

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 553.08+552.22

doi: 10.26907/2542-064X.2024.3.525-547

НОВЫЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ УЧАСТКА МАЛЕНЬКИЙ (ПАЙ-ХОЙ, НЕНЕЦКИЙ АВТОНОМНЫЙ ОКРУГ)

Р.И. Шайбеков, А.М. Шмакова, Е.М. Тропников, Г.В. Игнатьев

*Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ «Коми научный центр
Уральского отделения РАН», Сыктывкар, 167000, Россия*

Аннотация

В статье приводятся данные о вещественном составе и рудной минерализации участка Маленький, расположенного в пределах хенгурского габбро-долеритового комплекса Пай-Хоя. В результате петрогеохимического исследования пород установлено, что изученные породы представлены двумя типами: мелкокристаллическим кварцевым и средне- и крупнокристаллическим кварцсодержащим метагаббро-долеритом. Исходя из содержаний Y, Zr, Nb, можно сделать заключение, что метагаббро-долериты формировались во внутримантийной обстановке из обогащенных мантийных источников при плавлении гранатового перидотита с небольшим вкладом в источник расплава древней континентальной коры. Детальное изучение минерального состава оруденения показало, что в пределах участка можно выделить два типа минерализации: сфалерит-халькопирит-пирротиновый гнездово- и прожилково-вкрапленный (I тип) и кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротиновый прожилково-вкрапленный (II тип). Последний (II тип) является наиболее продуктивным и характеризуется присутствием как высокотемпературных кобальт- и никельсодержащих сульфидных минералов, так и низкотемпературных палладистых (котульскит) и серебристых (гессит) теллуридов.

Ключевые слова: петрография, петрохимия, минералогия, метагаббро, сульфиды, медно-никелевое оруденение, участок Маленький, Пай-Хой.

Введение

Магматиты Пай-Хоя представляют собой силлы, реже дайки долеритов, габбро-долеритов, которые широко развиты среди отложений Карской (сланцевой) структурно-фациальной зоны и известны под названием оюского и хенгурского (центральнопайхойского базальтоидного) габбро-долеритового комплексов, с которыми пространственно и генетически связано сульфидное медно-никелевое оруденение [1–4]. На северо-западном и центральном Пай-Хое, а также в пределах центрального выступа Карской депрессии отмечается приуроченность большинства силлов к средне- и верхнеордовикским отложениям с тенденцией сокращения их количества вверх по разрезу. Редкие силлы и дайки известны среди силурийских и нижнедевонских отложений, а на юго-восточном Пай-Хое отмечается приуроченность силлов к эйфель-живетской ассоциации пород падейской свиты.

Проведенное в последнее время абсолютное датирование по единичным цирконам (U/Pb, SHRIMP-II, LA-ICP-MS) габбро-долеритов хенгурского и оюского комплексов, в том числе долеритов центрального выступа Карской депрессии, существенно уточнило возраст магматических комплексов Пай-Хоя. Так, для пород центральной части хенгурского комплекса получены 3 датировки (369.8 ± 2.27 , 374.6 ± 2.0 и 381.4 ± 2.0 млн лет [5, 6]), для долеритов Карской депрессии – 375.5 ± 2.6 млн лет [7], что соответствует франскому веку позднего девона. Абсолютный возраст долеритов оюского комплекса определен как 313.2 ± 2.6 млн лет (средний карбон, московский век [8]), он ранее считался изначально синхронным хенгурскому комплексу, а позже – среднеордовикским [9]. Таким образом, находит подтверждение возможная гетерохронность интрузивных комплексов [4, 10].

Целью данной работы является уточнение петрографических, геохимических и минералогических особенностей пород и оруденения участка Маленький.

1. Методы исследования

Оптические свойства минералов в шлифах изучали с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV100ND (Nikon Corp., Япония). Химический состав пород получен методами мокрой химии и рентгенофлуоресцентным методом на приборе HORIBA MESA-500W (HORIBA, Япония). Для определения содержания редких, рассеянных и редкоземельных элементов использовали масс-спектрометр с индуктивной связанной плазмой Agilent 7700x (Agilent Technologies, Inc., США). В качестве стандартов использованы BHVO-2 (базальт), DTS-2b (дунит), GSP-2 (гранодиорит) и SY-2 (сиенит).

Электронно-микроскопические исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega3 LMH (Tescan, s.r.o., Чешская Республика) в режиме обратно рассеянных электронов. Химический состав минералов определен в режиме энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием приставки INCA X-MAX 50 мм (Oxford Instruments, Великобритания) при напряжении 20 кВ, силе тока 15 нА, вакууме 0.05 Па и диаметре пучка 2 мкм. Время экспозиции подбирали так, чтобы число зарегистрированных за это время импульсов составило 500 000.

Аналитические исследования проводили с использованием приборной базы в ЦКП «Геонаука» в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

Аббревиатуры минералов приведены в соответствии с рекомендациями IMA-CNMNC [11].

2. Краткая геологическая характеристика района и объекта исследований

Хенгурский (центральнопайхойский) магматический комплекс, в пределах которого располагается изучаемый участок Маленький, представлен преимущественно силлами, реже дайками кварцевых и кварцсодержащих долеритов и их дифференциатов и локализуется в пределах Карской (сланцевой) структурно-фациальной зоны. Мощность интрузивных тел варьирует от первых метров до 150–200 м, а протяженность достигает 15–17 км.

Участок Маленький (координаты N 69°02'30", E 62°44'59", рис. 1) расположен в водоразделе рек Большая Ою и Хей-Яха, в 500 м от устья небольшого ручья, впадающего в озеро Нябыто.

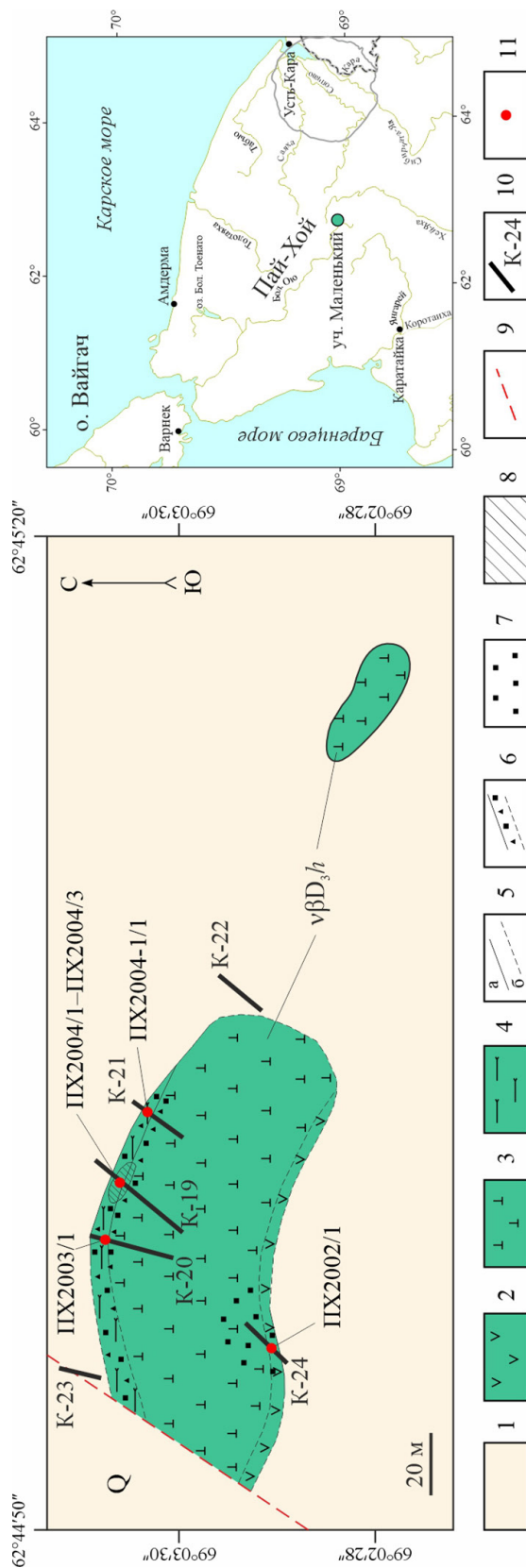


Рис. 1. Геологическая карта участка Маленький. Составлена по фоновым материалам [2] и авторским данным. Условные обозначения: 1 – суглинки темно-серые четвертичные (Q); 2–4 – хенгурский габбро-долеритовый комплекс ($v\beta D_3 h$), метагаббро-долериты: 2 – мелкокристаллические кварцевые; 3 – средне- и крупнокристаллические кварцсодержащие; 4 – средне- и крупнокристаллические граниты: а – достоверные, б – предполагаемые; 5 – зоны сфалерит-халькопирит-пирротинового гнездово-вкрапленного типа минерализации; 6 – зоны кобальтин-пирит-пентландит-пирротинового прожилково-вкрапленного типа минерализации; 7 – участки с повышенными концентрациями сульфидов (более 15 %); 8 – разрывное нарушение предполагаемое; 9 – каналы и их номера; 10 – точки и интервалы отбора образцов

Участок обнажается на площади 0.5 км² и представляет собой, по данным предыдущих исследований, лишь верхнюю часть (горизонт) гравитационно-дифференцированного интрузивного тела, сложенного среднезернистыми кварцсодержащими габбро-долеритами и крупнозернистыми кварцевыми долеритами, которые залегают с породами тальбейтивисской свиты среднего-позднего ордовика. Горизонт имеет мощность около 3.5 м, характеризуется наличием шлиров, линзообразных включений долерит-пегматитов и прослежен по поверхности и горным выработкам на 70 м. Согласно фоновым материалам [2] в кровле и подошве были выделены оливиновые габбро, однако нами эти породы не обнаружены. Непосредственно в крупнозернистых долеритах установлена халькопирит-пирротиновая минерализация прожилково-вкрапленного и гнездово-вкрапленного типа, которая вскрыта тремя из шести канав. Минерализация представлена преимущественно пирротином (10 %), который встречается в виде зерен округлой формы размером до 1 см, гнездовых скоплений неправильной формы до 0.6 см и тонких прожилков мощностью до 0.5 см. Халькопирит (1 %) отмечен в основном в виде редкой вкрапленности по трещинам отдельности совместно с кальцитом, хлоритом, кварцем, реже в сростании с пирротином. По результатам спектральных анализов бороздовых проб из рудных интервалов канав (рис. 1), сделанных в конце 70-х гг. прошлого столетия, содержание никеля составило 0.001–0.004 %, меди – 0.01–0.06 %, кобальта – 0.0008–0.003 %. При этом минералы-концентраторы никеля и кобальта исследователями не установлены [2].

