемента (рис. 2, б), фигуративные точки изучаемых песчаников попадают в поля субаркозов, аркозов, лититов и граувакк. Считается, что отрицательные значения  $\log(Na_2O/K_2O)$  при  $\log(SiO_2/Al_2O_3) > 1,7$  указывают на высокую степень зрелости песчаников [11]. Изученные песчаники характеризуются низкими ( $< 1,3$ ) значениями  $\log(SiO_2/Al_2O_3)$  и широким диапазоном значений  $\log(Na_2O/K_2O)$ , отражающим калиевую или натриевую спецификацию размываемых магматических пород.

Изучение структурно-текстурных, геохимических и минералогических особенностей горных пород из разрезов, расположенных в правом борту долины р. Мал. Уса, указывает на их сходство с базальными толщами уралид на хр. Малдынырд и рядом разрезов на Верхней Печоре [7]. Горизонтально- и косослоистые песчаники, слагающие линзы и прослой в толще кварцевых гравелитов и относящиеся, согласно классификации В. Т. Фролова [15], к флювиальным отложениям приливного фациального типа, содержат большое количество

хорошо сохранившихся зерен, слабоустойчивых к выветриванию полевых шпатов, что указывает на близость источника терригенного материала. Образование таких песчаников могло происходить при холодном климате, незначительном химическом выветривании пород на суше и высоких скоростях седиментации в конечных водоемах стока.

На диаграмме  $A-F$  [12], позволяющей разделять песчаники по глиноземистости (A) и фемичности (F), большая часть фигуративных точек песчаников расположена в полях глинистых и высокоглинистых аркозов (рис. 2, в). Самой низкой фемичностью и глиноземистостью отличаются полевощпат-кварцевые песчаники из-за примеси в них слабоизмененных обломков минералов, характерных для кислых магматических пород. Такие песчаники могут иметь как терригенное, так и пирокластическое происхождение. Высокоглинистые песчаники имеют большую долю глинистого матрикса, часть плагиоклазов в них серицитизирована, они содержат переотложенный материал коры выветривания.

На треугольной диаграмме в координатах  $Si-Al-Fe$  [19] фигуративные точки изученных песчаников

распределены в полях аркозов, субграувакк и граувакк, при этом часть точек в полях субграувакк и граувакк распределена вдоль линии гранит–базальт (рис. 2, з).

В поле субграувакк и граувакк попали точки, соответствующие песчаникам, образовавшимся при разрушении магматических пород преимущественно кислого состава, не претерпевших химического выветривания и значительного перемещения. В поле аркозов попали песчаники морского происхождения из верхних частей разрезов. Максимально в сторону базальтов отскочили точки песчаников из вулканогенно-терригенной толщи на руч. Ветвистый.

Таким образом, на различных классификационных диаграммах одни и те же точки попадают в поля, соответствующие разным классам пород. Очевидно, что в поле граувакк на рис. 2, а, б попали песчаники, отличающиеся высоким содержанием полевых шпатов и сложенные слабоизмененными обломками. Для объективности и наглядности мы оставили в статье все классификационные диаграммы, хотя наиболее достоверно, по нашему мнению, принадлежность к тому или иному классу пород отражает диаграмма А–F (рис. 2, в).

Неоднородность химического состава песчаников позволяет дифференцировать их по предположительным источникам поступления обломочного материала при использовании для этого диаграммы F3–F4\*, на которой точки примерно в равных количествах разместились в полях осадочных, кислых и средних изверженных пород, а в поле основных вулканитов попали только две точки (рис. 3).

Положение точек на диаграмме позволяет предположить, что источником обломочного материала для песчаников служили как метаосадочные породы фундамента, так и изверженные породы. Кислые и основные вулканиты широко распространены в районе и могли размываться с равной интенсивностью, а состав песчаников сформирован в результате механического смешивания, что может служить объяснением значительного количества фигуративных точек в поле средних вулканитов.

Для наиболее полной характеристики химического состава песчаников и выявления геохимических параметров, отражающих особенности их происхождения и преобразования, использованы диаграммы зависимости модулей ГМ, НКМ, ФМ, ТМ (рис. 4), введенных Я. Э. Юдовичем и М. П. Кетрис [16].

