Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 553.24:553.41

DOI: 10.19110/geov.2021.3.2

Апогипербазитовые метасоматиты поднятия Енганепэ (Полярный Урал)

С. А. Онищенко, А. А. Соболева

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар; mine222@ya.ru, aa_soboleva@mail.ru

Гипербазиты поднятия Енганепэ преобразованы в серпентиниты, магнезит-доломит-талковые и кварц-магнезит-доломитовые метасоматиты, относящиеся к березит-лиственитовой формации. Все апогипербазитовые породы сохраняют высокие содержания хрома и никеля, присущие протолиту. Хромшпинелид магматического этапа представлен алюмохромитом, который в процессе метаморфических и метасоматических преобразований пород замещался вторичными хромшпинелидами (субферриалюмохромитом, феррихромитом) и хромсодержащим магнетитом. Основные никелевые минералы представлены миллеритом и герсдорфитом. В кварц-магнезит-доломитовых породах часть никеля заключена в Ni-Cr-хлорите.

Ключевые слова: серпентиниты, магнезит-доломит-талковые метасоматиты, кварц-магнезит-доломитовые метасоматиты, березит-лиственитовая формация.

Apoultramafic metasomatites of the Enganepe Uplift (the Polar Urals)

S. A. Onishchenko, A. A. Soboleva

Institute of Geology, FRC Komi Science Center, UB RAS, Syktyvkar
mine222@ya.ru, aa_soboleva@mail.ru

Ultramafic rocks of the Enganepe Uplift are transformed into serpentinites, magnesite-dolomite-talc and quartz-magnesite-dolomite metasomatites belonging to the beresite-listvenite formation. All apoultramafic rocks contain high chromium and nickel inherent in protolith. Chrome-spinel of the magmatic stage is represented by aluminochromite, which, in the process of metamorphic and metasomatic transformation of rocks, has been replaced by secondary chrome-spinel (subferrialluminochromite, ferrichromite) and chromium-bearing magnetite. The main nickel minerals are millerite and gersdorffite. In quartz-magnesite-dolomite rocks, nickel is partly contained in Ni-Cr-chlorite.

Keywords: serpentinites, magnesite-dolomite-talc metasomatites, quartz-magnesite-dolomite metasomatites, beresite-listvenite formation.

Введение

На западном склоне Полярного Урала, в северной части кряжа Енганепэ, на протяжении нескольких километров водораздела рек Манюкуяха и Яныскеулектальба и в среднем течении последней прослеживается полоса серпентинитового меланжа северо-северо-западного простираения шириной до 700 м, привлекающая особое внимание (рис. 1). По мнению ряда исследователей, это фрагмент древних доуральских офиолитов, обдуцированных при закрытии позднепротерозойского океанического бассейна [2—4, 6, 11, 12]. Породы несут никелевую минерализацию, не имеющую, как показали поисковые работы, практического значения. Вместе с тем на данном участке очень ярко проявлены процессы метаморфического и метасоматического преобразования гипербазитов в серпентиниты, тальк-карбонатные и кварц-карбонатные породы.

В полосе меланжа среди задернованных участков выделяются поля элювиально-делювиальных развалов серпентинитов, в которых наблюдаются немногочисленные обнажения серпентинитов и хорошо обнаженные тектонические блоки, сложенные габброидами, гранитоидами и диоритами. Поля серпентинитов вытянуты на 500—800 м, ширина их составляет 50—250 м. Тальк-карбонатные и кварц-карбонатные породы приурочены к наиболее крупному полю серпентинитов в среднем течении р. Яныскеулектальба (рис. 2).

Серпентиниты и связанные с ними тальк-карбонатные и кварц-карбонатные породы вскрыты с поверхности рядом канав, пройденных при поисковых работах на никель (И. В. Определеннова, З. А. Юдина, В. Н. Гессе, А. А. Савельев). При геологической съемке территории, проводившейся под руководством Б. Я. Дембовского, апогипербазитовые

Для цитирования: Онищенко С. А., Соболева А. А. Апогипербазитовые метасоматиты поднятия Енганепэ (Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2021. 3(315). С. 11—20. DOI: 10.19110/geov.2021.3.2.

For citation: Onishchenko S. A., Soboleva A. A. Apoultramafic metasomatites of the Enganepe Uplift (the Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2021, 3(315), pp. 21—20, doi: 10.19110/geov.2021.3.2.

породы прослежены до глубины 144.6 м и 181 м скважинами МЕ-1 и МЕ-2, которые достигли подстилающих пород, представленных алевритами. Н. Н. Герасимовым, Н. В. Лапшиным и Н. Н. Хорошкеевым было установлено зональное строение тела апогипербазитовых пород, краевая часть которого сложена серпентинитами, а центральная — кварц-доломитовыми и тальк-доломитовыми породами. По типу метасоматических преобразований процесс определен как листенизация серпентинитов и связывался с более молодыми кварцевыми диоритами. Содержание Ni в апогипербазитовых породах закономерно колеблется в пределах 0.05—0.5 мас. %, чаще всего заключено в интервале 0.1—0.2 мас. %, во вмещающих алев-

ролитах содержание Ni не превышает 0.005 мас. % (Производство геологического доизучения и групповой геологической съемки масштаба 1:50000 Каро-Елецкой площади: Отчет / Б. Я. Дембовский, В. А. Бабушкин, Н. Н. Герасимов, З. П. Дембовская, Н. В. Лапшин, Н. Н. Хорошкеев, А. Г. Циндель, М. А. Шишкин. Воркута, 1983. Кн. 2, С. 21—36, 185—187. ВГФ, инв. № 406836).

