

МИНЕРАЛЫ БАРИЯ – БАРИТ И ХЛОРДОМИНАНТНЫЙ ФЕРРОКИНОШИТАЛИТ $BaFe^{2+}_3[Cl_2/Al_2Si_2O_{10}]$ В ПЛАГИОПЕРИДОТИТАХ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ) – ПРОДУКТЫ ЭПИГЕНЕТИЧНОГО НИЗКОГРАДНОГО МЕТАМОРФИЗМА

© 2019 г. Э. М. Спиридонов^{а,*}

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Геологический факультет,
Россия, 119991 Москва, Ленинские Горы, 1
e-mail: *ernstspiridon@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2018 г.

После доработки 25.04.18 г.

Принята к публикации 11.01.2019 г.

В плагиоперидотитах гипербазит-базитового Йоко-Довыренского интрузива, захваченных низкоградным метаморфизмом (НГМ) в условиях пренит-пумпеллиитовой фации (ППФ), наблюдается мобилизация Ba, Cl и Sr. Фоновые содержания бария в плагиоперидотитах составляют от 36 до 313 (в среднем 130 г/т); стронция – от 25 до 169 (в среднем 86 г/т); величина Ba/Sr варьирует от 0.5 до 4 (в среднем 1.5). Минералы-носители бария – флогопит и плагиоклаз; хлора – хлорферрисаданагаит из включений в алюмохромите, позднемагматические флогопит, хлоркалиевый ферропаргасит и хлорапатит в оторочках сульфидных гнезд. При процессах НГМ эти минералы были замещены хлоритами, тремолитом, диопсидом, в составе которых крайне мало Ba и Cl. В участках развития бариевых минералов плагиоперидотиты содержат 348–518 г/т бария и 4–6 г/т стронция, что свидетельствует о перераспределении Ba и выносе Sr. Метаморфогенные бариевые минералы – безстронциевый барит и Ba-Fe-Cl слюда – хлордоминантный феррокиношитацит. Они сосуществуют с минералами родингитовой ассоциации – гидрогранатами, тремолитом, диопсидом, хлоритами, антигоритом, магнетитом, гидроксилпатитом. Феррокиношитацит замещает флогопит, плагиоклаз, сульфиды, содержит до 21 мас. % BaO, 31 % FeO, 11 % Cl и имеет железистость $f = 75.8 - 90.5$. Состав наиболее богатого хлором индивида отвечает $(Ba_{0.83}K_{0.16}/_{0.99})(Fe^{2+}_{2.63}Mg_{0.28}Fe^{3+}_{0.04}Al_{0.02}Cr_{0.01}Mn_{0.01})_3[(Cl_{1.86}OH_{0.12}S_{0.02})_2/Al_{1.86}Si_{2.14}O_{10}]$. Поскольку Йоко-Довыренский феррокиношитацит – хлордоминантный, это – новый минеральный вид.

Ключевые слова: хлорферрисаданагаит, хлоркалиевый ферропаргасит, низкоградный метаморфизм, серпентин, антигорит, хлорит, рипидолит, барит, хлордоминантный феррокиношитацит, гидрогроссуля

DOI: 10.31857/S0016-752564111196-1205

ВВЕДЕНИЕ

Минералы-концентраты бария в магматических горных породах – K-Na полевые шпаты и обогащенные калием плагиоклазы, а при их отсутствии – флогопит, который в некоторых типах щелочных магматических пород содержит более 5 мас.% этого элемента. Флогопит в отложениях пост-вулканических гидротерм содержит до 18 мас.% Ba. Бариевые полевые шпаты, слюды и иные бариевые алюмосиликаты развиты преимущественно в метаморфизованных горных породах и метаморфизованных Fe-Mn,

барит-полиметаллических и барит-колчеданных рудах (Segnit, 1946; Fortey, Beddoe-Stephens, 1982; Tracy, 1991; Dunn, 1995; Brügger, Gieré, 2000). Также бариевые слюды характерны для метаморфизованных углеродисто-кремнистых пород (Анкинович и др., 1972, 1997) и манганолитов (Tracy, 1991; Gnos, Armbruster, 2000).