ГМ (гидролизатный модуль) =  $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$ , предназначенный для количественной оценки процессов выщелачивания и гидролиза, позволяет отделять породы, содержащие продукты гидролиза, от пород, в которых преобладает кремнезем. По значениям модуля ГМ песчаники отличаются невысоким уровнем зрелости с низкой степенью химического выветривания и в большинстве своем относятся к номо- и мио-силитам, различающимся по содержанию кварца, полевых шпатов и глинистого цемента. Из четырех

\*  $F3 = 30,638 \cdot TiO_2/Al_2O_3 - 12,54 \cdot Fe_2O_{3обш}/Al_2O_3 + 7,329 \cdot MgO/Al_2O_3 + 12,031 \cdot NaO/Al_2O_3 + 35,402 \cdot K_2O/Al_2O_3 - 6,382;$

$F4 = 56,5 \cdot TiO_2/Al_2O_3 - 10,897 \cdot Fe_2O_{3обш}/Al_2O_3 - 30,875 \cdot MgO/Al_2O_3 - 5,404 \cdot Na_2O/Al_2O_3 + 11,112 \cdot K_2O/Al_2O_3 - 3,89.$

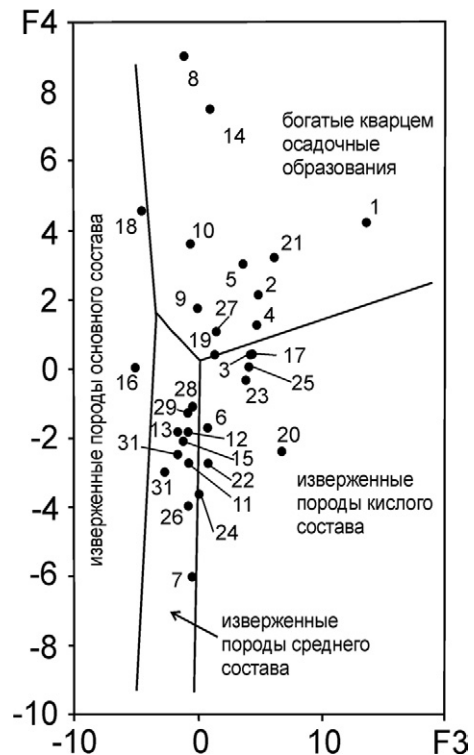


Рис. 3. Диаграмма F3–F4 (по [20]) для песчаников хойдышорской свиты

фигуративных точек песчаников, по составу наиболее близких к трахибазальтам, попавшим в поле сиаллитов, один (обр. 10) относится к псевдосиаллитам ( $MgO$  3,24 мас. %). Породы с содержанием  $MgO > 3,0$  мас. %, по мнению Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, являются базитовыми туффоидами [16]. Кварц-полевошпатовый с хлоритовым цементом туфопесчаник, содержащий 3,24 мас. %  $MgO$  (обр. 10, рис. 4, а), на диаграмме F3–F4 (рис. 3) попал в поле песчаников, образовавшихся за счет размыва богатых кварцем осадочных пород.

НКМ (модуль нормированной щелочности) =  $N_2O + K_2O/Al_2O_3$  – коэффициент Миддлтона [18], по данным Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис, позволяет распознавать примесь в осадочных породах полевошпатовой пирокластике [16]. Значение НКМ  $> 0,31$  указывает на присутствие в породе калиевого полевого шпата. Поскольку на величину НКМ, кроме полевошпатовой пирокластике, влияет присутствие бесщелочных алюмосиликатов, модуль НКМ был использован также в паре с фемическим модулем (ФМ), наиболее высокие ( $> 0,1$ ) значения которого свойственны вулканокластическим грауваккам [16]. Приведенные модульные диаграммы позволяют диагностировать туфогенную природу части песчаников (обр. 10, 16, 19, 27).