Целью данного исследования являлось уточнение характера метасоматических преобразований гипербазитов и минерального состава апогипербазитовых пород, выявление закономерностей изменений хромшпинелидов в различных зонах метасоматической колонки, а также определение минералов — носителей никеля.

Рис. 1. Схема геологического строения северо-западной части поднятия Енганепэ по [4] с изменениями:

1 — рыхлые кайнозойские отложения; 2 — верхнекембрийско-нижеордовикские терригенные породы манитаньрдской серии; 3 — верхневендско-нижекембрийские глинистые сланцы, алевриты и песчаники енганепэской свиты; 4 — верхнерипейско-вендские вулканогенные, вулканогенно-осадочные породы и зеленые сланцы бедамельской серии; 5—7 — серпентинитовый меланж: 5 — серпентинитовый матрикс меланжа (нерасчлененный), 6, 7 — блоки в структуре меланжа (6 — сложенные габброидами, 7 — сложенные гранитоидами и диоритами); 8 — габбро-долериты леквозжского комплекса раннесреднеордовикского возраста. Рамкой обозначено местоположение апогипербазитовых метасоматитов

Fig. 1. Geological structure of the northwestern part of the Enganepe Uplift modified after [4]:

1 — unconsolidated Cenozoic sediments; 2 — Upper Cambrian to Lower Ordovician terrigenous rocks of the Manitanyrd Series; 3 — Upper Vendian to Lower Cambrian mudstones, siltstones, and sandstones of the Enganepe Formation; 4 — Upper Riphean to Vendian volcanic, volcanic-sedimentary rocks, and green schists of the Bedamel Series; 5—7 — serpentinite melange: 5 — serpentinite matrix of melange (undissected), 6, 7 — blocks of igneous rocks in serpentinite melange (6 — gabbroids, 7 — granitoids and diorites); 8 — gabbro-dolerites of the Lekvozha Complex of Early to Middle Ordovician age. The frame indicates the location of apoultramafic metasomatites

Рис. 2. Серпентинитовый меланж с тектоническими блоками габброидов в долине реки Яныскеулектальба (а); коренные обнажения и развалы апогипербазитовых метасоматитов среди серпентинитов в левом борту реки Яныскеулектальба (б)

Fig. 2. Serpentinite melange with tectonic blocks of gabbroids in the valley of the Yanyskeulektalba River (a); bedrock outcrops and debris of apultramafic metasomatites among serpentinites in the left bank of the Yanyskeulektalba River (b)

Методы исследования

Для характеристики состава пород использованы результаты петрохимического и петрографического изучения серпентинитов, тальк-карбонатных и кварц-карбонатных пород по скв. МЕ-1, полученные при геологической съемке территории.

Дополнительный сбор образцов и отбор проб был осуществлен в 2007 г., при их изучении был уточнен минеральный состав апогипербазитовых метасоматитов, определен состав породообразующих и рудных минералов, что позволило, в частности, произвести пересчет данных химических анализов на минеральный состав, в котором очень наглядно проявляется результат метасоматических преобразований. Содержание золота в апогипербазитовых породах (6 проб массой 3—5 кг) определено атомно-абсорбционным методом в лаборатории МИРЕКО.

Строение и состав пород и минералов изучались в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН методами оптической микроскопии и на электронном микроскопе JSM-6400 с энергодисперсионным спектрометром ISIS Link (оператор В. Н. Филиппов). Выполнено 128 определений состава минералов.

Апогипербазитовые породы

Собственно гипербазиты, т. е. мантийные перидотиты пироксен-оливинового состава с аксессуарным хромшпинелидом в качестве обязательного минерала, не сохранились, они нацело серпентинизированы и замещены магнезит-доломит-тальковыми и кварц-магнезит-доломитовыми породами. Геохимической меткой гипербазитов являются относительно высокие

содержания хрома и никеля, которые сохраняются в апогипербазитовых породах. Проведенная интерпретация разреза по скважине МЕ-1 показала, что серпентиниты и магнезит-доломит-тальковые породы слагают чередующиеся пластины мощностью 20—30 м с переходными разностями между ними. Кварц-магнезит-доломитовые породы образуют линзы мощностью до 10 м, заключенные среди магнезит-доломит-тальковых пород.

Серпентиниты представляют собой рассланцованные, частично развальцованные породы черного или зеленовато-черного цвета, среди которых присутствуют линзы мощностью 1—3 м, отличающиеся сливным обликом, тонкозернистым сложением и высокой прочностью.

Серпентиниты сложены преимущественно серпентином (хризотилом и антигоритом), второстепенные минералы представлены карбонатами, тальком, бруситом, в небольшом количестве присутствуют магнетит, хромшпинелид и сульфиды. Структура пород лепидогранобластовая, текстура массивная, пятнистая, линзовидно-полосчатая и сланцеватая, обусловленная параллельным расположением нечетко выраженных полос и линз тальк-серпентинового и карбонатного состава, а также цепочек рудных минералов.

Реликты гипербазитов среди серпентинитов не сохранились, лишь иногда по строению агрегатов серпентина и талька угадывается первичная гипидиоморфная полнокристаллическая структура. Серпентин образует мелкопластинчатые и чешуйчатые агрегаты разноориентированных зерен и агрегатные сростания с карбонатом, содержит рассеянные выделения брусита, замещается чешуйчатыми скоплениями талька.