3. Петрографо-геохимические и минералогические исследования

В пределах интрузивного тела участка Маленький выделены две разновидности метагаббро-долеритов, отличающиеся по размеру кристаллов и минеральному составу: мелкокристаллический кварцевый и средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагаббро-долериты (рис. 2).



Рис. 2. Метагаббро-долериты в горных выработках. Слева – мелкокристаллические метагаббро-долериты, канава К-24, справа – зона рудной минерализации в средне- и крупнокристаллических кварцсодержащих метагаббро-долеритах, канава К-19

3.1. Мелкокристаллический кварцевый метагаббро-долерит (образец ПХ2002/1) в юго-западной части интрузии имеет массивную текстуру и гипи-

диоморфную (с элементами офитовой и графической) структуру. Первичными минералами являются плагиоклаз (~45 %), клинопироксен (~45 %), кварц (6 %), рудные минералы (5 %), акцессорным минералом – апатит (менее 1 %), вторичными – хлорит (1 %), амфибол (менее 1 %), мусковит (менее 1 %), клиноцоизит (менее 1 %), титанит (менее 1 %).

Метагаббро-долерит состоит из лейст плагиоклаза (0.1×0.25 мм) и более крупных изометричных, реже удлинённых зерен пироксена размером 0.2–1.2 мм (рис. 3, *а* и *б*). Порода подвергалась процессам метаморфизма, который проявлялся в замещении плагиоклаза соссюритом, а пироксена – тонкоигольчатым агрегатом амфибола, иногда до полных метаморфоз. По амфиболу, в свою очередь, кристаллизуется титанит в виде округлых агрегатов (0.05 мм). Изометричные агрегаты хлорита встречаются в межзерновом пространстве. Редко отмечаются призматические кристаллы апатита размером 0.2 мм. Кварц установлен в виде двух генераций. Первая генерация кварца (первичный кварц) представлена в виде редких графических сростков с плагиоклазом и угловатых зерен размером 0.2 мм. Вторая генерация (вторичный кварц) частично заполняет трещину шириной 0.2 мм. Часто во вторичном кварце наблюдаются тонкие игольчатые кристаллы амфибола (0.05–0.1 мм). В этой же трещине установлены тонкочешуйчатые агрегаты хлорита, мелкие чешуйки мусковита и волокнисто-игольчатые агрегаты клиноцоизита (рис. 3, *в* и *г*).

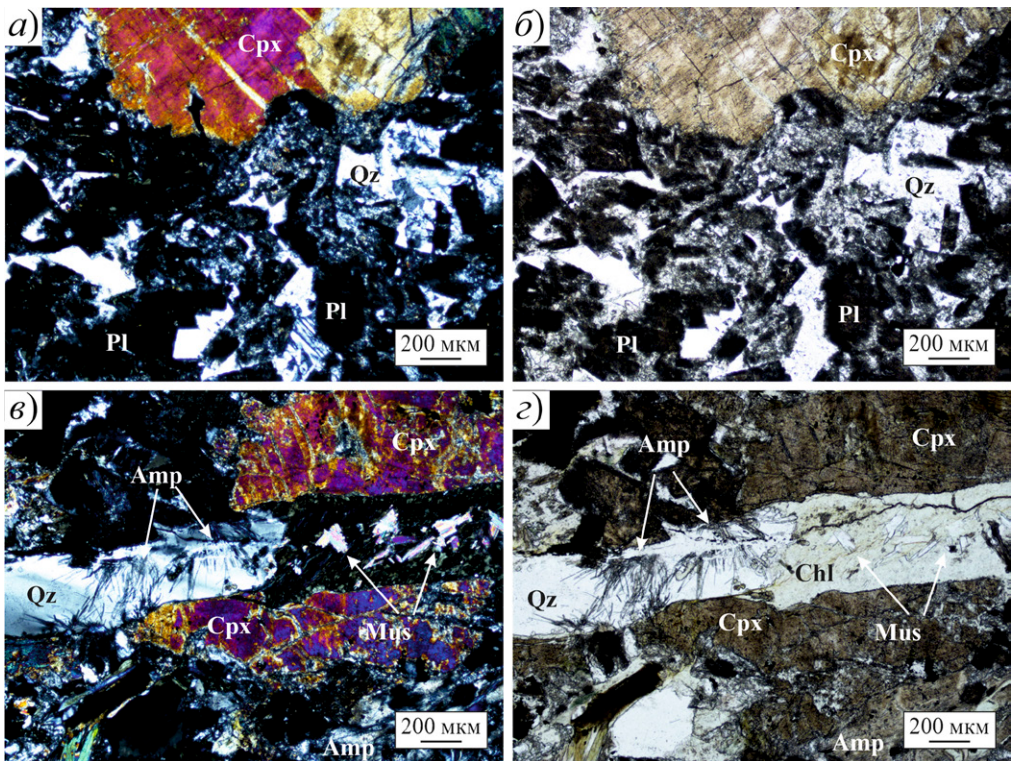


Рис. 3. Мелкокристаллический метагаббро-долерит участка Маленький: *а* и *б* – лейсты плагиоклаза и зерна пироксена; *в* и *г* – прожилок, выполненный кварцем, хлоритом и мусковитом (*а* и *в* – фото с анализатором, *б* и *г* – фото без анализатора). Pl – плагиоклаз, Cpx – клинопироксен, Chl – хлорит, Amp – амфибол, Mus – мусковит, Qz – кварц

3.2. Средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагаббро-долерит составляет большую часть интрузии. Отобранные образцы различаются между собой степенью катаклазирования, а также наличием вторичных минералов.

В образце ПХ2003/1 порода обладает массивной текстурой и гипидиоморфной (с элементами офитовой) структурой. Из первичных минералов установлены плагиоклаз (~50 %), клинопироксен (~35 %) и рудные минералы (5 %). Акцессорным минералом является апатит (менее 1 %), вторичными минералами – хлорит (5 %), клиноцоизит (5 %), кварц (1 %), амфибол (менее 1 %), мусковит (единичные зерна). Порода представлена лейстами (от 0.2×1.8 до 1.4×3.2 мм, максимальный размер 1.8×5.4 мм), реже изометричными зернами плагиоклаза (от 0.8×1.2 до 1.2×2 мм) и удлинёнными зернами пироксена (от 0.6×1.8 до 1×3.4 мм, максимальный размер 1×5 мм) (рис. 4, а и б). Плагиоклаз замещен соссюритом и альбитом. Также у него отмечается регенерационная кайма. Элементы катаклазирования выражены в виде пластического излома пироксена, некоторые зерна разбиты трещинами, по которым развивается хлорит. В породе наблюдаются редкие участки, где сохранилась кварц-плагиоклазовая графическая структура. Межзерновое пространство породы заполнено чешуйчатыми агрегатами хлорита (рис. 4, в и г). Часто совместно с хлоритом формируются скопления мелких агрегатов клиноцоизита. Редко встречаются призматические кристаллы апатита (до 0.2 мм) и чешуйки мусковита (до 1.2 мм). Зерна кварца изометричной формы (до 1 мм) встречаются редко. Минерал часто перекристаллизован, также в нем развиваются тонкие игольчатые кристаллы амфибола (до 0.2 мм).

Метагаббро-долериты в образцах ПХ2004/1, ПХ2004/2, ПХ2004/3, ПХ2004-1/1 имеют массивную текстуру и гипидиоморфную (с элементами офитовой) структуру. По сравнению с породой в образце ПХ2003/1 здесь отсутствуют катакластические деформации и меньше вторичных минералов. Также отмечаются небольшие различия в соотношении минералов, их размерности и степени замещения. В образцах ПХ2004/1 и ПХ2004-1/1 к первичным минералам относятся плагиоклаз (~45 %), клинопироксен (~45 %) и рудные минералы (5 %). Порода представлена преимущественно лейстами сильно соссюритизированного плагиоклаза с размерами от 0.6×1.8 мм до 1×5.2 мм (рис. 4, д и е) и удлинёнными зернами неизмененного пироксена с размерами от 0.6×4 мм до 0.6×6 мм (рис. 4, ж). В образце ПХ2004/2 содержание пироксена ниже (~30 %) и преобладает плагиоклаз (~50 %). Содержание рудного минерала составляет 5 %. Плагиоклаз представлен широкими лейстами (от 0.8×1.4 до 2.4×3.6 мм) и подвержен незначительным процессам замещения. Пироксен кристаллизуется в виде удлинённых зерен с размерами от 0.8×3 до 1.6×4.8 мм.

В образце ПХ2004/3 содержание плагиоклаза и пироксена практически одинаковое и составляет ~45 %, содержание рудного минерала – 5 %. Плагиоклаз представлен удлинёнными сильно соссюритизированными зернами с размерами от 0.4×2 до 0.8×3.6 мм. Пироксен также отмечается в виде удлинённых зерен с размерами от 0.8×2.4 до 0.8×3.6 мм. Вторичными минералами являются кварц (1–3 %), хлорит (1–3 %), амфибол (менее 1 %). Хлорит кристаллизуется в виде чешуйчатых агрегатов. Кварц в породе представлен двумя генерациями: первая – зерна неправильной изометричной формы с размером до 2 мм, которые так же, как и в мелкокристаллической разновидности, образуют совместно с плагиоклазом графические структуры (рис. 4, з). Вторая генерация представлена изометричными зернами кварца без следов замещения, иногда с включениями тонких игольчатых кристаллов амфибола.