К настоящему времени известны следующие минеральные виды бариевых слюд (Pattiaratchi et al., 1967; Анкинович и др., 1972, 1997; Tracy, 1991; Harlow, 1995; Guggenheim, Frimmel, 1999; Gnos, Armbruster, 2000; Graeser et al., 2003):

эллахерит	$Ba Al_2 [AlSi_3O_{10}] (OH)_2$
гантерит	$Ba Na Al_4 [Al_3Si_5O_{20}] (OH)_4$
черныхит	$Ba V_2 [Al_2Si_2O_{10}] (OH)_2$
анандит	$Ba Fe^{2+}_3 [Fe^{3+}Si_3O_{10}] (OH) S$
киношиталит	$Ba Mg_3 [Al_2Si_2O_{10}] (OH)_2$
феррокиношиталит	$Ba Fe^{2+}_3 [Al_2Si_2O_{10}] (OH)_2$
феррикиношиталит	$Ba Fe^{3+}_3 [Al_2Si_2O_{10}] O_2(OH, F)$
оксикиношиталит	$Ba Mg_2 (Ti, Fe^{3+}) [Al_2Si_2O_{10}] (O, OH, S)_2$

Феррокиношиталит установлен нами среди продуктов низкоградного метаморфизма сульфидоносных плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива.

Химический состав минералов, приведенных в статье, выполнен в лаборатории локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV, аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева.

ГЕОЛОГИЯ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

Позднерифейский Йоко-Довыренский ультрамафит-мафитовый расслоенный интрузив размером $26 \times 3.5 \times 5$ км размещен в байкалидах северного Прибайкалья. Центральная часть интрузива характеризуется наиболее мощным и дифференцированным разрезом (Конников и др., 1994; Кислов и др., 1997; Ярошевский и др., 2006; Орсов, 2008; Арискин и др., 2009). Его нижняя треть сложена оливин-алюмохромитовыми кумулатами, представленными оливиновыми и пикритовыми габбро-норит – долеритами приконтактовой фации и мощной толщей перидотитов (бронзит-эндиопсид-плагиоклаз-содержащими дунитами и лерцолитами). Средняя часть разреза сложена троктолитами со шлирами и жилами анортозитов (кумулясные оливин и битовнит). Верхняя треть разреза представлена габброидами (кумулясный лабрадор – битовнит). U/Pb возраст магматических пород по циркону и бадделеиту – 728 ± 3 млн лет (Ariskin et al., 2018). Интрузив окружен роговиками по терригенным, известняково-доломитовым, пиритоносным углеродистым породам рифея.

Интрузив сложен продуктами кристаллизационной дифференциации низкощелочного пикритового расплава, контаминированного веществом континентальной земной коры. Для габброидов и перидотитов Йоко-Довыренского интрузива характерно необычно высокое соотношение $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.709–0.715$, чаще $0.711–0.713$ (Кислов и др., 1989; Amelin et al., 1996; Арискин и др., 2009) и повышенные концентрации Ba и Sr. Фоновые содержания Ba в плагиоперидотитах – от 36 до 313 (в среднем 130 г/т, $n=41$); Sr – от 25 до 169 (в среднем 86 г/т); величина Ba/Sr – от 0.5 до 4 (в среднем 1.5) (Ariskin et al., 2018).

Интрузив формировался в условиях гипабиссальной фации глубинности. Тем не менее минералы интрузивных пород, роговиков и скарнов, а также продукты кристаллизации локально развитых в интрузиве сульфидных расплавов испытали интенсивные субсолидусные превращения и частично перекристаллизованы.

ПЛАГИОПЕРИДОТИТЫ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

Плагиоперидотиты, развитые в нижней части толщи перидотитов, состоят в основном из кристаллов кумулятивного оливина размером от долей до $3–4 \times 1.5–2$ мм. Это – магнезиальный хризолит Fo_{87-84} чаще Fo_{86-85} , типичный состав $Fo_{85.6}$. Оливин содержит мелкие включения малотитанистого ($0.2–0.8$ мас. % TiO_2) алюмохромита, бедного Fe^{3+} , Mn и Zn. В промежутках между кристаллами оливина расположены небольшие, обычно менее 50 мкм, кристаллы кумулятивного алюмохромита и их агрегаты. По составу они близки алюмохромиту, включенному в оливин, но несколько более глиноземисты и титанисты ($0.2–2.8$ % TiO_2). Содержание алюмохромита в плагиоперидотитах колеблется от долей до $5–7$ об. %.