Таблица 1. Состав апогипербазитовых пород (мас. %)

Table 1. Composition of apoultramafic rocks (wt. %)

Компо- ненты Components	Serp		Tlc–Dol–Mgs				Dol–Mgs–Qz			
	113.2	133.5	44.4	45.4	98	106	6	12	14	33
SiO ₂	41.20	36.98	20.54	20.28	30.88	36.98	33.80	28.12	33.54	27.86
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.56	0.57	0.52	0.41	0.65	0.50	0.54	0.48	0.64	0.68
Fe ₂ O ₃	4.60	3.32	1.01	1.38	1.35	1.58	1.85	1.48	1.38	0.83
FeO	1.87	3.60	3.89	3.60	3.60	3.89	2.30	3.89	3.89	3.81
MnO	0.08	0.12	0.13	0.17	0.15	0.18	0.20	0.10	0.10	0.10
MgO	38.74	36.92	24.05	23.92	25.59	26.13	13.16	23.81	21.98	21.39
CaO	0.24	2.72	17.29	18.01	13.25	10.32	18.44	7.16	6.72	12.04
Na ₂ O	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.03	0.06	0.03	0.06	0.03
K ₂ O	0.03	0.04	0.12	0.03	0.04	0.03	0.09	0.04	0.06	0.03
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01
H ₂ O ⁻	0.74	0.39	0.30	0.30	0.25	0.28	0.34	0.33	0.27	0.31
ппп / LOI	12.21	14.71	31.44	31.41	24.30	19.67	29.12	34.36	30.87	32.63
Сумма Total	100.34	99.44	99.36	99.59	100.12	99.61	99.94	99.82	99.54	99.73
S	0.01	0.10	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02

Рассчитанный минеральный состав
Calculated mineral composition

Srp	95.8	88	0	0	0	0	0	0	0	0
Tlc	1–2	1–2	32.4	32.0	48.7	58.3	3.6	0.0	1.5	5.8
Dol	1	8.5	54.2	56.5	41.5	32.4	57.7	22.4	21.0	37.7
Mgs	1	1–2	10.7	9.7	7.1	4.8	4.5	47.8	42.1	30.2
Qz	0	0	0	0	0	0	31.5	28.1	32.4	24.1

Примечания. Номер пробы — глубина по скв. МЕ-1 в метрах. Породы: Serp — серпентиниты; Tlc–Dol–Mgs — магнетит-доломит-талковые метасоматиты, Dol–Mgs–Qz — кварц-магнетит-доломитовые метасоматиты. Минералы: Srp — серпентин, Tlc — тальк, Dol — доломит, Mgs — магнетит, Qz — кварц. (Анализы апогипербазитовых пород представлены по данным отчёта Дембовского Б. Я. и др., 1983 г., кн. 3, прил. 8.)

Notes. Sample number — depth in the ME-1 borehole in meters. Rocks: Serp — serpentinites; Tlc — Dol — Mgs — magnetite-dolomite-talc metasomatites, Dol — Mgs — Qz — quartz-magnetite-dolomite metasomatites. Minerals: Srp — serpentine, Tlc — talc, Dol — dolomite, Mgs — magnetite, Qz — quartz. (Analyses of apoultramafic rocks are presented according to the report of Dembovsky B. Ya. et al., 1983, V. 3, app. 8.)

Серпентин содержит заметное количество FeO (6.5 мас. %), в тальке FeO значительно меньше (2–3 мас. %), в этих минералах отмечается примесь NiO (до 0.4–0.6 мас. %). Доломит и магнетит образуют совместно с серпентином мелкозернистые агрегаты и зерна неправильной формы размером от мельчайших до 2 мм, слагают полосы и участки удлиненной формы в серпентиновой или тальк-серпентиновой массе. Доломит в серпентинитах содержит 1.8–2.3 мас. % FeO, FeO в магнетите — около 9 мас. %.

Магнетит-доломит-талковые метасоматиты имеют серую или зеленовато-серую окраску, сланцеватую, полосчатую, пятнисто-полосчатую или массивную текстуру, лепидогранобластовую неравномерно-зернистую структуру. Сложены тальком, доломитом и магнетитом, в небольшом количестве присутствуют серпентин, хлорит, амфибол, эпидот, хромшпинелид (с развивающимися по нему магнетитом) и сульфиды. Породы характеризуются неравномерным распределением составляющих их минералов. Содержание таль-

ка в породах варьирует в пределах 30–60 %, встречаются почти мономинеральные линзы талька мощностью до 15 см.

Тальк образует чешуйчатые и чешуйчато-пластинчатые агрегаты, для доломита характерны зерна неправильной или ромбоэдрической формы, а также пятнистые скопления или полосы с гранобластовой или пелитоморфной структурами. Содержание FeO в доломите составляет 4.6–5.1 мас. %, что заметно больше, чем в доломите серпентинитов. Амфибол встречается в карбонатных полосах в виде радиально-лучистых агрегатов и тонких призм длиной 0.1–0.25 мм. В шлифе он бесцветный, угол угасания 9–11°. Хлорит (в шлифе бледно-зеленый или зеленовато-желтый) присутствует в виде отдельных пластинок размером до 1 мм и мелких скоплений чешуйчатых агрегатов, иногда развивается в карбонате вокруг зерен хромшпинелида.

Хромшпинелид, содержание которого около 1 %, распределен неравномерно, образуя мелкие скопле-

ния. Относительно крупные зерна размером 0.4—1.0 мм просвечивают в проходящем свете темно-красным цветом. По трещинкам и по периферии зерен замещается вторичными хромшпинелидами, реже магнетитом с толщиной каём и прожилков 10—15 мкм.

Кварц-магнезит-доломитовые метасоматиты имеют светло-серую или серую окраску, массивную, полосчатую или линзовидно-полосчатую текстуру, гранобластовую мелко- и среднезернистую неравномерно-кристаллическую структуру. Породы отличаются прочностью, с поверхности покрыты бурой корочкой выветривания.