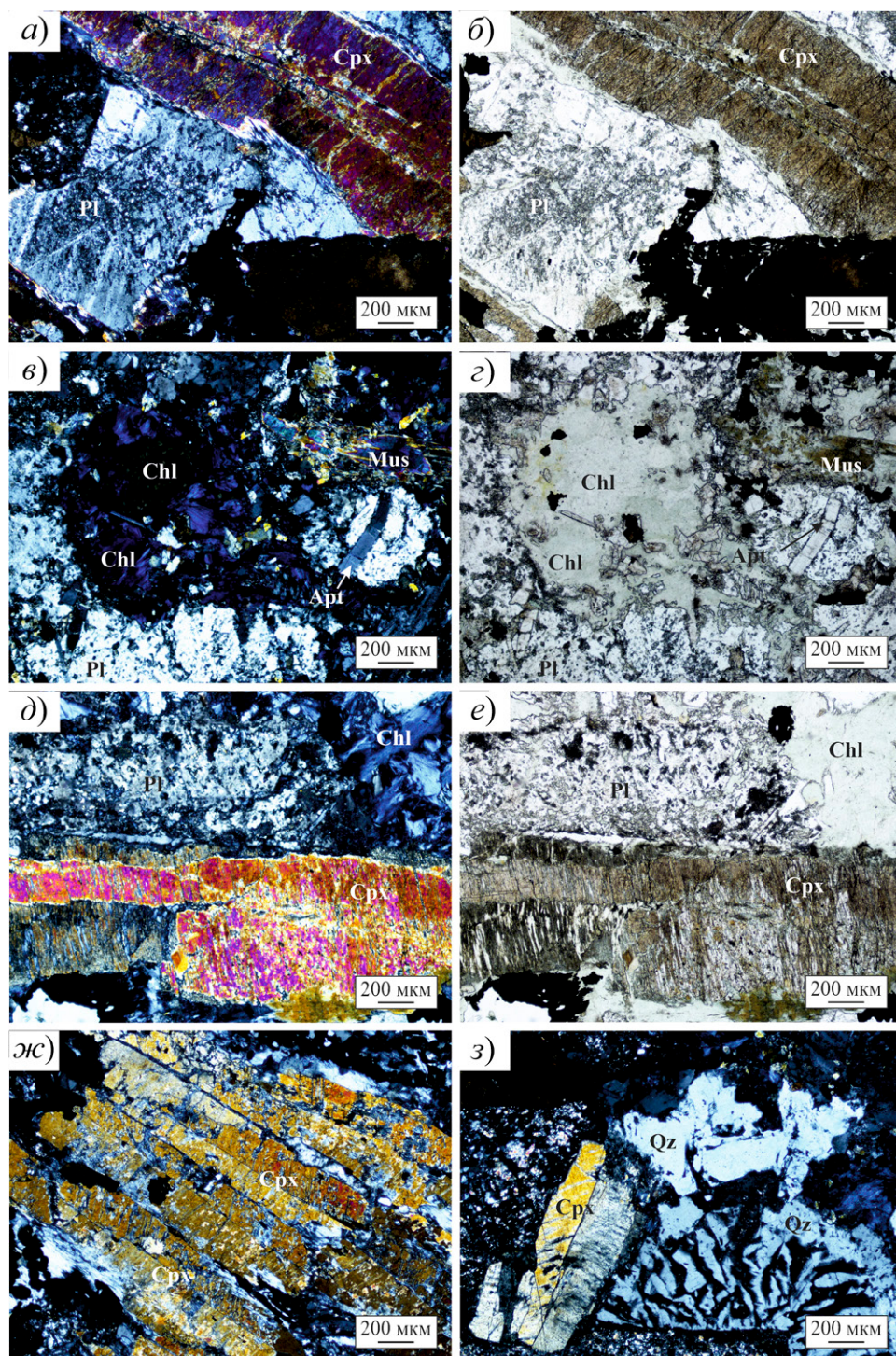


Рис. 4. Средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагаббро-долерит участка Маленький: *a* и *б* – лейсты плагиоклаза и зерна пироксена в образце ПХ2003/1; *в* и *г* – два типа агрегатов хлорита в образце ПХ2003/1; *д* и *е* – лейсты плагиоклаза и зерна пироксена в образце ПХ2004/1; *жс* – скопления пироксенов в образце ПХ2004/1; *з* – кварц, замещенный плагиоклазом в образце ПХ2004/3 (*a*, *в*, *д*–*з* – фото с анализатором, *б* и *г* – фото без анализатора)

Габбро-долериты участка Маленький по содержанию главных породообразующих элементов соответствуют высокожелезистым толеитам. Содержание SiO_2 варьирует от 43.79 до 49.1 масс. % (табл. 1, рис. 5). По типу щелочности породы относятся преимущественно к натриевому типу, за исключением образца ПХ2004/3, который согласно [12] соответствует калиево-натриевому типу (табл. 1).

Табл. 1

Химический состав пород

Компонент	Содержание компонентов, масс. %					
	ПХ2002/1	ПХ2003/1	ПХ2004/1	ПХ2004/2	ПХ2004/3	ПХ2004-1/1
	Мелкокристаллический кварцевый метагаббро-долерит	Средне- и крупнокристаллические кварцсодержащие метагаббро-долериты				
SiO_2	49.10	43.79	44.12	44.32	44.24	46.09
TiO_2	1.04	2.66	2.92	3.03	2.53	2.57
Al_2O_3	15.25	15.85	14.92	15.12	15.56	14.16
Fe_2O_3	4.01	2.47	2.48	4.36	3.93	3.91
FeO	6.49	14.69	14.55	11.30	9.78	14.52
MnO	0.17	0.18	0.20	0.20	0.17	0.24
MgO	6.32	3.59	3.34	4.28	4.33	3.77
CaO	12.16	7.58	8.41	8.38	11.71	7.14
Na_2O	1.94	3.29	3.43	3.53	2.26	2.66
K_2O	0.12	0.38	0.29	0.07	0.76	0.34
P_2O_5	0.08	0.21	0.24	0.22	0.18	0.15
п.п.п.	3.31	5.30	5.10	5.18	4.56	4.46
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
$\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$	11.15	18.63	18.49	16.79	14.69	19.88
H_2O	0.22	0.14	0.18	0.32	0.24	0.18
CO_2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.14	<0.1
FeO*	10.10	16.91	16.78	15.22	13.32	18.04
FeO*/MgO	1.60	4.71	5.02	3.56	3.08	4.78
al'	0.91	0.76	0.73	0.76	0.86	0.64

Примечание: $\text{FeO}^* = \text{FeO} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} = 1.1 \times \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$,
 $\text{al}' = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$.

В целом долериты являются породами нормальной щелочности. За счет повышенного содержания натрия, обусловленного большим количеством альбита в породе, некоторые габбро-долериты соответствуют субщелочным разновидностям. По соотношениям содержаний K_2O и SiO_2 магматиты относятся к низко- и умеренно-калиевым породам. Метагаббро-долериты в большинстве своем умеренно-глиноземистые ($\text{al}' = 0.76\text{--}0.91$), за исключением образцов ПХ2004/1 и ПХ2004-1/1, для которых это значение ниже (0.73 и 0.64 соответственно). Почти все породы являются высокотитанистыми, кроме образца ПХ2002/1, который относится к умеренно-низкотитанистому типу [13]. В целом по содержанию основных породообразующих элементов больше всего выделяется мелкокристаллическая разновидность (образец ПХ2002/1). В данной пробе выше содержание

SiO_2 , MgO , CaO и меньше TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$, Na_2O , K_2O , P_2O_5 . Средне- и крупнокристаллические разновидности выделяются повышенными концентрациями $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}}$. На диаграмме AFM (рис. 5, б) породы участка Маленький соответствуют толеитовому тренду.

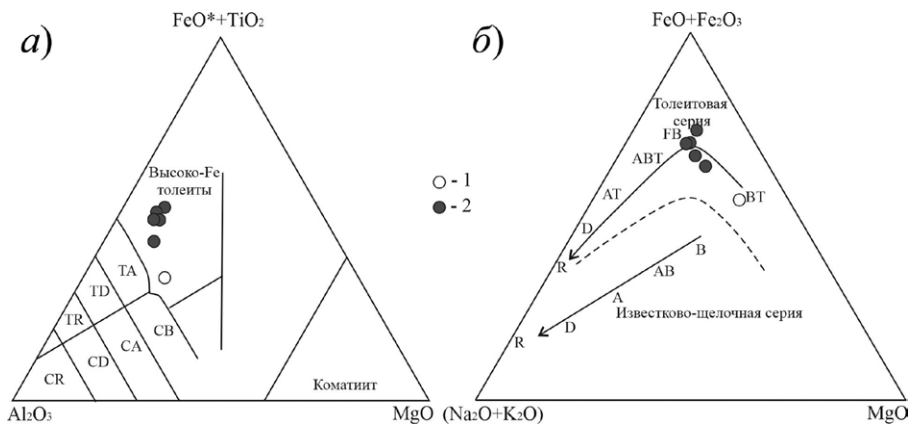


Рис. 5. Классификационные диаграммы для метагаббро-долеритов уч. Маленький: а – диаграмма $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{FeO}^* + \text{TiO}_2 - \text{MgO}$ [14] (толеитовая серия: ТА – андезит, TD – дацит, TR – риолит, известково-щелочная серия: CB – базальт, CA – андезит, CD – дацит, CR – риолит); б – тройная дискриминационная диаграмма AFM [15]. Условные обозначения: 1 – мелкокристаллический кварцевый метагаббро-долерит, 2 – средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагаббро-долерит

Содержание редкоземельных элементов в породах варьирует от 39.5 до 98.5 г/т (табл. 2).