Диаграммы зависимости гидролизатного и фемического модулей с титановым (ТМ =  $TiO_2/Al_2O_3$ ) модулем [6] позволяют судить о составе источников обломочного материала, отражают динамические условия осадконакопления и характер эпигенетических процессов (рис. 4, б, з, д). По значению титанового модуля большинство песчаников, согласно классификации [16], относится к нормально-титанистому, обр. 16, 18, 19, 21 – к супертитанистому, а обр. 8 и 14 – к гипертитанистому хемотипам. Значение

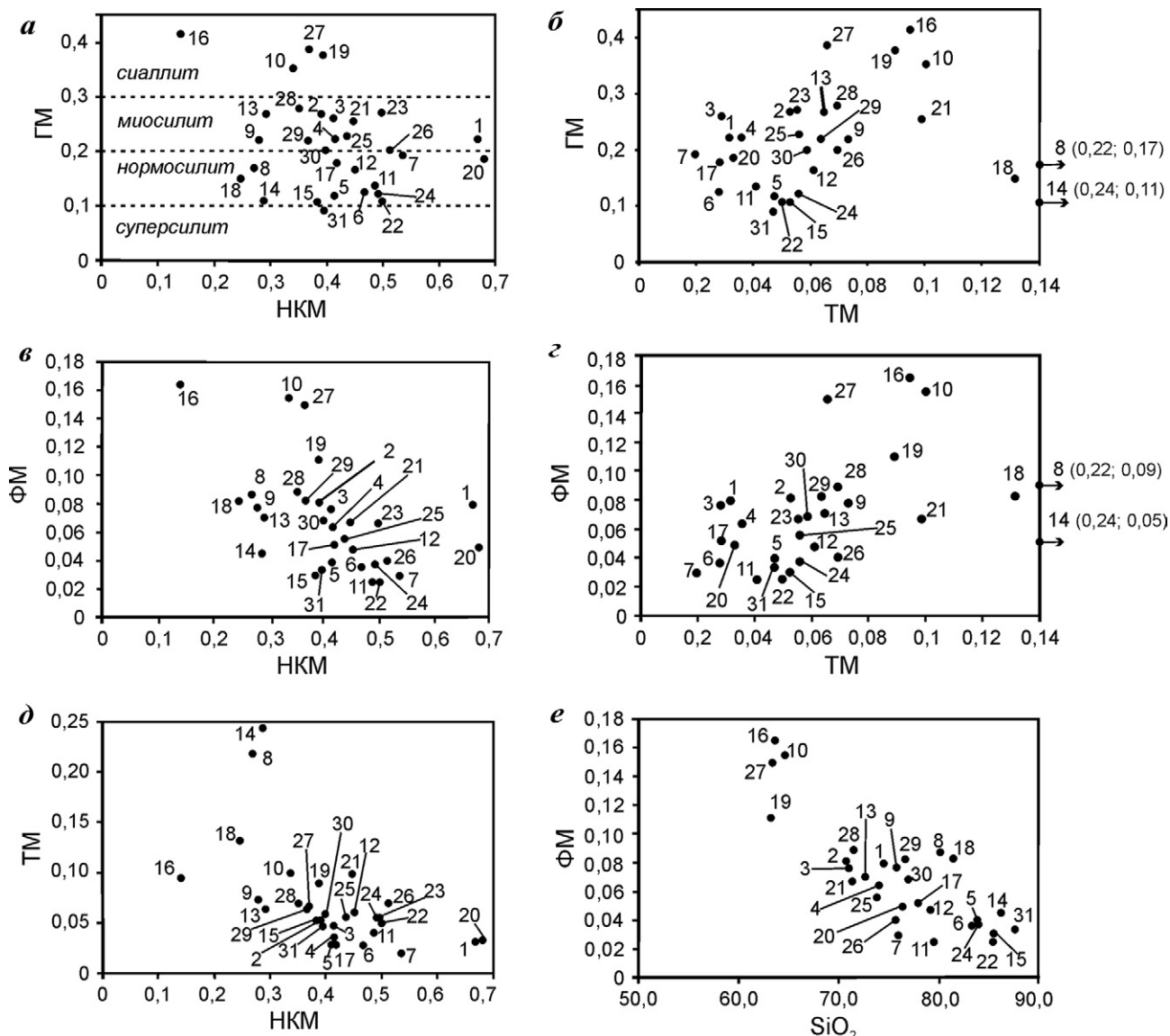
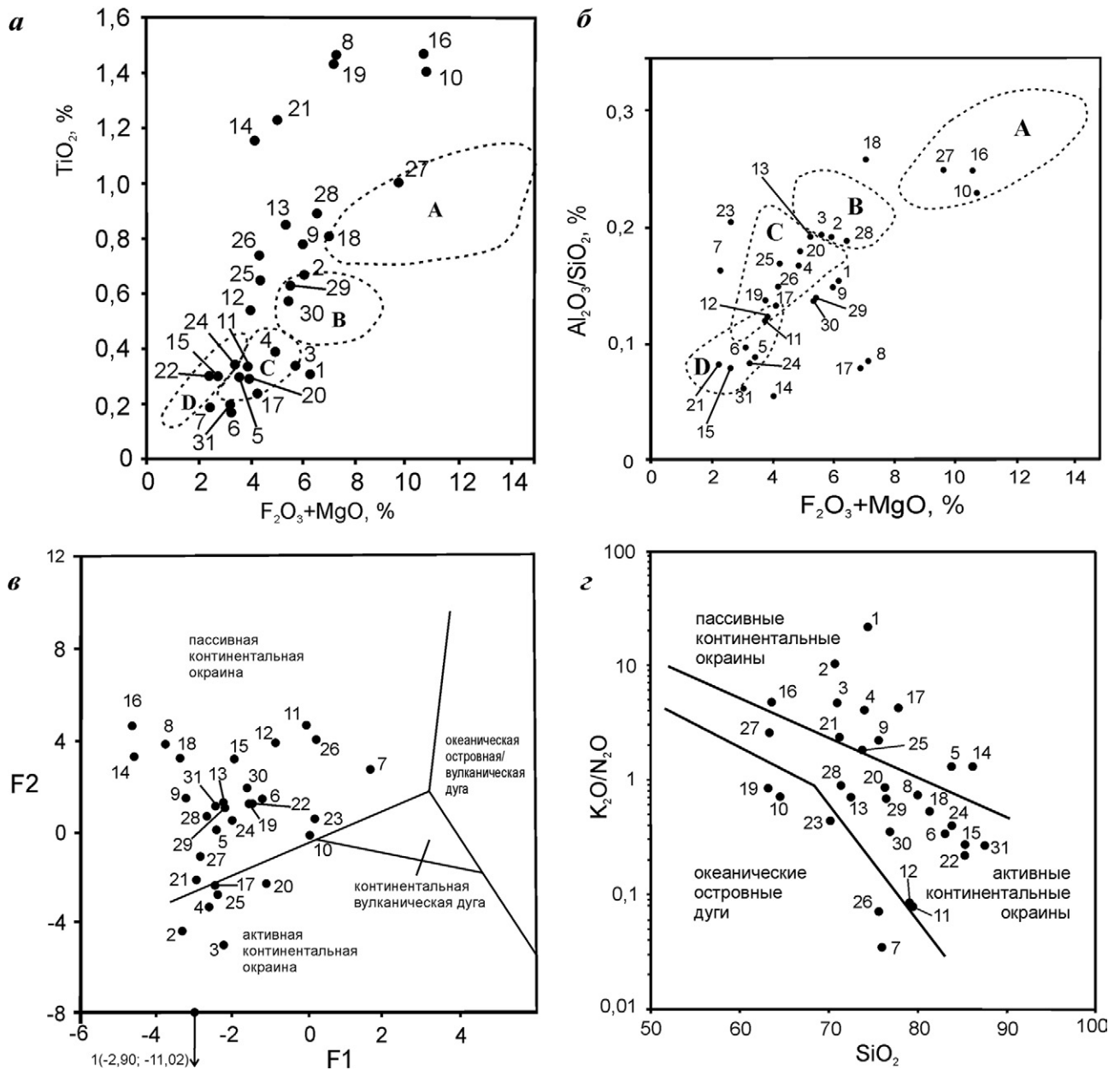