Кристаллы алюмохромита содержат мелкие округлой формы протогенетические включения, которые представлены срастаниями Al-Cr бронзита, Cr-Ti флогопита (до существенно Na флогопита и прайсверкита), Ca альбита (до альбит-олигоклаза) и крайне высокоглиноземистого и весьма богатого Ti и Cr амфибола. Амфибол содержит ~5 мас. % Cl (ан. 1, табл. 1), его формула – $(Na_{0.35} K_{0.32})_{0.67} Ca_{1.50} (Fe^{3+}_{1.62} Mg_{1.31} Mn^{3+}_{0.05} Zn_{0.02})_3 (Cr_{0.93} Ti_{0.56} Fe^{3+}_{0.49} V_{0.02})_2 [Cl_{1.17} OH_{0.83}]_2 / (Al_{3.17} Fe^{3+}_{0.75} Si_{0.08})_4 Si_4 O_{22}$, и по классификации Б.Е. Лика (Leake, 2003) соответствует Ti-Cr хлорферрисаданагаиту. Возможно, указанная выше ассоциация минералов, богатых натрием

Таблица 1. Химический состав богатых хлором амфиболов из плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива. 1 – хлорферрисаданагаит включений в алюмохромите. 2–6 – интеркумуляусный хлорферропаргасит

Компоненты	№ анализов					
	1	2	3	4	5	6
	мас.%					
SiO ₂	25.25	33.99	35.23	35.04	37.33	35.12
TiO ₂	4.61	0.36	нпо	0.31	нпо	нпо
Cr ₂ O ₃	7.29	1.09	нпо	0.70	нпо	нпо
V ₂ O ₃	0.14	0.10	нпо	нпо	нпо	нпо
Al ₂ O ₃	16.65	16.64	16.73	15.53	15.45	14.56
Fe ₂ O ₃	23.44	2.13	6.64	1.74	6.73	5.42
FeO	-	17.43	14.59	18.04	13.43	24.84
MnO	0.36	0.20	0.20	0.15	0.12	нпо
ZnO	0.16	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
MgO	5.40	6.06	6.01	6.56	7.74	0.65
NiO	нпо	нпо	0.09	нпо	нпо	нпо
CaO	8.67	11.87	11.54	11.81	11.63	10.89
Na ₂ O	1.13	1.26	1.50	1.39	1.52	1.20
K ₂ O	1.55	2.27	1.80	1.78	2.06	2.25
SrO	нпо	1.47	нпо	1.87	нпо	нпо
BaO	нпо	0.28	0.18	0.22	нпо	0.14
Cl	4.29	5.87	5.55	5.62	5.38	6.28
Сумма – O = Cl ₂	97.97	99.70	98.81	99.49	100.18	99.93
	Число атомов в формуле					
Si	4.08	5.52	5.63	5.69	5.81	5.85
Ti	0.56	0.04	-	0.04	-	-
Cr	0.93	0.13	-	0.09	-	-
V	0.02	0.01	-	-	-	-
Al	3.17	3.19	3.15	2.97	2.84	2.86
Fe ³⁺	2.86	0.26	0.70	0.21	0.79	0.67
Fe ²⁺	-	2.37	1.95	2.41	1.75	3.46
Mn	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	-
Zn	0.02	-	-	-	-	-
Mg	1.31	1.47	1.43	1.57	1.79	0.16
Ni	-	-	0.01	-	-	-
Ca	1.50	2.07	1.98	2.05	1.94	1.94
Na	0.35	0.40	0.46	0.44	0.46	0.39
K	0.32	0.47	0.37	0.37	0.41	0.48
Sr	-	0.14	-	0.17	-	-
Ba	-	0.02	0.01	0.01	-	0.01
Cl	1.17	1.62	1.50	1.54	1.42	1.77
ОН	0.83	0.38	0.50	0.46	0.58	0.23
f	59.8	65.4	66.1	62.7	58.9	96.3

Примечания. Р, F, Y не обнаружены. нпо – ниже предела обнаружения. Количества FeO и Fe₂O₃ рассчитаны по стехиометрии.