Сложены доломитом, магнезитом и кварцем, второстепенные минералы представлены хлоритом, зеленым мусковитом, хромшпинелидом, сульфидами. Присутствуют немногочисленные прожилки белого кристаллически-зернистого карбоната толщиной до 1 см, содержащие шестоватые или лучистые агрегаты миллерита. Реже отмечаются кварц-карбонатные жилки мощностью до 5 см, содержащие выделения зеленого фуксита.

Состав кварц-магнезит-доломитовых пород в зависимости от преобладающего карбоната варьирует от кварц-доломитового (с небольшой примесью магнезита) до кварц-доломит-магнезитового. При визуальном осмотре и петрографическом изучении они различаются слабо, но хорошо идентифицируются по данным химического анализа: породы с преобладанием магнезита содержат намного меньше кальция при равной величине потерь при прокаливании, отражающей содержание CO_2 .

Доломит образует выделения неправильной формы, а также идиоморфные мелкие зерна с ромбовидными сечениями. Содержание FeO в доломите кварц-магнезит-доломитовых пород, как и в доломите карбонат-тальковых пород, составляет 4.6—5.1 мас. %. Кварц в виде зерен неправильной формы образует мо-

заичную ткань, а участками — стебельчатые и радиально-лучистые агрегаты, между которыми отмечаются участки микрозернистого строения.

В отдельных участках кварц-магнезит-доломитовых пород присутствуют тонкие (до 1 мм) полоски с мелкой вкрапленностью черного хромшпинелида, а также обильные линзочки и прожилки ярко-зеленого хлорита толщиной 1—2 мм, сгруппированные в нечеткие полосы толщиной до 5—7 см, ориентированные согласно общей полосчатости пород. Хлорит обычно встречается в смеси со светло-зеленым мусковитом, видимо фукситом.

Содержание хромшпинелида в породе около 0.5 %, иногда до 2 %. Хромшпинелид, содержащийся в жилах вместе с хлоритом и зеленым мусковитом, очень трещиноватый и брекчированный, слоистые минералы исполняют роль цемента. В проходящем свете хромшпинелид имеет красно-бурый цвет. Размер наиболее крупных зерен хромшпинелида 0.5 мм, но более распространены его мелкие зерна, образующие цепочки, скелетовидные агрегаты, а также рассеянную вкрапленность. Наиболее мелкие рудные выделения в хлоритовых прожилках сложены хромсодержащим магнетитом.

Содержание золота в апогипербазитовых породах незначительно, по данным атомно-абсорбционного анализа в серпентинитах и тальк-карбонатных породах Au — 0.003—0.004 г/т, в кварц-карбонатных породах Au — 0.002 г/т.

Хромшпинелиды

Хромшпинелиды подверглись преобразованиям совместно с вмещающими их породами, однако во всех породах, независимо от степени их метасоматических преобразований, сохранилась ядерная часть хромшпинелида, являющаяся реликтовым минералом

Рис. 3. Преобразования хромшпинелида в серпентините:

а — первичный алюмохромит Chr-1 замещается Zn-Mn-содержащим субферриалюмохромитом (Chr-2) в виде широкой неоднородной каймы и Zn-Mn-содержащим феррихромитом (Chr-3) в виде внешней тонкой каймы; б — первичный алюмохромит Chr-1 замещается Zn- и Mn-содержащим феррихромитом (Chr-3) в виде тонкой каймы. Mt — магнетит. Снимок полированного шлифа: а — в отраженных электронах, б — в отраженном свете

Fig. 3. Transformations of chrome-spinel in serpentinite:

а — primary alumochromite Chr-1 is replaced by Zn-Mn-containing subferri-alumochromite (Chr-2) in the form of a wide heterogeneous rim and Zn-Mn-containing ferrichromite (Chr-3) in the form of an outer thin rim; б — primary alumochromite Chr-1 is replaced by Zn and Mn-containing ferrichromite (Chr-3) in the form of a thin rim. Mt — magnetite. Snapshot of the polished thin section: а — backscattered electron image, б — reflected light image

Таблица 2. Состав хромшпиннелидов и магнетита в серпентините (ан. 1—9),
магнетит-доломит-талковых (ан. 10—13) и кварц-магнетит-доломитовых метасоматитах (ан. 14—18), мас. %
Table 2. Composition of chrome-spinel and magnetite from serpentinite (analyses 1—9),
magnetite-dolomite-talc (analyses 10—13) and quartz-magnetite-dolomite metasomatites (analyses 14—18), wt. %

Оксид Oxide	Chr-1		Chr-2		Chr-3		Mt		Chr-1		Mt		Chr-1		Chr-1		Chr-2	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
MgO	10.30	9.96	8.93	4.52	3.65	1.12	0.0	0.0	0.0	11.53	10.83	0.0	0.0	12.39	10.45	10.42	0.0	1.20
FeO	19.18	19.69	21.02	24.68	25.58	26.68	29.19	30.60	31.05	16.62	17.79	31.08	31.10	16.12	18.65	19.02	29.74	28.92
MnO	0.0	0.0	0.0	1.95	1.08	2.33	2.61	0.49	0.0	0.0	0.82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.81	0.62
ZnO	0.0	0.0	0.0	0.0	1.20	1.43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.33	1.85
Al ₂ O ₃	18.40	18.19	16.82	10.27	8.81	2.02	1.15	0.0	0.0	20.49	19.93	0.0	0.0	19.00	18.85	18.56	5.55	7.89
Cr ₂ O ₃	49.36	50.09	49.62	49.24	49.38	43.35	37.54	4.47	0.99	51.36	48.14	3.22	4.38	52.41	52.05	49.23	46.29	44.85
Fe ₂ O ₃	2.75	2.08	3.61	9.34	10.30	22.72	29.50	64.43	67.96	0.0	2.49	65.70	64.52	0.08	0.0	2.76	14.24	13.74
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V ₂ O ₅	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.03	0.93
Сумма Total	99.99	100.01	100.0	100.0	100.0	100.01	99.99	99.99	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.99	99.99	100.0