Рис. 4. Модульные диаграммы: *a* – НКМ–ГМ; *б* – ТМ–ГМ; *в* – НКМ–ФМ; *г* – ТМ–ФМ; *д* – НКМ–ТМ; *е* – SiO<sub>2</sub>–ФМ для песчаников хойдышорской свиты, по [16]

титанового модуля 22 песчаников превышает средние значения ТМ для песчаных пород палеозоя [16], в шести случаях оно значительно меньше и в трех случаях совпадает. Значения титанового модуля коррелируются с показателями гидролизатного (ГМ) и фемического (ФМ) модулей, что позволяет предположить туфогенную природу супертитанистых песчаников (рис. 4, б, в). Высокое значение гидролизатного модуля для песчаников обр. 16, 19, 21 указывает на отсутствие динамической сортировки и накопление тяжелых минералов титана в результате естественного шлювания, титанистость изучаемых песчаников обусловлена преимущественно «субстратным» фактором – присутствием туфогенного материала. На содержание титана в породах влияют также эпигенетические процессы в древней коре выветривания на контакте пород фундамента и осадочного чехла. Высокая титанистость песчаников обр. 8, 14, 18 является, вероятно, результатом постдиагенетических изменений исходных пород в кембрийской коре выветривания. Эти песчаники характеризуются низкими значениями НКМ из-за выноса натрия

в нижней гидрослюдистой части профиля выветривания и по результатам нормативного пересчета содержат ильменит или титанит. Положительная корреляция между ТМ–ГМ, ТМ–ФМ и отрицательная между НКМ–ФМ, НКМ–ТМ и SiO<sub>2</sub>–ФМ характерны для вулканомиктовых пород. На этих диаграммах обособляются точки, соответствующие песчаникам с граувакковым, аркозовым и преимущественно кварцевым составом.

Для демонстрации зависимости содержания и соотношения петрогенных оксидов от палеогеодинамической обстановки использован ряд дискриминационных диаграмм [17, 20]. На двух диаграммах (рис. 5, а–б) большая часть песчаников попадает в поля активных континентальных окраин. Вероятно, такая картина распределения точек обусловлена тем, что разрушающиеся доуральские комплексы содержат большое количество вулканогенных и плутонических пород, образовавшихся на островодужной и коллизионной стадиях формирования тиманид [4, 5]. Песчаники хойдышорской свиты, образовавшиеся на пассивной палеозойской окраине Восточно-Европейского континента,



**Рис. 5. Диаграммы состава песчаников в различных геодинамических обстановках**

*a* –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} - \text{TiO}_2$ ; *б* –  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ; *в* –  $\text{F1}-\text{F2}$  (*a*–*б*), по [17]; *з* –  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , по [20]. Поля значений геохимических параметров из бассейнов, сопряженных: *A* – с океаническими островными дугами; *B* – с континентальными островными дугами; *C* – с активными континентальными окраинами; *D* – с пассивными континентальными окраинами.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – суммарное железо в пересчете на  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

наследуют обломочный материал из пород, образовавшихся в обстановках активной континентальной окраины и коллизии.

На диаграмме  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} - \text{TiO}_2$  часть точек находится вне «стандартных» полей вследствие высокой титанистости (рис. 5, *a*), обусловленной присутствием слабоизмененной основной вулканкластики, носителем которой могут быть как вулканомиктовые песчанники первого цикла выветривания, так и туфопесчанники.

Рассчитаны также параметры для построения диаграмм  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Ca}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ . Графические изображения этих данных мы приводить не стали, поскольку большая часть фигуративных точек располагается вне выделенных полей. Однако следует

отметить, что максимальные значения коэффициента  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Ca}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - 12,11, 12,55$  и  $17,54$  – соответствуют песчанникам с низким содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$ , в составе которых, по данным нормативного пересчета, присутствует наибольшее количество слюды при незначительной доле неизмененных плагиоклазов. Они имеют аллювиальный генезис и содержат обломки пород и минералов, измененных в коре выветривания. Низкие содержания натрия характерны для песчанников, содержащих незначительное количество гидролизатного материала, в формировании которых принимали участие породы, претерпевшие преобразования в нижней части профиля выветривания, а его постепенное увеличение отражает поступление в осадок невыветрелых обломочных плагиоклазов.