и хлором, во включениях в раннемагматическим алюмохромите возникла на глубине при взаимодействии пикритового расплава с веществом эвапоритов. В дальнейшем этот глубинный амфибол мог служить одним из источников хлора для позднемагматических флогопита, амфиболов и апатита.

Интеркумуляусные минералы в плагиоперидотитах представлены ксеноморфными пойкилокристаллами бронзита, эндиопсида и плагиоклаза, с которыми ассоциируют титаномагнетит и ильменит. Ст эндиопсид и эндиопсид-авгит (*mg#* = 91-86) имеют размер до 25 мм в поперечнике, магнезиальный бронзит (*mg#* = 88-81) – до 11 мм в поперечнике. Незональный плагиоклаз – битовнит *An*₇₇₋₇₅ (средний состав *An*_{76,4}), размер его кристаллов редко превышает 3 мм. Отдельные кристаллы битовнита содержат до 0.1 мас.% Ва. Титаномагнетит испытал окислительный отжиг и представлен решетчатыми ильменит-магнетитовыми срастаниями. Ильменит содержит редкие пластинки распада гематита. Акцессорные минералы плагиоперидотитов – фтор-хлорапатит и хлорапатит с заметным содержанием лантанидов, Zn шпинель, бадделит, циркон, цирконолит, пирохлор, торит, торианит.

Плагиоклазовые лерцолиты содержат сульфидные микрогнезда, сложенные срастаниями троилита и бедного кобальтом пентландита с Ферритином, или кубанитом, или халькопиритом. Это продукты твердофазных превращений сульфидных твердых растворов *Mss* и реже *Iss*, которые кристаллизовались в плагиоперидотитах из рассеянных сульфидных расплавов малого объема. Микрогнезда сульфидов включают пластины флогопита и окружены оторочками из его пластин. Кроме того, флогопит слагает массу мелких метасоматических вростков в более ранних минералах плагиоперидотитов вокруг скоплений сульфидов. Флогопит содержит заметное количество хлора (Кислов, Бушляков, 1990; Кислов и др., 1997). По нашим данным, содержание хлора в данном флогопите составляет от 0.03 до 0.43 мас.% (в среднем 0.21% Cl, *n*=18), что близко к оценкам Е.В. Кислова. Содержание бария в этом флогопите до 0.3 мас.%. В участках пород с большим количеством минигнезд сульфидов относительно широко развиты богатые хлором железистые амфиболы. Они активно замещают интеркумуляусные пироксены, а иногда и кумулуусный оливин. Это – высокоглиноземистые хлор-калиевый ферропаргасит (ан. 2 и 6, табл. 1 и 2) и хлорферропаргасит (ан. 3, 4, 5, табл. 1 и 2). Эти амфиболы содержат

5.5–6.5 мас.% Cl, до 1.9% Sr, до 0.3% Ba. Размер скоплений хлорферропаргасита до 3 мм.

ПРОЦЕССЫ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО НИЗКОГРАДНОГО МЕТАМОРФИЗМА И ЕГО ПРОДУКТЫ

Интрузив и породы рамы затронуты эпигенетической тектонизацией и залегают практически вертикально – «поставлены на голову». По нашим наблюдениям, Йоко-Довыренский плутон и породы рамы захвачены многостадийным эпигенетическим низкоградным метаморфизмом погружения. Во время первой стадии метаморфизма в условиях цеолитовой фации возникли лизардитовые серпентиниты. Во время второй стадии в условиях пренит-пумпеллиитовой фации образовались антигоритовые и антигорит-хризотилитовые серпентиниты с магнетитом по

Таблица 2. Кристаллохимические формулы интеркумулусного хлорферропаргасита из плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива

Кристаллохимическая позиция	Компоненты	№ анализов				
		2	3	4	5	6
A 1	Na	0.40	0.46	0.44	0.46	0.39
	K	0.47	0.37	0.37	0.41	0.48
	Ba	0.02	0.01	0.01	-	0.01
	Сумма	0.89	0.84	0.82	0.87	0.88
B 2	Ca	2.07	1.98	2.05	1.94	1.94
	Sr	0.14	-	0.17	-	-
	Сумма	2.21	1.98	2.22	1.94	1.94
Y' 4	Mg	1.47	1.43	1.57	1.79	0.16
	Fe ²⁺	2.36	1.95	2.41	1.75	3.46
	Fe ³⁺	0.14	0.58	-	0.44	0.38
	Mn	0.03	0.03	0.02	0.02	-
	Zn	-	-	-	-	-
	Ni	-	0.01	-	-	-
	Сумма	4	4	4	4	4
Y'' 1	Al VI	0.70	0.78	0.66	0.65	0.71
	Fe ³⁺	0.12	0.22	0.21	0.35	0.29
	Ti	0.04	-	0.04	-	-
	Cr	0.13	-	0.09	-	-
	V	0.01	-	-	-	-
	Сумма	1	1	1	1	1
Z 8	Si	5.52	5.63	5.69	5.81	5.85
	Al IV	2.48	2.37	2.31	2.19	2.15
	Сумма	8	8	8	8	8
(Cl, OH) 2	Cl	1.62	1.50	1.54	1.42	1.77
	OH	0.38	0.50	0.46	0.58	0.23
	Сумма	2	2	2	2	2

перидотитам, апобазитовые родингиты, апоскарновые бруситы, альбит-клиноцоизитовые, пренит-клиноцоизитовые, пектолитовые породы по троктолитам и анортозитам. Во время третьей стадии метаморфизма в условиях цеолитовой фации были образованы лизардитовые серпентиниты, наложенные на антигоритовые и хризотилитовые (Спиридонов и др., 2017а, 2017б). Фации метаморфизма определены по аналогии с данными в работах (Миясиро, 1976; Спиридонов и др., 2000; Philpotts, Ague, 2009). Изохронный Sm/Nd возраст оливиновых габбро Йоко-Довыренского интрузива, затронутых процессами серпентинизации, – 673 ± 22 млн лет (Amelin et al., 1996), что на 55 млн. лет моложе возраста протолита. По нашим данным, эта датировка фиксирует возраст низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, в процессе которого произошло перераспределение лантанидов. Носитель лантанидов магматических пород Йоко-Довыренского интрузива – фтор-хлорапатит – был замещен гидроксиллапатитом без REE, и возникли метаморфогенные минералы REE – монацит, ортит (алланит) и редкоземельный клиноцоизит-эпидот (Спиридонов, 2017).

В этих процессах на отдельных участках, прежде всего в зонах дробления, заметно изменился состав интрузивных пород. Наблюдается массовое развитие низкотемпературных минералов – серпентинитов, хлоритов, клиноцоизита-эпидота, актинолита, альбита, пренита, гидрогранатов (гидрогроссуляр и иные), магнетита, хроммагнетита, брусита, талька, карбонатов, корренсита, пектолита, тоберморита, кварца, пирита, гидроксиллапатита. Метаморфизованные медно-никелевые руды содержат обильные пирит и бравоит, а также тиошпинели Fe-Ni-Co и миллерит, шендит и паркерит, заместившие троилит, пирротин и пентландит, борнит и халькозин, заместившие кубанит и халькопирит, арсениды Fe-Ni-Co (Качаровская, 1986; Орсов, 2008; наши наблюдения). Продукты и процессы низкоградного метаморфизма оруденелых пород Йоко-Довыренского интрузива весьма похожи на таковые в норильских рудах (Спиридонов, Гриценко, 2009; Spiridonov et al., 2016).

ПЛАГИОПЕРИДОТИТЫ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА, МЕТАМОРФИЗОВАННЫЕ В УСЛОВИЯХ ПРЕНИТ-ПУМПЕЛЛИИТОВОЙ ФАЦИИ

В слабометаморфизованных плагиоперидотитах кристаллы, затронутые тектонизацией, заме-