Табл. 2

Содержание редких, рассеянных и редкоземельных элементов в метагаббро-долеритах участка Маленький

Элемент	Содержание элементов, г/т					
	ПХ2002/1	ПХ2003/1	ПХ2004/1	ПХ2004/2	ПХ2004/3	ПХ2004-1/1
	Мелкокристаллический кварцевый метагаббро-долерит	Средне- и крупнокристаллические кварцсодержащие метагаббро-долериты				
1	2	3	4	5	6	7
Li	24	25	24	32	25	25
Be	0.48	0.63	0.81	0.68	0.48	0.68
Sc	37	46	47	49	50	51
V	283	483	668	555	653	747
Cr	58	8.9	5.5	9.2	12	15
Mn	1192	1604	1608	1523	1414	2104
Co	46	73	83	97	75	69
Ni	86	8.9	12	16	46	26
Cu	167	455	341	462	198	117
Zn	70	113	99	112	96	138
Ga	17	20	16	18	20	18
Ge	4.1	8.3	8	8	6.7	8.4
Rb	6.2	14	12	5.3	29	15
Sr	246	261	181	249	304	243

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Zr	45	107	119	126	94	108
Nb	3.3	14	13	13	11	7.6
Mo	2.7	1.5	1.1	1.4	1.5	1.5
Ag	0.27	0.55	0.57	0.72	0.49	0.52
Cd	1.3	4	4.3	4	3.1	2.9
Cs	0.58	0.69	0.47	0.29	0.76	1.1
Ba	43	79	54	35	96	76
Hf	1.1	1.8	2	1.8	1.6	1.6
Ta	0.19	0.47	0.46	0.37	0.34	0.25
W	0.64	1.1	1.3	1.2	1.4	0.19
Pb	0.44	< ПрО	< ПрО	< ПрО	< ПрО	< ПрО
Th	< ПрО	0.36	0.91	< ПрО	0.02	< ПрО
U	0.18	0.23	0.29	0.22	0.2	0.16
La	4.9	11	14	13	12	9.1
Ce	12	27	33	31	28	22
Pr	1.7	3.9	4.6	4.3	4	3.1
Nd	8	17	21	19	17	14
Sm	2.2	4.8	5.5	5.1	4.7	3.9
Eu	0.9	1.7	1.6	1.3	1.4	1.1
Gd	3.1	5.2	6	5.4	5	4.1
Tb	0.47	0.87	1	0.89	0.81	0.68
Dy	2.6	4.6	5.3	4.4	4.2	3.6
Ho	0.53	0.88	0.99	0.84	0.8	0.67
Er	1.5	2.6	2.8	2.4	2.3	2
Tm	0.2	0.33	0.34	0.3	0.3	0.27
Yb	1.2	2.5	2.1	1.8	1.7	1.5
Lu	0.19	0.26	0.28	0.22	0.23	0.22
Y	14	37	40	40	35	30
Σ REE	39.49	82.64	98.51	89.95	82.44	66.24
Σ LREE	29.7	65.4	79.7	73.7	67.1	53.2
Σ HREE	9.79	17.24	18.81	16.25	15.34	13.04
Eu/Eu*	1.05	1.04	0.85	0.76	0.88	0.84
Ce/Ce*	1.01	1	0.99	1	0.98	1
Lu_N/La_N	0.37	0.23	0.19	0.16	0.18	0.23
Nd_N/La_N	0.85	0.8	0.78	0.76	0.73	0.8
Lu_N/Gd_N	0.5	0.4	0.38	0.33	0.37	0.43
Ce/Yb	10	10.8	15.71	17.22	16.47	14.67
Gd/Yb	2.58	2.08	2.86	3	2.94	2.73
La/Lu	25.79	42.31	50	59.09	52.17	41.36
Sm/Nd	0.28	0.28	0.26	0.27	0.28	0.28
La_N/Yb_N	2.75	2.97	4.49	4.87	4.76	4.09
Nb/Y	0.24	0.38	0.32	0.32	0.31	0.25
La_N/Sm_N	1.4	1.44	1.6	1.6	1.6	1.46
Nb/La	0.67	1.27	0.93	1	0.92	0.83

Примечание: < ПрО – ниже предела обнаружения ($ПрО_{Th}=0.00006$ г/т, $ПрО_{Pb}=0.000057$ г/т); Σ REE – общее содержание редкоземельных элементов; Σ LREE – общее содержание легких редкоземельных элементов; Σ HREE – общее содержание тяжелых редкоземельных элементов.

Самое низкое содержание установлено для мелкокристаллической разновидности породы. На диаграмме распределения редкоземельных элементов пород участка Маленький отмечается сильно фракционированный спектр их распределения с преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми (рис. 6). Величина соотношения La_N/Yb_N , которая является показателем этого обогащения, варьирует от 2.75 до 4.87. По сравнению с базальтами СОХ нормального типа, на спайдер-диаграмме в габбро-долеритах наблюдаются относительно высокие содержания крупноионных элементов (Cs, Ba, Rb) и низкие концентрации высокозарядных элементов (Zr, Y, Nb, U).

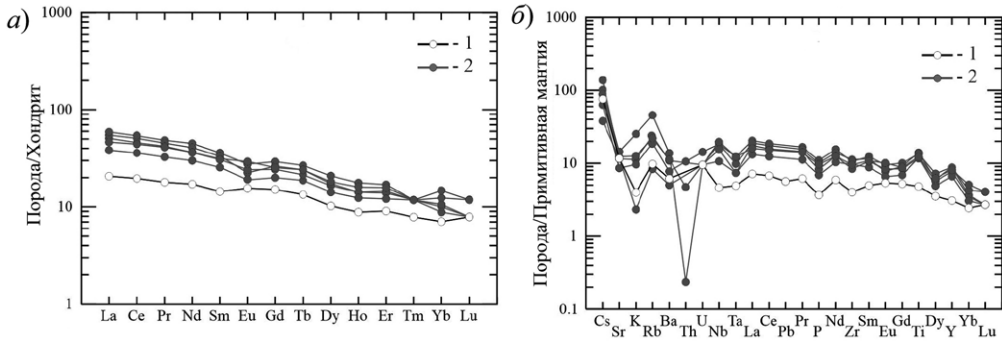


Рис. 6. Графики распределения редкоземельных элементов, нормированных на хондрит CI [16] (а), и элементов-примесей, нормированных на состав примитивной мантии [16] (б), для метагаббро-долеритов участка Маленький. Условные обозначения: 1 – мелкокристаллический кварцевый метагаббро-долерит, 2 – средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагаббро-долерит

Торий является наименее подвижным элементом при наложенных геологических процессах и часто применяется для характеристики пород. Однако из-за его низких концентраций для установления состава магматических источников авторы используют диаграммы, основанные на содержании малоподвижных высокозарядных элементов Y, Zr, Nb.

На диаграмме $La/10-Y/15-Nb/8$ точки составов метагаббро-долеритов располагаются в поле континентальных базальтов (рис. 7, а). На дискриминационной диаграмме $Zr-Ti/100-Y*3$ точки составов соответствуют границе полей внутриплитных базальтов и толеитов островных дуг (рис. 7, б). Согласно графику $Nb/Y-Zr/Y$ источник пород участка Маленький имеет мантийно-плюмовую природу (рис. 7, в).

По данным диаграммы вариаций $Nb-Nb/Yb$, используемых для определения условий выплавления магмы, наблюдается тяготение точек составов метагаббро-долеритов к тренду плавления гранатового перидотита (рис. 7, г). Это подтверждается высокими отношениями $(Gd/Yb)_n$ у большинства образцов участка Маленький (2.08–2.42), кроме образца ПХ2003/1, для которого это отношение равно 1.68, что соответствует шпинелевой фации [22].

Величина отношения La_N/Yb_N , равная 2.75–4.87, является показателем обогащения пород редкоземельными элементами. Полученное значение соотношения довольно высокое и характерно для базальтов, формирующихся из неистощенных или обогащенных источников. Этот вывод подтверждается соотношением $Nb/Y = 0.24-0.38$, которое превышает значение для примитивной

мантии 0.16 [23]. Высокие содержания Fe_2O_3^* и TiO_2 (табл. 1), отсутствие отрицательной аномалии по ниобию, а также низкие концентрации тория могут быть свидетельством отсутствия влияния коровой составляющей на мантийный расплав [24, 25]. Однако низкое значение отношения Nb/La, равное 0.67–1, в метагббро-долеритах, за исключением образца ПХ2003/1 ($\text{Nb/La} = 1.27$), может указывать на небольшое влияние древней континентальной коры на источник расплава [26].