В область активных континентальных окраин на диаграмме F1–F2\* попали фигуративные точки слюдистых аллювиальных песчаников, ни одна не попала в область вулканических дуг, а подавляющее большинство располагается в поле пассивных континентальных окраин. Точки с высокими значениями параметра F1 на диаграмме SiO<sub>2</sub>–K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (рис. 5, з) попали в поле океанических островных дуг, в то время как точки активных континентальных окраин диаграммы F1–F2 оказались в поле пассивных окраин. Песчаники, соответствующие этим точкам, содержат слабоизмененные калиевые полевые шпаты, источником которых могли быть тела риолитов верхнекембрийско-нижнеордовикского пайпудынского (лпЕ<sub>3</sub>–О,рр) комплекса. Кислые вулканы, среди которых встречаются породы как с калиевым, так и с натриевым типами щелочности, располагались в непосредственной близости к бассейну седиментации и не были затронуты процессами химического выветривания, что объясняет слабую окатанность и значительное содержание в песчаниках продуктов их размыва.

**Заключение.** Песчаники хойдышорской свиты значительно различаются по вещественному составу и сформировались в разных геодинамических обстановках. По геохимическим особенностям уверенно выделяется группа высокоглиноземистых аллювиальных песчаников, в образовании которых принимает участие материал древней метаморфизованной коры выветривания. Такие песчаники залегают в основании палеозойской толщи в разрезах долины руч. Сауришор. Туфогенная природа части песчаников, распространенных на руч. Ветвистый, подтверждается с помощью модульных диаграмм, демонстрирующих их генетическую связь с вулканитами. На диаграммах прослеживаются положительная корреляция между ГМ–ТМ, ФМ–ТМ и отрицательная между ФМ–НКМ, ТМ–НКМ и ФМ–SiO<sub>2</sub>, характерные для вулканомиктовых пород, в том числе туфов основного состава. Большая часть изученных песчаников из верхних частей разрезов на руч. Сауришор и в борту долины Мал. Усы имеет прибрежно-морское происхождение и обладает специфическими особенностями, отражающими состав размываемых пород. Они отличаются низкой степенью химической зрелости, когда основным фактором, формирующим состав песчаников, является механическое выветривание при высокой скорости осадконакопления. В таких песчаниках присутствуют обломки магматических пород основного и кислого состава и метаосадочных пород фундамента. На диаграммах, отражающих неоднородность области питания, обособляются точки, соответствующие песчаникам с гравакковым, аркозовым и преимущественно кварцевым составом. Влияние обломочных пород фундамента, вскрывающихся в приподнятых блоках, распространяется на состав отложений, сформировавшихся непосредственно на этих возвышенностях или рядом с ними. Такие

песчаники отличаются лучшей окатанностью кварцевых обломков, претерпевших не один цикл выветривания, и значительными количествами слюды в них. Накопление обломочных толщ сопровождалось поступлениями рыхлого вулканокластического материала, переносившегося воздушным путем непосредственно в бассейн седиментации и смывавшегося со склонов временными потоками. Количество такого материала в некоторые интервалы времени было настолько значительно, что химический состав песчаников отражает состав распространенных в районе вулканитов. Наибольшее количество устойчивых к выветриванию обломков кварца и кварцитов отмечается в прибрежно-морских песчаниках, а увеличение содержания снизу вверх по разрезу свидетельствует об изменении области питания.

Автор искренне признателен доктору геол.-мин. наук А. М. Пыстину за конструктивные замечания и консультации. Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований УрО РАН № У-15-18-5-47.

1. Дембовский Б.Я., Дембовская З.П., Ключина М.Л., Наседкина В.А. Стратиграфия базальных горизонтов уралид северной части Полярного Урала // Проблемы докембрия и нижнего палеозоя Урала. – М.: Геолфонд, 1985. – С. 63–68.