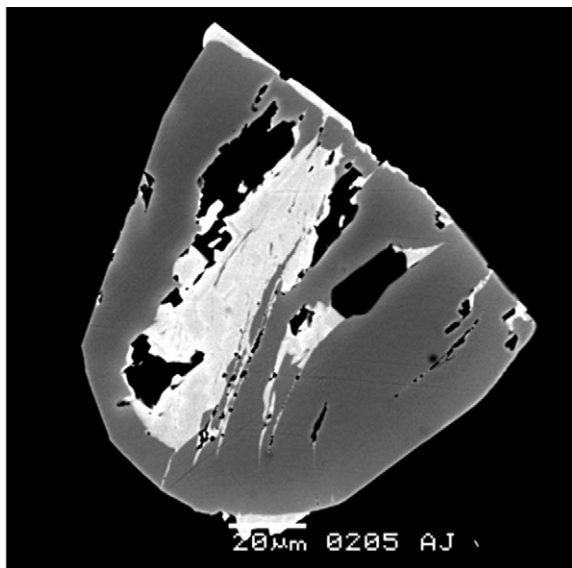


Рис. 1. Брежированный алюмохромит (серое) частью растворен, частью замещен метаморфогенным хроммагнетитом (белое) из метаморфизованных плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива. Изображение в отраженных электронах.

щаются: оливин – серпентином (лизардит, чаще антигорит с микропрожилками хризотила), алюмохромит – феррихромитом и хроммагнетитом (рис. 1). По плагиоклазу (битовнит) с включениями титаномagnetита и ильменита развиваются железо- и марганецсодержащие гидрогранаты

(рис. 2а,б, 3а). Состав гидрогранатов колеблется от гидрогроссуляра (81–85% гроссулярового минала, ан. 8–9, табл. 3) до спессартин-альмандин-гроссуляра (43–45% гроссулярового минала, ан. 10–11). Интеркумулусные бронзит и эндиопсид и часть хлорферропаргасита замещены агрегатами диопсида (ан. 12, табл. 3) и тремолита (ан. 13–14) ± хлорит, антигорит (рис. 2а,б, 3а,б). Наименее устойчивыми при процессах низкоградного метаморфизма оказались флогопит и хлорсодержащие амфиболы, замещаемые хлоритом – рипидолитом (ан. 7, табл. 3; рис. 3в, г). Таким образом, минералы-носители бария – флогопит и плагиоклаз; хлора – хлорферрисаданагаит из включений в алюмохромите, флогопит, хлоркалиевый ферропаргасит и хлорapatит из оторочек сульфидных гнезд в процессах низкоградного метаморфизма были замещены минералами, в составе которых содержания Ва и Сl крайне малы.

Парагенез гидрограната, диопсида, хлорита и тремолита типичен для родингитов пренит-пумпеллиитовой фации (Миясиро, 1976; Спиридонов и др., 2000). В метаморфизованных плагиоперидотитах Йоко-Довыренского интрузива развиты микрогнезда родингитового состава (рис. 2 и 3), в которых и концентрируются минералы бария. Родингиты формируются при относительно повышенной щелочности метаморфизующих флюидов, чем,

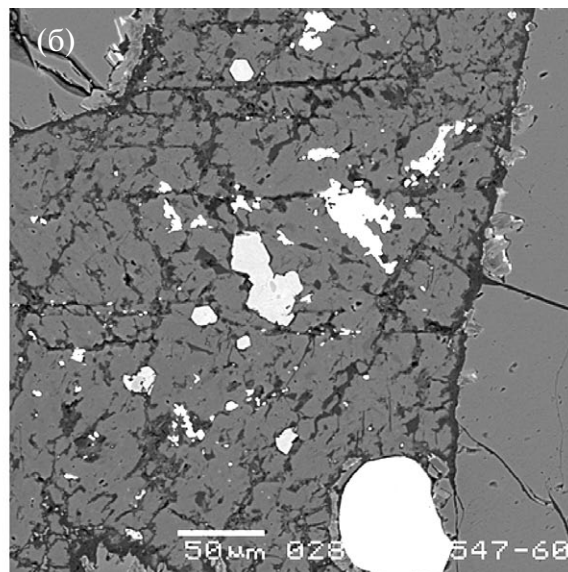
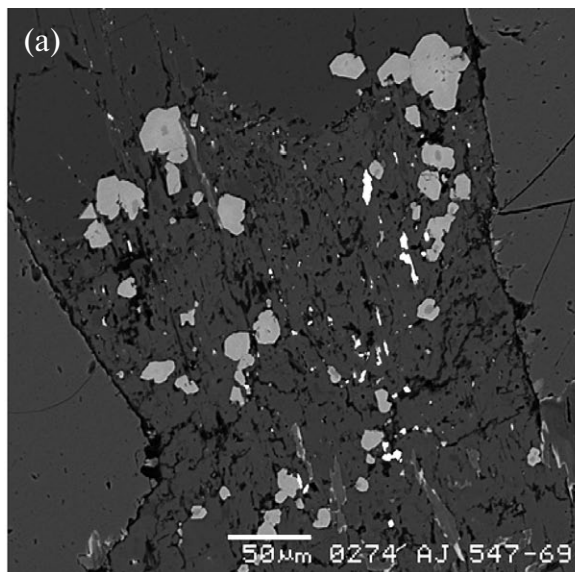