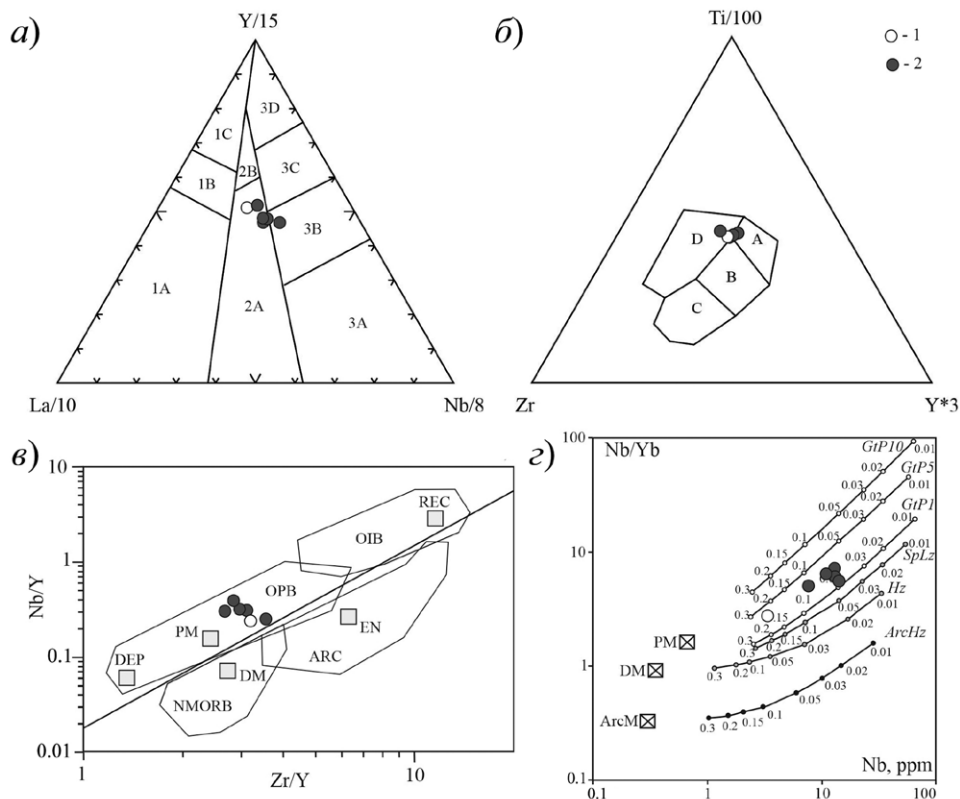


Рис. 7. Классификационные диаграммы для метагббро-долеритов уч. Маленький: а – диаграмма La10–Y15–Nb/8 [17] (1А – известково-щелочные базальты, 1В – промежуточная зона, 1С – толеиты вулканических дуг, 2А – континентальные базальты, 2В – базальты задуговых бассейнов, 3А – щелочные базальты, 3В,С – E-MORB, 3D – N-MORB); б – тройная дискриминационная диаграмма Zr–Ti/100–Y*3 [18] (А – IAT (толеиты островных дуг), В – MORB (базальты COX), IAT и CAB (известково-щелочные базальты), С – CAB, D – WPB (внутриплитные базальты)); в – диаграмма Nb/Y–Zr/Y [19, 20] (PM – примитивная мантия, DM – верхняя деплетированная мантия, DEP – деплетированная глубинная мантия, EN – обогащенный источник, REC – рециклированный компонент); д – составы метагббро-долеритов в сопоставлении с результатами численного моделирования частичного плавления разных мантийных источников в системе Nb–Nb/Yb [21]. Кривые показывают вычисленные соотношения при плавлении пород гранатового перидотита с содержанием граната 1, 5, 10 % (*GtP1*, *GtP5*, *GtP10*), шпинелевого лерцолита (*SpLz*) примитивной мантии (PM), умеренно деплетированного гарцбургита (*Hz*) деплетированной мантии (DM) и островодужного гарцбургита (*ArcHz*) поддуговой сильно деплетированной мантии (ArcM). Условные обозначения: 1 – мелкокристаллический кварцевый метагббро-долерит, 2 – средне- и крупнокристаллический кварцсодержащий метагббро-долерит

3.2. Оруденение. В результате последовательного изучения аншлифов, отобранных из 4 канав, вскрывших коренные породы, и локализованных в мелко-, средне- и крупнозернистых долеритах, выделены два типа рудной минерализации – сфалерит-халькопирит-пирротиновый гнездово- и прожилково-вкрапленный и кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротиновый прожилково-вкрапленный (рис. 8).

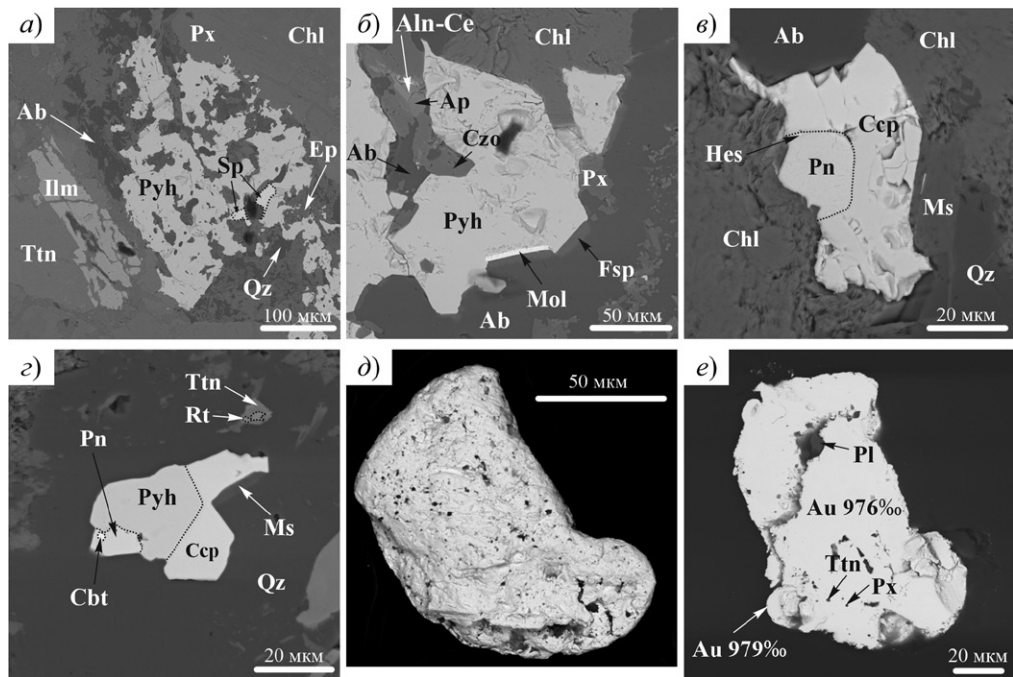


Рис. 8. Типы рудной минерализации: *а* и *б* – сфалерит-халькопирит-пирротиновый (I тип) (*а* – сросток пирротина (табл. 3, изм. 5) и сфалерита (табл. 3, изм. 9), *б* – сросток пирротина (табл. 3, изм. 4) и молибденита (табл. 3, изм. 11)); *в* и *г* – кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротиновый (II тип) (*в* – сросток кобальтсодержащего пентландита (табл. 4, изм. 13) и халькопирита (табл. 4, изм. 8); *г* – сросток пирротина (табл. 4, изм. 4), халькопирита (табл. 4, изм. 9) и кобальтсодержащего пентландита (табл. 4, изм. 14) с включением кобальтина (табл. 4, изм. 17)); *д* и *ж* – самородное золото (*д* – поверхность; *ж* – срез). Pyh – пирротин, Ccp – халькопирит, Pn – пентландит, Cbt – кобальтин, Sf – сфалерит, Ilm – ильменит, Ttn – титанит, Rt – рутил, Mol – молибденит, Px – пироксен, Ab – альбит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Ms – мусковит, Fsp – калиевый полевой шпат, Czo – клиноцоизит, Ep – эпидот, Aln-Ce – алланит-(Ce), Hes – гессит, Au – золото, Pl – плагиоклаз

I тип – сфалерит-халькопирит-пирротиновый гнездово- и прожилково-вкрапленный (рис. 8, *а* и *б*) – наиболее распространенный тип, который преимущественно приурочен к границе средне- и крупнозернистых долеритов. В геологическом плане наибольшая концентрация рудной минерализации тяготеет к ядрам малоамплитудных складок и достигает 25–30 % в канаве К-19, постепенно уменьшаясь к крыльям в канаве К-20 до 15–20 % и в канаве К-21 до 10 %. При этом в ядре складки минерализация отличается значительным увеличением халькопиритовой (1/2 всего объема) составляющей, тогда как в крыльях в основном присутствует пирротин (более 90 %). Сульфидные гнезда в породах,

достигающие в размерах 0.6 мм (редко до 1 см), часто находятся в сростании с кварц-полевошпатовыми, кварц-плагиоклазовыми агрегатами и вместе с ними заполняют интерстиции между породообразующими минералами. Гнезда и прожилки в большинстве случаев состоят из пирротина, находящегося в сростках с халькопиритом и сфалеритом, причем последний локализуется лишь в пирротине, не образуя отдельных зерен. Состав сульфидных минералов близок к стехиометричному. Лишь в одном зерне пирротина установлена примесь кобальта 0.37 масс. % (табл. 3). Помимо сульфидов, но всегда в ассоциации с ними, присутствуют множественные включения ильменита (нередко распадающегося на титанит и рутил), бадделеита и циркона, молибденита в сростках с пирротином, пирита, галенита, монацита, алланита, апатита, торита, барита, редкие включения алтаита (Pb – 62.01 масс. %, Te – 37.40 масс. %).

Табл. 3

Химический состав рудных минералов I типа (сфалерит-халькопирит-пирротинный)

№ изме- рения	Содержание элемента, масс. %						
	S	Fe	Co	Cu	Zn	Mo	Сумма
Пирротин							
1	39.64	59.69	—	—	—	—	99.33
2	40.05	59.75	—	—	—	—	99.8
3	39.84	59.68	—	—	—	—	99.52
4	40.27	60.13	—	—	—	—	100.4
5	39.63	59.98	0.37	—	—	—	99.99
Халькопирит							
6	35.24	30.64	—	33.52	—	—	99.4
7	35.51	30.99	—	33.44	—	—	99.94
Сфалерит							
8	33.87	8.65	—	—	57.33	—	99.85
9	33.55	7.73	—	—	58.56	—	99.84
Пирит							
10	52.37	47.44	—	—	—	—	99.81
Молибденит							
11	40.50	1.54	—	—	—	57.91	99.95

Примечание: — не обнаружено.