Коэффициенты в формуле $A^{2+}B^{3+}O_4$ / Atoms per formula $A^{2+}B^{3+}O_4$

Mg	0.49	0.47	0.43	0.23	0.19	0.06	0.0	0.0	0.0	0.54	0.51	0.0	0.0	0.58	0.49	0.49	0.0	0.06
Fe ²⁺	0.51	0.53	0.57	0.71	0.75	0.83	0.92	0.98	1.00	0.43	0.47	1.00	1.00	0.42	0.50	0.51	0.91	0.87
Mn	0.0	0.0	0.0	0.06	0.03	0.07	0.08	0.02	0.0	0.0	0.02	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.02
Zn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.06	0.05
Al	0.69	0.69	0.64	0.42	0.36	0.09	0.05	0.0	0.0	0.76	0.74	0.0	0.0	0.70	0.70	0.70	0.24	0.34
Cr	1.24	1.26	1.27	1.34	1.37	1.27	1.12	0.14	0.03	1.27	1.20	0.10	0.13	1.30	1.31	1.24	1.34	1.27
Fe ³⁺	0.07	0.05	0.09	0.24	0.27	0.63	0.83	1.86	1.97	0.0	0.06	1.90	1.87	0.0	0.0	0.06	0.39	0.37
Ti	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03	0.02

Примечания. Содержания FeO и Fe₂O₃ рассчитаны по стехиометрии шпинелей. Chr-1 — первичный хромшпиннелид (алюмохромит), Chr-2 — субферриалумохромит (кайма), Chr-3 — феррихромит (кайма), Mt — магнетит.

Notes. The FeO and Fe₂O₃ contents were calculated from the spinel stoichiometry. Chr-1 — primary chrome-spinel (alumochromite), Chr-2 — subferriallumochromite (rim), Chr-3 — ferrichromite (rim), Mt — magnetite.

исходных гипербазитов. Во всех исследованных зернах ядро сложено алюмохромитом, такой состав хромшпинелида отражает этап магматической кристаллизации гипербазита. Алюмохромит имеет однородное строение, состав его довольно стабилен (мас. %): MgO — 8.9–12.4, FeO — 16.1–21.0, Al_2O_3 — 16.8–20.5, Cr_2O_3 — 48.1–52.4, Fe_2O_3 — до 3.6 (табл. 2).

В результате метаморфогенно-метасоматических процессов первичный алюмохромит замещается вторичными хромшпинелидами, а также магнетитом с образованием каём и прожилков (рис. 3 и 4). Развитие вторичных хромшпинелидов в поверхностной части зерен, извлеченных из апогипербазитовых метасоматитов, уже отмечалось ранее [10]. В химическом отношении преобразование хромшпинелида заключается в последовательном выносе магния, алюминия и хрома и привносе железа, что приводит к формированию каём различного состава. Процесс миграции компонентов имеет диффузионный характер, но новообразованные шпинелиды имеют дискретный состав с хорошо заметными субфазовыми границами. Вынос магния и алюминия с эквивалентным замещением их соответственно двух- и трехвалентным железом приводит к образованию субферриалюмохромита, а затем — феррихромита. Дальнейшие преобразования хромшпинелида связаны с замещением хрома трехвалентным железом, что приводит к образованию хромсодержащего магнетита.

Полностью минеральный ряд последовательно замещения алюмохромита прослеживается в серпентинитах, не столь отчетливо проявлен в магнетит-доломит-талковых породах, а в кварц-магнетит-доломитовых породах практически отсутствует конечный член преобразований — магнетит. Это связано с неустойчивостью магнетита в лиственитах, его растворением и переходом железа в карбонатную форму [7].

При полном замещении первичного алюмохромита вторичными хромшпинелидами зерна приобретают ситовидное строение, обусловленное большим количеством включений нерудных минералов. Включения в хромшпинелиде серпентинитов представлены серпентином, хромовым хлоритом, доломитом и бруситом. Среди включений в хромшпинелиде кварц-магнетит-доломитовых метасоматитов преобладает Ni-Cr-хлорит.

Вторичные хромшпинелиды характеризуются заметными примесями ZnO (до 2.3 мас. %), MnO (до 2.6 мас. %), иногда V_2O_5 (до 1 мас. %), которые в составе первичного алюмохромита обычно не фиксируются. В магнетите указанные примеси также не выявлены. Обогащение эпигенетических хромшпинелидов цинком и марганцем является распространенным явлением [9]. В частности, относительно высокие содержания ZnO (6.31 мас. %) и MnO (2.82 мас. %) установлены в хроммагнетитовой кайме вокруг высокоглиноземистой ядерной части хромшпинелида в лампрофировых дайках на Среднем Тимане [5].

Хлориты

Хромовый хлорит обнаружен в серпентинитах в виде включений во вторичных хромшпинелидах ситовидного строения. Находится в тонком срастании с серпентином, доломитом и бруситом. Содержание Cr_2O_3 в хлорите — 3.3–7.9 мас. %, никель не обнаружен.

Никель-хромовый хлорит характерен для кварц-магнетит-доломитовых пород, образует включения в хромшпинелидах, а также прожилки толщиной до 0.5 мм и мелкие пятнистые выделения вокруг раздробленных зерен хромшпинелида (рис. 4, b). Выделения Ni-Cr-хлорита имеют тонкоочаговое строение. Содержание Cr_2O_3 в хлорите составляет 4.3–6.7 мас. %, NiO — 2.6–4.4 мас. % (табл. 3).