2. Дембовский Б.Я., Дембовская З.П., Ключина М.Л., Наседкина В.А. Ордовик Приполярного Урала. Геология, литология, стратиграфия. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 192 с.

3. Куликова К.В., Кузнецов Н.Б., Дорохов Н.С. Формационная типизация и палеогеодинамическая позиция позднедокембрийских и ранне-среднепалеозойских комплексов севера Урала // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы науч. конф. – Томск: ЦНТИ, 2001. Вып. 2. – С. 151–159.

4. Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Ст. 1. Протоуралиты, тиманиды и доордовикские гранитоидные вулcano-плутонические ассоциации севера Урала и Тимано-Печорского региона // Литосфера. 2006. № 4. – С. 3–22.

5. Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Ст. 2. Позднедокембрийско-кембрийская коллизия Балтики и Арктиды // Литосфера. 2007. № 1. – С. 32–45.

6. Мигдисов А.А. О соотношении титана и алюминия в осадочных породах // Геохимия. 1960. № 2. – С. 149–163.

7. Никулова Н.Ю. Базальные горизонты уралид севера Урала. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 240 с.

8. Никулова Н.Ю. Особенности строения базальных горизонтов уралид в междуречье Малой Кары и Малой Усы // Литосфера. 2014. № 2. – С. 125–130.

9. Никулова Н.Ю., Филиппов В.Н., Швецова И.В. Первая находка медистого золота в нижнепалеозойских псефитах севера Урала // Докл. РАН. 2014. Т. 456. № 4. – С. 457–460.

10. Озеров В.С., Озерова Э.Н., Игнатович О.О. Новые данные по геологии раннепалеозойских метаморфизованных россыпей золота на севере Урала // Уральский геологический журнал. 2011. № 6. – С. 21–28.

11. Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. – М.: Мир, 1976. – 536 с.

12. Предовский А.А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. – Л.: Наука, 1980. – 152 с.

\* F1 = 0,303 – 0,447·SiO<sub>2</sub> – 0,972·TiO<sub>2</sub> + 0,008·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  
– 2,67·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,208·FeO – 3,082·MnO + 0,14·MgO +  
+ 0,195·CaO + 0,719·Na<sub>2</sub>O – 0,032·K<sub>2</sub>O + 7,51·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;

F2 = 43,57 – 0,421·SiO<sub>2</sub> + 1,988·TiO<sub>2</sub> – 0,526·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,551·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  
– 1,61·FeO + 2,72·MnO – 0,907·CaO – 0,177·Na<sub>2</sub>O –  
– 1,84·K<sub>2</sub>O + 7,244·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

13. Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой) / Роскомнедра, ИГиГ УрО РАН. — Екатеринбург, 1993.
14. Унифицированные и корреляционные стратиграфические схемы Урала. — Свердловск, 1980.
15. Фролов В.Т. Литология: Учебн. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 1995. — Кн. 3. — 352 с.
16. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. — СПб.: Наука, 2000. — 479 с.
17. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // *J. of Geol.* 1983. Vol. 91. No 6. — P. 611–627.
18. Middleton G.V. Chemical composition of sandstones // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 1960. Vol. 71. — P. 1011–1026.
19. Moor B.R., Dennen W.H. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments // *J. of Sediment. Petrol.* 1970. Vol. 40. No 4. — P. 1147–1152.
20. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio // *J. of Geol.* 1986. Vol. 94. No 5. — P. 635–650.
1. Dembovsky B.Ya., Dembovskaya Z.P., Klyuzhina M.L., Nasedkina V.A. Stratigraphy of basal horizons of uralides of the Northern Polar Urals. *Problems of Precambrian and Lower Paleozoic Urals*. Moscow: Geolfond. 1985. Pp. 63–68. (In Russian).
2. Dembovsky B.Ya., Dembovskaya Z.P., Klyuzhina M.L., Nasedkina V.A. Ordovik Pripolyarnogo Urala. *Geologiya, litologiya, stratigrafiya* [Ordovician Subpolar Urals. Geology, lithology, stratigraphy]. Sverdlovsk: UrO AN SSSR. 1990. 192 p.
3. Kulikova K.V., Kuznetsov N.B., Dorokhov N.S. Formation typification and paleogeodynamic position of Late Precambrian and Early Middle Paleozoic complexes of Northern Urals. *Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Proceeding of conference*. Tomsk: TsNTI. 2001. No 2, pp. 151–159. (In Russian).
4. Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V. et al. Preural tectonic evolution of north-eastern and eastern margin of East European platform. Paper 1. Protouralides, timanides and Pre-Ordovician granitoid volcano-plutonic associations of Northern Urals and Timan-Pechora region. *Litosfera*. 2006. No 4, pp. 3–22. (In Russian).
5. Kuznetsov N.B., Soboleva A.A., Udoratina O.V. et al. Preural tectonic evolution of north-eastern and eastern margin of East European platform. Paper 2. Late Precambrian-
- Cambrian collision of Baltica and Arctica. *Litosfera*. 2007. No 1, pp. 32–45. (In Russian).
6. Migdisov A.A. Relation of titanium and aluminum in sedimentary rocks. *Geokhimiya*. 1960. No 2, pp. 149–163. (In Russian).
7. Nikulova N.Yu. Bazalnye gorizonty uralid severa Urala [Basal horizons of uralides of Northern Urals]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN. 2013. 240 p.
8. Nikulova N.Yu. Structure of basal horizons in interfluvial area of Malaya Kara and Malaya Usa rivers. *Litosfera*. 2014. No 2, pp. 125–130. (In Russian).
9. Nikulova N.Yu., Filippov V.N., Shvetsova I.V. First find of copper gold in Lower Paleozoic psephites of Northern Urals. *Dokl. Russian Academy of Sciences*. 2014. Vol. 456. No 4, pp. 457–460. (In Russian).
10. Ozerov V.S., Ozerova E.N., Ignatovich O.O. New data on geology of Early Paleozoic metamorphized gold placers at Northern Urals. *Uralsky geologicheskii zhurnal*. 2011. No 6, pp. 21–28. (In Russian).
11. Pettijohn F., Potter P., Siver R. Peski and peschaniiki [Sands and sandstones]. Moscow: Mir. 1976. 536 p.
12. Predovskii A.A. Rekonstruktsiya uslovii sedimentogeneza i vulkanizma rannego dokembriya [Reconstruction of sedimentogenesis and volcanism or Early Precambrian]. Leningrad: Nauka. 1980. 152 p.
13. Stratigraficheskie shemy Urala (dokembrii, paleozoi) [Stratigraphic maps of Urals (Precambrian, Paleozoic)]. Roskomnedra: IGiG UrO RAN. Ekaterinburg. 1993.
14. Unificirovannye i korrelyacionnye stratigraficheskie skhemy Urala [Unified and correlation stratigraphic maps of Urals]. Sverdlovsk. 1980.
15. Frolov V.T. Litologiya. Uchebn. Posobie [Lithology. Study book]. Moscow: MGU. 1995. Book 3. 352 p.
16. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Osnovy litohimii [Basics of lithochemistry]. St. Petersburg: Nauka. 2000. 479 p.
17. Bhatia, M.R. 1983: Plate tectonic and geochemical composition of sandstones. *The Journal of Geology*, vol. 91, 6, 611–627.
18. Middleton, G.V. 1960: Chemical composition of sandstones. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 71, 1011–1026.
19. Moor, B.R., Dennen, W.H. 1970: A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments. *Journal of sedimentary petrology*, vol. 40, 4, 1147–1152.
20. Roser, B.P., Korsch, R.J. 1986: Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio. *The Journal of Geology*, vol. 94, 5, 635–650.

Николова Наталья Юрьевна — докт. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН. Ул. Первомайская, д. 54, Сыктывкар, 167982, Россия. <nikulova@geo.komisc.ru>

Nikulova Natalia Yurievna — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of the Komi Science Center of SC UB RAS (IG Komi SC UB RAS). 54 Pervomayskaya str., 167982, Syktvykar, Russia. <nikulova@geo.komisc.ru>