II тип рудной минерализации (ранее не выделявшийся) – кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротинный прожилково-вкрапленный (рис. 8, в и г), локализующийся в мелкозернистых кварцсодержащих габбро-долеритах. Данный тип минерализации фиксируется в канаве К-24 в виде мелких прожилков и вкрапленников в пределах 2–3 об. % и не дает возможности оценить его площадное распространение. Как и в I типе, основным минералом здесь является пирротин, в меньшей степени халькопирит. Изучение рудных минералов показало довольно разнообразный их состав (табл. 4).

Табл. 4

Химический состав рудных минералов II типа (кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротиновый)

№ изме- рения	Содержание элемента, масс. %							
	S	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Сумма
Пирротин								
1	39.82	58.46	—	0.94	—	—	—	99.22
2	40.61	58.67	—	0.98	—	—	—	100.27
3	40.1	59.00	—	0.98	—	—	—	100.08
4	40.19	59.05	—	0.66	—	—	—	99.91
5	40.28	59.48	—	—	—	—	—	99.76
6	39.99	59.05	—	0.58	—	—	—	99.62
7	39.85	59.93	—	0.28	—	—	—	100.06
Халькопирит								
8	35.26	30.87	—	—	33.11	—	—	99.24
9	35.49	30.54	—	—	33.4	—	—	99.42
10	35.51	30.98	—	—	33.31	—	—	99.8
11	35.37	30.75	—	—	33.78	—	—	99.9
12	35.35	31.72	—	—	32.8	—	—	99.87
Пентландит								
13	44.26	20.79	7.12	27.72	—	—	—	99.89
14	33.33	24.89	10.40	31.33	—	—	—	99.92
15	43.32	19.30	7.11	30.19	—	—	—	99.93
16	53.41	45.67	0.38	0.83	—	—	—	100.3
Кобальтин								
17	22.41	4.73	29.5	3	—	—	41.63	101.23
Сфалерит								
18	34.31	6.55	—	—	—	58.62	—	99.49

Примечание: — не обнаружено.

Пирротин является наиболее распространенным минералом II типа и характеризуется стабильной примесью никеля на уровне 0.28–0.98 масс. %. В сростках с ним встречаются халькопирит, отличающийся устойчивым химическим составом, и пентландит, содержащий постоянную примесь кобальта (0.38–10.4 масс. %). Кроме того, в сростках с пирротинном, халькопиритом и пентландитом отмечены пирит с примесями кобальта (0.38 масс. %) и никеля (0.83 масс. %) и кобальтин с примесями никеля (3.00 масс. %) и железа (4.73 масс. %). Среди других минералов, ассоциирующих с сульфидами, встречены ильменит, сфалерит, титанит, бадделит, гессит, монацит, циркон, апатит, отмечены редкие включения котульскита (по результатам двух измерений среднее содержание Pd, Te и Bi составило 28.05, 51.55 и 19.65 масс. % соответственно).

В одной протолочной пробе средне- и крупнозернистых габбро-долеритов выявлено зерно самородного золота (рис. 8, *д* и *е*). Оно представлено относительно крупным зерном (около 0.1 мм) рудного облика с соотношением сторон, близким к 2 : 1, и характеризуется довольно постоянным химическим составом с незначительной примесью серебра, что позволяет считать его высокопробным. Морфология, химический состав, а также минералы-включения (плагиоклаз, титанит, пироксен (рис. 8, *е*)) в зерне золота позволяют считать его коренным и связанным с габбро-долеритами.

Содержание цветных металлов в пробах пород по данным атомно-абсорбционной спектроскопии согласуется с опубликованным ранее в работе [2]. Новые данные получены для канавы К-24 (табл. 5). Результаты химического анализа проб из канав К-19, К-20, К-21 показывают неравномерность распределения кобальта в породах. Кроме того, в канаве К-24 содержание никеля значительно выше, что связано с присутствием пентландита. По оригинальным данным атомно-абсорбционной спектроскопии на участке Маленький фиксируется кобальтовая специфика рудной минерализации (содержания Со преобладают над содержаниями Ni), что подтверждается минералогическими данными.

Заключение

Детальные петрографические, геохимические и минералогические исследования пород и руд показали, что для участка Маленький характерен полный набор дифференциатов, включающий мелко-, средне-, крупнозернистые габбро-долериты и долерит-пегматиты. Отмечено, что на породы наложены вторичные изменения, выражающиеся в сосюритизации, амфиболизации, хлоритизации и окварцевании. Обе разновидности пород отличаются по содержанию как основных петрогенных компонентов, так и редких земель. Если в первом случае в мелкозернистых разностях концентрации порообразующих элементов заметно выше, то содержание редкоземельных элементов характеризуется более низкими значениями. Установлено, что метагаббро-долериты являются производными толеитовой магмы и формировались во внутримпактной обстановке из обогащенных мантийных источников при плавлении гранатового перидотита с небольшим вкладом в источник расплава древней континентальной коры.

Выделенные в пределах участка Маленький два типа рудной минерализации (сфалерит-халькопирит-пирротиновый (I тип) и кобальтин-пентландит-халькопирит-пирротиновый (II тип)) характеризуются общим, преимущественно прожилково-вкрапленным характером распространения. Их минеральный состав довольно выдержанный и в основном представлен пирротином, в меньшей мере халькопиритом. I тип минерализации тяготеет к границе средне- и крупнозернистых разностей с максимальными концентрациями в ядрах малоамплитутных складок и переменным соотношением основных рудных минералов пирротина и халькопирита. II тип имеет более равномерное распределение, но характеризуется присутствием как высокотемпературных кобальт- и никельсодержащих сульфидов, так и низкотемпературных палладистых (котульскит) и серебристых (гессит) теллуридов. В целом для участка Маленький отмечается кобальтовая специфика оруденения, что полностью согласуется с минеральным составом руд данного участка.

Полученные данные позволяют предполагать возможность обнаружения на участке Маленький более значимых рудных горизонтов, связанных с мелкозернистыми габбро-долеритами, которые согласно [2] контактируют с оливинсодержащими габбро в южной части этого участка.

Табл. 5

Содержание цветных металлов в породах участка Маленький

№ канавы	Содержание цветных металлов в породах, масс. %					
	Данные из [2]			Авторские данные		
	Ni	Co	Cu	Ni	Co	Cu
K-19	$\frac{0.0008-0.0039}{0.0019}$ (6)	$\frac{0.0008-0.0027}{0.0017}$ (6)	$\frac{0.012-0.4}{0.026}$ (6)	$\frac{0.0007-0.0039}{0.0019}$ (3)	$\frac{0.0061-0.0079}{0.0072}$ (3)	$\frac{0.017-0.039}{0.029}$ (3)
K-20	$\frac{0.002-0.0027}{0.0024}$ (2)	$\frac{0.002-0.0027}{0.0024}$ (2)	$\frac{0.012-0.06}{0.036}$ (2)	0.0007	0.0065	0.042
K-21	0.002	0.001	0.02	0.0027	0.0059	0.0099
K-24	—	—	—	0.0061	0.0041	0.016

Примечание: в числителе – минимальное и максимальное содержание, в знаменателе – среднее содержание, в скобках – число проб, — нет данных.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории химии минерального сырья Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Т.В. Осиновой, Т.А. Прудовой, С.Т. Неверову за помощь в аналитических исследованиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Заборин О.В. Диабазовая формация Пай-Хоя // Магматизм, метаморфизм и металлогения севера Урала и Пай-Хоя / под ред. М.В. Фишмана. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1972. С. 41–42.
2. Заборин О.В., Золотарева Н.И., Короткова Г.А. Производство групповых поисково-съёмочных работ масштаба 1:50000 на листах R-41-88-A (в, г), Б (в, г) В, Г; R-41-89-B (в, г); R-41-99-A (а, б), Б; R-41-100-A, Б, Г (а, б); R-41-101-A, Б, В (а, б), Г; R-41-102-A (в, г), В, Г; R-41-103-B (а, б); R-41-114-B (а, б) Отчет Пайхойской ГСП о работе за 1971-1976 гг. Воркута: ГГП «Полярноуралгеология», 1977. Т. 1, 2, 3, 4.
3. Юшкин Н.П., Давыдов В.П., Остащенко Б.А. Магматические образования Центрального Пай-Хоя и их металлогенические особенности // Вопросы петрографии Северного Урала и Тимана. (Труды Института геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 17). Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1972. С. 3–34.
4. Остащенко Б.А. Петрология и оруденение центральнопайхойского базальтоидного комплекса. Л.: Наука, 1979. 113 с.
5. Шишкин М.А., Шкарубо С.И., Маркина Н.М., Молчанова Е.В., Калаус С.В. Основные итоги создания комплексной Государственной геологической карты масштаба 1:1000000 (3-е поколение) листа R-41 (Амдерма) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XV Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2009. Т. II. С. 183–185.
6. Шайбеков Р.И. Новые данные о возрасте пород габбро-долеритового комплекса Пайхойского антиклинория (Россия, Ненецкий автономный округ) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 4. С. 67–73.
7. Шайбеков Р.И., Уляшева Н.С., Хубанов В.Б., Исаенко С.И., Тропников Е.М., Игнатьев Г.В. Метагаббро-долериты центральной части Карской депрессии (Ненецкий автономный округ, Россия): влияние импактного события и U-Pb (LA-ICP-MS) возраст // Геохимия. 2023. Т. 68, № 4. С. 379–394. <https://doi.org/10.31857/S0016752523040118>.
8. Жегунов П.С., Старикова Е.В., Петров Д.А., Львов П.А. Новые данные о составе и возрасте долеритов оюского комплекса хр. Ямб-Пэ, Северо-Западный Пай-Хой // Литосфера. 2019. Т. 19, № 3. С. 436–450. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-3-436-450>.
9. Давыдов К.В., Микляев А.С., Давыдова Э.И. Субвулканические тела плагиоклазовых порфириров возвышенности Ямб-Пэ (Пай-Хой) // Магматизм, метаморфизм и металлогения севера Урала и Пай-Хоя / под ред. М.В. Фишмана. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1972. С. 42–44.
10. Шайбеков Р.И. Минералогия платинометалльного оруденения в базальтоидах Пайхойского антиклинория: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 2011. 19 с.
11. Warr L. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineral. Mag. 2021. V. 85, No 3. P. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.
12. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / гл. ред.: О.А. Богатилов, О.В. Петров, А.Ф. Морозов. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 160 с.