Рис. 4. Преобразования хромшпинелида в магнетит-доломит-талковых (а) и кварц-магнетит-доломитовых (b) метасоматитах: а — первичный алюмохромит Chr-1 с прожилками магнетита Mt; б — первичный алюмохромит Chr-1 по периферии замещается Zn-Mn-V-содержащим субалюмоферрихромитом (Chr-2). Включения в хромшпинелиде и прожилки в кварц-доломитовой породе — Ni-Cr-хлорит (Chl). Снимок полированного шлифа: а — в отраженном свете, б — в отраженных электронах

Fig. 4. Transformations of Cr-spinel in magnesite-dolomite-talc (a) and quartz-magnesite-dolomite (b) metasomatites: а — primary alumochromite Chr-1 with magnetite veins Mt; б — primary alumochromite Chr-1 is replaced by Zn-Mn-V-containing subaluminoferrichromite (Chr-2) in the rims. Inclusions in chrome-spinel and veinlets in quartz-dolomite rock are Ni-Cr-chlorite (Chl). Snapshot of the polished thin section: а — in reflected light image, б — backscattered electron image

Таблица 3. Состав Ni-Cr-хлорита (мас. %)
Table 3. Composition of Ni-Cr-chlorite (wt. %)

Оксид / Oxide	1	2	3
SiO ₂	25.65	25.81	29.01
Al ₂ O ₃	13.11	12.94	12.99
Cr ₂ O ₃	6.67	5.07	4.30
MgO	22.37	21.25	25.90
FeO	11.59	9.61	9.91
NiO	4.37	4.13	2.58
Сумма / Total	83.76	78.81	84.69

Примечания. 1 и 2 — включения в хромшпинелиде ситовидного строения, 3 — прожилки в кварц-доломитовой породе.

Notes. 1 and 2 — inclusions in sieve-textured chrome-spinel, 3 — veinlets in quartz-dolomite rock.

Образование Ni-Cr-хлорита тесно связано с разложением хромшпинелида, наиболее богатого глиноземом минерала гипербазитов. Замещение первичного алюмохромита вторичными хромшпинелидами приводит к выносу хрома и алюминия, из которых формируется хлорит. Никель заимствуется из силикатов (серпентина и талька) при их замещении карбонатами и кварцем. Присутствие некоторой части никеля в силикатной форме свидетельствует о низкой активности серы в гидротермальном растворе.

Сульфиды

Содержание сульфидов в апогипербазитовых породах невелико, обычно не более 0.5 %. Преобладает миллерит NiS, в сростании с ним встречаются кобальтин (Co,Ni,Fe)AsS, герсдорфит (Ni,Co,Fe)AsS и полидимит NiNi₂S₄. В каймах замещения алюмохромита вторичными хромшпинелидами отмечены единичные мелкие зернышки зигенита CoNi₂S₄ (фактический со-

став Co_{1.24}Ni_{1.91}Fe_{0.12}S_{3.73}) и галенита. В кварц-магнезит-доломитовых породах присутствуют также редкие зерна пирита размером до 1 мм, содержащие 1–2 мас. % Co и Ni.

Миллерит образует во всех породах неравномерную вкрапленность зерен удлиненной и неправильной формы, размером 0.01–0.1 мм, изредка до 0.4 мм. В кварц-магнезит-доломитовых породах, в прожилках белого крупнозернистого карбоната шестоватые или лучистые агрегаты миллерита достигают 2 мм. Индивидуальные иголки миллерита очень тонкие, около 0.1 мм. Мелкие зерна минерала монокристалличны, более крупные представлены сростаниями нескольких зерен. Состав миллерита близок к теоретическому: Ni_{1.02}Fe_{0.01}Co_{0.01}S_{0.96}. В сростании с миллеритом отмечаются редкие мелкие (10 мкм) выделения полидимита состава Ni_{2.50}Co_{0.43}Fe_{0.20}S_{3.87}.

Кобальтин и герсдорфит образуют самостоятельные или совместные включения размером 5–20 мкм в миллерите (рис. 5). Эти минералы практически не отличаются между собой в отраженном свете и в отраженных электронах, поэтому их сростания выглядят как мономинеральные выделения. Кобальтин и герсдорфит различаются только в характеристическом излучении Ni и Co. Состав минералов заключен в довольно узких пределах: кобальтин (Co_{0.82–0.91}Ni_{0.20–0.25}Fe_{0.04–0.08})As_{0.93–0.99}S_{0.87–0.97}, герсдорфит (Ni_{0.85–0.92}Co_{0.11–0.21}Fe_{0.03–0.05})As_{0.99–1.01}S_{0.88–0.95}.

Обсуждение результатов

Магнезит-доломит-тальковые и кварц-магнезит-доломитовые породы представляют последовательный ряд метасоматических преобразований серпентинитов, являющихся метаморфическими производными гипербазитов. Все апогипербазитовые породы могут являться продуктами единого процесса, но с учетом относительной локальности проявлений магнезит-доломит-тальковых и кварц-магнезит-доломитовых метасоматитов можно предположить, что они замещали ранее образованные серпентиниты.