13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. Геохимия титана. Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, 2018. 432 с.
14. Jensen L.S. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks. Ontario Division of Mines. Miscellaneous Paper 66. Toronto: Minist. Nat. Resour., 1976. 22 p.
15. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Can. J. Earth Sci. 1971. V. 8, No 5. P. 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
16. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process // Saunders A.D., Norrey M.J. (Eds.) Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1989. No. 42. P. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
17. Cabanis B., Lecomte M. Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8: Un outil pour la discrimination des series volcaniques et en evidence des melange et/ot de contamination crustale // C. R. Acad. Sci., Ser. 2: Mec., Phys., Chim., Sci. Terre Univers. 1989. T. 309, No 20. P. 2023–2029.
18. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // Earth Planet. Sci. Lett. 1973. V. 19, No 2. P. 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5).
19. Fitton J.G., Saunders A.D., Norry M.J., Hardarson B.S., Taylor R.N. Thermal and chemical structure of the Iceland plume // Earth Planet. Sci. Lett. 1997. V. 153, No 3–4. P. 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2).
20. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79, No 3–4. P. 491–504. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.014>.
21. Yang G., Li Y., Safonova I., Yi S., Tong L., Seltnann R. Early Carboniferous volcanic rocks of West Junggar in the western Central Asian Orogenic Belt: Implications for a supra-subduction system // Int. Geol. Rev. 2014. V. 56, No 7. P. 823–844. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.902757>.
22. Hirschmann M.M., Stolper E.M. A possible role for garnet pyroxenite in the origin of the “garnet signature” in MORB // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 124, No 2. P. 185–208. <https://doi.org/10.1007/S004100050184>.
23. Туркина О.М., Изох А.Э. Палеопротерозойские дайки юга Сибирского кратона как индикаторы обогащенной субконтинентальной литосферы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы совещания. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. Вып. 19. С. 236–238.
24. Сафонова И.Ю., Симонов В.А., Буслов М.М., Ота Ц., Маруяма Ш. Неопротерозойские базальты Палеоазиатского океана из Курайского аккреционного клина (Горный Алтай): геохимия, петрогенезис, геодинамические обстановки формирования // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 4. С. 335–356.
25. Шоханова М.Н., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Падерин И.П. Палеопротерозойские базальтоиды Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса Сибирского Кратона: возраст и петрогенезис // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 8. С. 1049–1072.
26. Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: Major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 114, No 2. P. 171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>.

Поступила в редакцию 15.03.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Шайбеков Ренат Ирекович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералогии

Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Республика Коми, Россия

E-mail: shaybekov@geo.komisc.ru

Шмакова Александра Михайловна, младший научный сотрудник лаборатории минерально-сырьевых ресурсов

Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Республика Коми, Россия

E-mail: alex.sch92@yandex.ru

Тропников Евгений Михайлович, ведущий инженер-технолог лаборатории экспериментальной минералогии

Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Республика Коми, Россия

E-mail: tropnikov.83@mail.ru

Игнатьев Григорий Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории комплексной оценки и инжиниринга георесурсов

Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»

ул. Первомайская, д. 54, г. Сыктывкар, 167982, Республика Коми, Россия

E-mail: ignatiev.grigoriy@gmail.com

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2024, vol. 166, no. 3, pp. 525–547

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2024.3.525-547

New Insights into the Petrography and Mineralogy of the Malenkiy Site (Pay-Khoy, Nenets Autonomous District)

R.I. Shaibekov^{}, A.M. Shmakova^{**}, E.M. Tropnikov^{***}, G.V. Ignatiev^{****}*

*Institute of Geology, FRC Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Syktывkar, 167000 Russia*

E-mail: ^{}shaybekov@geo.komisc.ru, ^{**}alex.sch92@yandex.ru, ^{***}tropnikov.83@mail.ru, ^{****}ignatiev.grigoriy@gmail.com*

Received March 15, 2024; Accepted June 14, 2024

Abstract

The rock composition and ore mineralization of the Malenkiy site located within the Khengur gabbro-dolerite complex of the Pay-Khoy were examined. Petrogeochemical analysis revealed two varieties of the studied rocks: fine-crystalline quartz and medium- and coarse-crystalline quartz containing metagabbro-dolerite. The Y, Zr, and Nb contents suggest that metagabbro-dolerites formed in an intraplate setting from enriched mantle sources during the melting of garnet peridotite, with a small contribution from the melt source of ancient continental crust. Two types of ore mineralization were distinguished: nest- and veinlet-disseminated sphalerite-chalcopyrite-pyrrhotite (type I) and veinlet-disseminated cobaltite-pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite (type II). The most efficient ore mineralization was type II, which is characterized by the presence of both high-temperature cobalt-

and nickel-bearing sulfide minerals, as well as low-temperature tellurides of palladium (kotulskite) and silver (hessite).

Keywords: petrography, petrochemistry, mineralogy, metagabbro, sulfides, copper-nickel mineralization, Malenkiy site, Pay-Khoy

Acknowledgments. We thank T.V. Osipova, T.A. Prudova, and S.T. Neverova from the Laboratory of Mineral Chemistry (Institute of Geology, FRC Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences) for their assistance in analytical research.

This study was performed as part of the state assignment to the Institute of Geology (FRC Komi Science Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences).

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

- Fig. 1. Geological map of the Malenkiy site. Compiled from stock materials [2] and own data. Legend: 1 – Quaternary dark gray loams (Q); 2–4 – Khengur gabbro-dolerite complex ($v\beta D_3h$), metagabbro-dolerites: 2 – fine-crystalline quartz, 3 – medium- and coarse-crystalline quartz-bearing, 4 – medium- and coarse-crystalline quartz-bearing with lenses and interlayers of dolerite-pegmatites; 5 – geological boundaries: a – proved, b – inferred; 6 – zones of nest-disseminated sphalerite-chalcopyrite-pyrrhotite mineralization; 7 – zones of veinlet-disseminated cobaltine-pyrite-pentlandite-pyrrhotite mineralization; 8 – area with high concentrations of sulfides (higher than 15 %); 9 – inferred discontinuity; 10 – ditches and their numbers; 11 – sampling points and intervals.
- Fig. 2. Metagabbro-dolerites in mine workings. On the left: fine-crystalline metagabbro-dolerites, ditch K–24; on the right: a zone of ore mineralization in medium- and coarse-crystalline quartz-bearing metagabbro-dolerites, ditch K–19.
- Fig. 3. Fine-crystalline metagabbro-dolerite of the Malenkiy site: *a* and *b* – plagioclase laths and pyroxene grains; *c* and *d* – veins of quartz, chlorite, and muscovite (*a* and *c* – photos with an analyzer, *b* and *d* – photos without an analyzer). Pl – plagioclase, Cpx – clinopyroxene, Chl – chlorite, Amp – amphibole, Mus – muscovite, Qz – quartz.
- Fig. 4. Medium- and coarse-crystalline quartz-bearing metagabbro-dolerites of the Malenkiy site: *a* and *b* – plagioclase laths and pyroxene grains in the sample PKh2003/1; *c* and *d* – two types of chlorite aggregates in the sample PKh2003/1; *e* and *f* – plagioclase laths and pyroxene grains in the sample PKh2004/1; *g* – pyroxene clusters in the sample PKh2004/1; *h* – quartz replaced by plagioclase in the sample PKh2004/3 (*a*, *c*, *e*–*h* – photos with an analyzer, *b* and *d* – photos without an analyzer).
- Fig. 5. Classification diagrams for metagabbro-dolerites of the Malenkiy site: *a* – Al_2O_3 – $FeO^* + TiO_2$ – MgO diagram [14] (tholeiitic series: TA – andesite, TD – dacite, TR – rhyolite; calc-alkaline series: CB – basalt, CA – andesite, CD – dacite, CR – rhyolite); *b* – AFM ternary discrimination diagram [15]. Legend: 1 – fine-crystalline quartz metagabbro-dolerite, 2 – medium- and coarse-crystalline quartz-bearing metagabbro-dolerite.
- Fig. 6. Chondrite (Cl)-normalized REE distribution graphs [16] (*a*) and primitive mantle-normalized trace element graph [16] (*b*) for metagabbro-dolerites of the Malenkiy site. Legend: 1 – fine-crystalline quartz metagabbro-dolerite, 2 – medium- and coarse-crystalline quartz-bearing metagabbro-dolerite.
- Fig. 7. Classification diagrams for metagabbro-dolerites of the Malenkiy site: *a* – $La/10-Y/15-Nb/8$ diagram [17] (1A – calc-alkaline basalts, 1B – intermediate zone, 1C – tholeiites of volcanic arcs, 2A – continental basalts, 2B – basalts of back-arc basins, 3A – alkaline basalts, 3B,C – E-MORB, 3D – N-MORB); *b* – $Zr-Ti/100-Y^*3$ ternary discrimination diagram [18] (A – IAT (island-arc tholeiites), B – MORB (MOR basalts), IAT, and CAB (calc-alkaline basalts), C – CAB, D – WPB (within-plate basalts)); *c* – $Nb/Y-Zr/Y$ diagram [19, 20] (PM – primitive mantle, DM – upper depleted mantle, DEP – depleted deep mantle, EN – enriched source, REC – recycled component); *d* – compositions of metagabbro-dolerites in comparison with the results of numerical modeling of partial melting of various mantle sources in the Nb–Nb/Yb system [21]. The curves show the calculated ratios for the melting of garnet peridotite rocks containing 1, 5, 10 % of garnet (*GtP1*, *GtP5*, *GtP10*), spinel lherzolite (*SpLz*) primitive mantle (PM), moderately depleted harzburgite (*HZ*) of depleted mantle (DM), and island-arc harzburgite (*ArcHZ*) of strongly depleted subarc mantle (ArcM). Legend: 1 – fine-crystalline quartz metagabbro-dolerite, 2 – medium- and coarse-crystalline quartz-bearing metagabbro-dolerite.

Fig. 8. Ore mineralization types: *a* and *b* – sphalerite-chalcopyrite-pyrrhotite (type I) (*a* – intergrowth of pyrrhotite (table 3, no. 5,) and sphalerite (table 3, no. 9), *b* – intergrowth of pyrrhotite (table 3, no. 4) and molybdenite (table 3, no. 11)); *c* and *d* – cobaltine-pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite (type II) (*c* – intergrowth of cobalt-bearing pentlandite (table 4, no. 13) and chalcopyrite (table 4, no. 8); *d* – intergrowth of pyrrhotite (table 4, no. 4), chalcopyrite (table 4, no. 9), and cobalt-bearing pentlandite (table 4, no. 14) with cobaltine inclusion (table 4, no. 17)); *e* and *f* – native gold (*e* – surface, *f* – section). Pyh – pyrrhotite, Ccp – chalcopyrite, Pn – pentlandite, Cbt – cobaltine, Sf – sphalerite, Ilm – ilmenite, Ttn – titanite, Rt – rutile, Mol – molybdenite, Px – pyroxene, Ab – albite, Chl – chlorite, Qz – quartz, Ms – muscovite, Fsp – potassium feldspar, Czo – clinozoisite, Ep – epidote, Aln-Ce – allanite-(Ce), Hes – hessite, Au – gold, Pl – plagioclase.

References

1. Zaborin O.V. Diabase formation of the Pay-Khoy. In: Fishman M.V. (Ed.) *Magmatizm, metamorfizm i metallogeniya severa Urala i Pai-Khoya* [Magmatism, Metamorphism, and Metallogeny of the Northern Urals and Pay-Khoy]. Syktyvkar, Komi Fil. Akad. Nauk SSSR, 1972, pp. 41–42. (In Russian)
2. Zaborin O.V., Zolotareva N.I., Korotkova G.A. Conducting group prospecting and mapping work at a scale of 1:50000 on sheets R-41-88-A (c, d), B (c, d) C, D; R-41-89-B (c, d); R-41-99-A (a, b), B; R-41-100-A, B, D (a, b); R-41-101-A, B, C (a, b), D; R-41-102-A (c, d), C, D; R-41-103-B (a, b); R-41-114-B (a, b). Report of the Pay-Khoy GSP on the work in 1971–1976. Vols. 1, 2, 3, 4. Vorkuta, GGP “Polyamouralgeologiya”, 1977. (In Russian)
3. Yushkin N.P., Davydov V.P., Ostashchenko B.A. Igneous formations of the Central Pay-Khoy and their metallogenic features. *Vopr. Petrogr. Sev. Urala Timana* (Tr. Inst. Geol. Komi Fil. Akad. Nauk SSSR, vol. 17). Syktyvkar, Komi Fil. Akad. Nauk SSSR, 1972, pp. 3–34. (In Russian)
4. Ostaschenko B.A. *Petrologiya i orudenenie tsentral'nopaikhoiskogo bazal'toidnogo kompleksa* [Petrology and Mineralization of the Central Pay-Khoy Basaltoid Complex]. Leningrad, Nauka, 1979. 113 p. (In Russian)
5. Shishkin M.A., Shkarubo S.I., Markina N.M., Molchanova E.V., Kalas S.V. The main outcomes of developing a comprehensive state geological map at scale 1:1000000 (3rd generation), sheet R-41 (Amderma). *Geologiya i mineral'nye resursy Evropeiskogo Severo-Vostoka Rossii: materialy XV Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi* [Geology and Mineral Resources of the European Northeast of Russia: Proc. XV Geol. Congr. of the Komi Republic]. Vol. II. Syktyvkar, Inst. Geol. Komi NTs Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2009, pp. 183–185. (In Russian)
6. Shaybekov R.I. New data on the age of rocks of the gabbro-dolerite complex of the Pai-Khoy anticlinorium (Russia, Nenets Autonomous Okrug). *Izv. Komi Nauchn. Tsentra Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk*, 2012, no. 4, pp. 67–73. (In Russian)
7. Shaibekov R.I., Ulyasheva N.S., Khubanov V.B., Isaenko S.I., Tropnikov E.M., Ignatiev G.V. Metagabbro-dolerites of the central part of the Kara Depression, Nenets Autonomous District, Russia: Influence of an impact event and the U–Pb (LA–ICP–MS) age. *Geochem. Int.*, 2023, vol. 61, no. 4, pp. 359–373. <https://doi.org/10.1134/S0016702923040110>.
8. Zhegunov P.S., Starikova E.V., Petrov D.A., Lvov P.A. New data on the composition and age of gabbro-dolerites of the Oyu complex of the Yamb-Pe Ridge, northwestern Pay-Khoy. *Lithosphere*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 436–450. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-3-436-450>. (In Russian)
9. Davydov K.V., Miklyaev A.S., Davydova E.I. Subvolcanic bodies of plagioclase porphyrites of the Yamb-Pe upland (Pay-Khoy) In: Fishman M.V. (Ed.) *Magmatizm, metamorfizm i metallogeniya severa Urala i Pai-Khoya* [Magmatism, Metamorphism, and Metallogeny of the Northern Urals and Pay-Khoy]. Syktyvkar, Komi Fil. Akad. Nauk SSSR, 1972, pp. 42–44. (In Russian)
10. Shaibekov R.I. Mineralogy of platinum-group element mineralization in basaltoids of the Pay-Khoy anticlinorium. *Extended Abstract of Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Syktyvkar, 2011. 19 p. (In Russian)
11. Warr L. IMA–CNMNC approved mineral symbols *Mineral. Mag.*, 2021, vol. 85, no. 3, pp. 291–320. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.43>.
12. Bogatikov O.A., Petrov O.V., Morozov A.F. (Eds.) *Petrograficheskij kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya* [Petrographic Code of Russia. Igneous, Metamorphic, Metasomatic, and Impact Formations]. St. Petersburg, Izd. VSEGEI, 2009. 160 p. (In Russian)

13. Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V. *Geohimiya titana* [Geochemistry of Titanium]. Syktyvkar, Inst. Geol. Komi NTs Ural. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2018. 432 p. (In Russian)
14. Jensen L.S. *A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks*. Ontario Division of Mines. Miscellaneous Paper 66. Toronto, Minist. Nat. Resour., 1976. 22 p.
15. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 1971, vol. 8, no. 5, pp. 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.
16. Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders A.D., Norrey M.J. (Eds.) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ. No. 42. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 1989. pp. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
17. Cabanis B., Lecolle M. Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8: Un outil pour la discrimination des series volcaniques et en evidence des melange et/ot de vontamination crustale. *C. R. Acad. Sci., Ser. 2: Mec., Phys., Chim., Sci. Terre Univers*, 1989, t. 309, no. 20, pp. 2023–2029. (In French)
18. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, vol. 19, no. 2, pp. 290–300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5).
19. Fitton J.G., Saunders A.D., Norry M.J., Hardarson B.S., Taylor R.N. Thermal and chemical structure of the Iceland plume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, vol. 153, nos. 3–4, pp. 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2).
20. Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 2005, vol. 79, nos. 3–4, pp. 491–504. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.014>.
21. Yang G., Li Y., Safonova I., Yi S., Tong L., Seltmann R. Early Carboniferous volcanic rocks of West Junggar in the western Central Asian Orogenic Belt: Implications for a supra-subduction system. *Int. Geol. Rev.*, 2014, vol. 56, no. 7, pp. 823–844. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.902757>.
22. Hirschmann M.M., Stolper E.M. A possible role for garnet pyroxenite in the origin of the “garnet signature” in MORB. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1996, vol. 124, no. 2, pp. 185–208. <https://doi.org/10.1007/S004100050184>.
23. Turkina O.M., Izokh A.E. Paleoproterozoic dikes of the southern Siberian craton as indicators of an enriched subcontinental lithosphere. *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya* [Proc. Conf.: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (From Ocean to Continent)]. Vol. 19. Irkutsk, Inst. Zemnoi Kory Sib. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2021, pp. 236–238. (In Russian)
24. Safonova I.Yu., Simonov V.A., Buslov M.M., Ota T., Maruyama Sh. Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian Ocean (Kurai accretionary zone, Gorny Altai, Russia): Geochemistry, petrogenesis, and geodynamics. *Russ. Geol. Geophys.*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 254–271. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.09.011>.
25. Shokhonova M.N., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Paderin I.P. Paleoproterozoic basaltoids of the North Baikal volcanoplutonic belt of the Siberian craton: Age and petrogenesis. *Russ. Geol. Geophys.*, 2010, vol. 51, no. 8, pp. 815–832. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.07.001>.
26. Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: Major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1993, vol. 114, no. 2, pp. 171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>.

⟨ **Для цитирования:** Шайбеков Р.И., Шмакова А.М., Тропников Е.М., Игнатьев Г.В. Новые петрографические и минералого-геохимические данные для участка Маленький (Пай-Хой, Ненецкий автономный округ) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 3. С. 525–547. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.3.525-547>. ⟩

⟨ **For citation:** Shaibekov R.I., Shmakova A.M., Tropnikov E.M., Ignatiev G.V. New insights into the petrography and mineralogy of the Malenkiy site (Pay-Khoy, Nenets Autonomous District). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 3, pp. 525–547. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.3.525-547>. (In Russian) ⟩