Рис. 5. Миллерит (Mlr) с включениями кобальтина (Cob) и герсдорфита (Gdf). Слева снимок в отраженных электронах, в которых кобальтин и герсдорфит не различаются, справа четыре снимка в характеристическом излучении Co, Ni, As и S

Fig. 5. Millerite (Mlr) with inclusions of cobaltite (Cob) and gersdorffite (Gdf). Left — backscattered electron image, in which cobaltite and gersdorffite do not differ, right — four characteristic X-ray images (Co, Ni, As, and S)

В химическом отношении процесс изменения серпентинитов заключается в привносе углекислоты и вытеснении магния более сильным основанием — кальцием. Реперами, позволяющими судить о миграции компонентов, являются наиболее инертные Al_2O_3 и TiO_2 , содержание которых в породах различных зон метасоматической колонки неизменно. В зоне тальк-карбонатных пород происходит замещение серпентина тальком, доломитом и магнезитом. Конечным продуктом метасоматических преобразований являются кварц-карбонатные породы, в которых силикатные минералы становятся неустойчивыми, замещаются доломитом и магнезитом с выделением кремнезема в виде кварца. Часть кремнезема при этом из породы выносятся. Процесс имеет восстановительный характер, в серпентинитах содержание FeO и Fe_2O_3 примерно одинаковое, в тальк-карбонатных и кварц-карбонатных породах FeO заметно преобладает над Fe_2O_3 .

Последовательный ряд пород: серпентиниты — тальк-карбонатные породы — кварц-карбонатные породы — соответствует колонке лиственитов по гипербазитам и относится к березит-лиственитовой формации метасоматических пород. По минеральному составу породы этой формации имеют определенное сходство с породами формации тальк-карбонатных метасоматитов, отличаясь геологической позицией, масштабами проявления, химизмом преобразований пород, а также сопутствующим оруденением.

Метасоматиты березит-лиственитовой формации имеют обычно небольшую (до 2—5 м) мощность и контролируются в основном трещинными структурами; метасоматиты тальк-карбонатной формации имеют площадное распространение, контролируются мощными зонами рассланцевания, имеют сланцеватую текстуру. Для метасоматитов обеих формаций характерен интенсивный привнос CO_2 , но в метасоматитах березит-лиственитовой формации отмечается привнос калия и серы, что для пород тальк-карбонатной формации не характерно [8]. Кроме того, в тальк-карбонатной формации незначительна роль кварц-карбонатных пород. Метасоматиты березит-лиственитовой формации сопровождаются золотым и полиметаллическим оруденением, для метасоматитов тальк-карбонатной формации более характерны тальк-магнезитовые месторождения [8], а также кобальт-медноколчеданное оруденение [1].

Апогипербазитовые метасоматиты кряжа Енганепэ отличаются от типичных метасоматитов березит-лиственитовой формации отсутствием заметного привноса калия и серы, хотя в незначительном количестве калиевая слюда (фуксит) фиксируется в кварц-карбонатных породах. Специфичным является также широкое развитие доломита в тальк-карбонатных и кварц-карбонатных породах.

Никель, изначально содержащийся в гипербазитах, сохраняется в серпентинитах, тальк- и кварц-карбонатных породах. Основным носителем никеля во всех породах является миллерит, силикатными носителями никеля в серпентинитах являются серпентин и тальк, в кварц-карбонатных породах — Ni-Cr-хлорит.

Изменения минерального состава пород в результате метасоматических процессов отразилось на их внешнем облике: если для серпентинитов характерна

темная, почти черная окраска, то кварц-карбонатные породы имеют светло-серый, иногда белый цвет. Кварц-карбонатные породы имеют определенное сходство с перекристаллизованными доломитами (доломитовыми мраморами) осадочного происхождения, от которых отличаются наличием Cr- и Ni-содержащих минералов.

Заключение

Апогипербазитовые метасоматиты кряжа Енганепэ имеют зональное строение: серпентиниты сменяются породами магнезит-доломит-талькового состава и далее кварц-магнезит-доломитовыми породами. Метасоматиты относятся к березит-лиственитовой формации, отличаясь от типичных ее представителей отсутствием заметного привноса калия и серы, а также значительным развитием доломита.

Геохимические особенности гипербазитов (высокие содержания хрома и никеля) сохраняются в апогипербазитовых породах. Хромшпинелид магматического этапа представлен алюмохромитом, который в процессе метаморфических и метасоматических преобразований пород замещался субферриалюмохромитом, феррихромитом и хромсодержащим магнетитом. Носителями никеля и кобальта в породах являются миллерит, кобальтин, герсдорфит, полидимит и зигенит. В серпентинитах некоторая часть никеля содержится в породообразующих серпентине и тальке, в кварц-магнезит-доломитовых породах — в Ni-Cr-хлорите.

Конечные продукты метасоматических преобразований гипербазитов — кварц-магнезит-доломитовые породы — имеют определенное сходство с доломитами (доломитовыми мраморами) осадочного происхождения, от которых отличаются наличием Cr- и Ni-содержащих минералов.

Литература

1. Артемьев Д. А., Зайков В. В. Тальк-карбонатные метасоматиты и их роль в формировании кобальт-медноколчеданного оруденения в ультрамафитах Главного Уральского разлома // Литосфера. 2009. № 1. С. 47—69.
2. Душин В. А. Магматизм и геодинамика палеоконтинентального сектора севера Урала. М.: Недра, 1997. 213 с.
3. Кузнецов Н. Б., Соболева А. А., Удоротина О. В., Герцева М. В. Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция протоуралит-тиманид. Сыктывкар: Геопринт, 2005. 100 с.
4. Кузнецов Н. Б., Куликова К. В., Удоротина О. В. Структурные особенности протоуралит поднятия Енганепэ (Полярный Урал) как отражение кембрийской коллизии Балтики и Арктиды // Доклады АН. 2007. Т. 415. № 1. С. 77—82.
5. Макеев А. Б., Макеев Б. А. Цинковые хромшпинелиды Среднего Тимана и Приполярного Урала // Доклады АН. 2005. Т. 404. № 2. С. 235—240.
6. Моргунова А. А., Соболева А. А. Реликты корневой части позднерифейской примитивной островной дуги на севере поднятия Енганепэ (Полярный Урал) // Вестник Института геологии КНЦ УрО РАН. 2007. № 12. С. 13—18.
7. Сазонов В. Н. Хром в гидротермальном процессе. М.: Наука, 1978. 288 с.

8. Сазонов В. Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 207 с.

9. Силаев В. И., Шабалин В. Н., Голубева И. И. и др. О цинксодержащих и цинкистых хромшпинелидах Тимано-Уральского региона // Вестник института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2008. № 8. С. 6—17.

10. Соболева А. А., Куликова К. В., Кузнецов Н. Б., Филиппов В. Н., Белоусова Е. А. Хромшпинелиды из доуральских гипербазитов (Полярный Урал) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2013): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2013. С. 133—135.

11. Хаин Е. В., Бибикина Е. В., Душин В. А., Федотова А. А. О возможных связях между Палеоазиатским и Палеоатлантическим океанами в вендское и раннепалеозойское время // Тектоника и геодинамика, общие и региональные аспекты: Материалы XXXI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 1998. Т. II. С. 244—246.

12. Scarrow J. H., Pease V., Fleutelot C., Dushin V. The late Neoproterozoic Enganepe ophiolite, Polar Urals, Russia: An extension of the Cadomian arc? // Precambrian Research. 2001. V. 110. P. 255—275.

References

1. Artemev D. A., Zajkov V. V. Talk-karbonatnye metasomaty i ih rol v formirovani koba't-mednokolchedannogo orudeneniya v ultramafitah Glavnogo Ural'skogo razloma (Talc-carbonate metasomatites and their role in the formation of cobalt-copper pyrite mineralization in ultramafic rocks of the Main Ural fault). Litosfera, 2009, No. 1, pp. 47—69

2. Dushin V. A. Magmatizm i geodinamika paleokontinental'nogo sektora severa Urala (Magmatism and geodynamics of the paleocontinental sector of the north of the Urals). Moscow: Nedra, 1997, 213 p.

3. Kuznetsov N. B., Soboлева A. A., Udoratina O. V., Gertzeva M. V. Doordovikskie granitoidy Timano-Ural'skogo regiona i evolyuciya protouralid-timanid (Preordovician granitoids of the Timan-Ural region and the evolution of Protouralids-Timanids). Sykt'yvkar: Geoprint, 2005, 100 p.

4. Kuznetsov N. B., Kulikova K. V., Udoratina O. V. Strukturnyye osobennosti protouralid podnyatiya Yenganepe (Polyarnyy Ural) kak otrazheniye kembriyskoy kollizii Baltiki i Arktidy (Structural patterns of pre-Uralides in the Enganepe up-

lift (Polar Urals) as a reflection of the Cambrian collision of Baltica and Arctida). Doklady Earth Sciences, 2007, V. 415, No. 1, pp. 695—700.

5. Makeev A. B., Makeev B. A. Cinkovye hromshpinelidy Srednego Timana i Pripolyarnogo Urala (Zinc Cr-spinels of the Middle Timan and Subpolar Urals). Doklady Earth Sciences, 2005, V. 404, No. 2, pp. 235—240.

6. Morgunova A. A., Soboлева A. A. Relikty kornevoj chasti pozdnerifejskoj primitivnoj ostrovnnoj dugi na severe podnyatiya Enganepe (Polyarnyy Ural) (Relics of the root part of the Late Riphean primitive island arc in the north of the Yenganepe uplift (Polar Urals)). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2007, No. 12, pp. 13—18.

7. Sazonov V. N. Hrom v gidrotermal'nom processe (Chromium in the hydrothermal process.). Moscow: Nauka, 1978, 288 p.

8. Sazonov V. N. Berезит-listvenitovaya formaciya i soputstvuyushchee ej orudenenie (na primere Urala) (Beresite-listvenite formation and accompanying mineralization (on the example of the Urals)). Sverdlovsk: UB AS USSR, 1984, 207 p.

9. Silaev V. I., Shabalin V. N., Golubeva I. I. et al. O cink-soderzhashchih i cinkistyh hromshpinelidakh Timano-Ural'skogo regiona (About zinc-containing and zinc-containing chrome spinels of the Timan-Ural region). Vestnik of Institute of geology Komi SC UB RAS, 2008, No. 8, pp. 6—17.

10. Soboлева A. A., Kulikova K. V., Kuznetsov N. B., Filippov V. N., Belousova E. A. Hromshpinelidy iz douralskih giperbazitov (Polyarnyy Ural). Sovremennye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii (Chromspinelids from pre-Ural hyperbasites (Polar Urals). Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin Readings 2013): Proceedings of conference. Sykt'yvkar: IG Komi SC UB RAS, 2013, pp. 133—135.

11. Khaин E. V., Bibikova E. V., Dushin V. A., Fedotova A. A. O vozmozhnyh svyazyah mezhdu Paleoaziat'skim i Paleoatlanticheskim okeanami v vend'skoe i rannepaleozojskoe vremya (Possible connections between the Paleo-Asian and Paleo-Atlantic oceans in the Vendian and Early Paleozoic times). Tektonika i geodinamika, obshchie i regional'nye aspekty (Tectonics and geodynamics, general and regional aspects). Proceedings of conference. Moscow: GEOS, 1998, V. II, pp. 244—246.

12. Scarrow J. H., Pease V., Fleutelot C., Dushin V. The late Neoproterozoic Enganepe ophiolite, Polar Urals, Russia: An extension of the Cadomian arc? Precambrian Research, 2001, V. 110, pp. 255—275.

Поступила в редакцию / Received 19.02.2021