Рис. 2. Барит в метаморфизованных плагиоперидотитах: (а) – включения кристаллов ксеноморфного барита (белое) среди агрегатов метаморфогенных гидрограната (светло-серое, ан. 8, табл. 3), тремолита и диопсида (неровные темно-серое), заместивших интеркумулятивные бронзит, эндиопсид и битовнит; слева и справа – кристаллы кумулюсного оливина (ровное серое); (б) – выделения барита неправильной формы (белое) среди агрегатов метаморфогенных гидрограната (светло-серое, ан. 11, табл. 3), тремолита (ан. 13, табл. 3) и диопсида (ан. 12, табл. 3) (неровное темно-серое), заместивших пироксены и битовнит в промежутке между кристаллами кумулюсного оливина (ровное серое слева и справа). Внизу – округлый кристалл алюмохромита (ярко белое). Изображения в отраженных электронах.

Таблица 3. Химический состав хлорита (7), гидрограната (8-11), диопсида (12), тремолита (13-14) из плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации

Компоненты	№ анализов							
	7	8	9	10	11	12	13	14
мас. %								
SiO ₂	27.82	38.17	38.49	38.12	38.17	54.50	54.88	57.478
TiO ₂	нпо	нпо	0.07	нпо	нпо	нпо	0.08	нпо
Cr ₂ O ₃	0.07	нпо	нпо	нпо	нпо	0.14	0.09	нпо
V ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Al ₂ O ₃	23.57	21.73	21.34	22.07	22.06	0.32	3.78	0.65
Fe ₂ O ₃	-	0.91	1.40	-	-	0.39	-	0.88
FeO	5.98	1.63	3.48	14.91	15.73	1.40	2.55	1.86
MnO	0.10	3.50	3.23	6.87	6.96	0.09	нпо	0.14
MgO	30.01	0.17	0.25	2.00	2.13	17.98	22.09	23.05
NiO	0.21	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
CaO	нпо	32.42	30.90	16.21	15.23	24.94	13.13	13.04
Na ₂ O	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.07	0.50	нпо
K ₂ O	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.04	нпо
SrO	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.82	нпо	0.83
Y ₂ O ₃	нпо	нпо	0.30	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Cl	0.11	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.08
сумма – O = Cl ₂	87.85	98.53	99.46	100.18	100.34	100.65	97.14	97.98
Формульные единицы								
Si	2.67	2.91	2.94	2.95	2.95	1.98	7.55	7.91
Ti	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Cr	0.01	-	-	-	-	-	0.01	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	2.67	1.95	1.92	2.01	2.01	0.01	0.61	0.11
Fe ³⁺	-	0.05	0.08	-	-	-	-	0.09
Fe ²⁺	0.48	0.10	0.22	0.96	1.02	0.05	0.29	0.21
Mn	0.01	0.23	0.21	0.45	0.46	-	-	0.02
Mg	4.15	0.02	0.03	0.23	0.24	0.97	4.53	4.66
Ni	0.02	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	2.65	2.53	1.34	1.27	0.97	1.93	1.92
Na	-	-	-	-	-	-	0.13	-
K	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Sr	-	-	-	-	-	0.02	-	0.07
Y	-	-	0.01	-	-	-	-	-
Cl	0.02	-	-	-	-	-	-	0.02
ОН	7.98	0.09	0.06	0.05	0.05	-	2.00	1.98

Примечания. F, P, Zn, Ba не обнаружены; нпо – ниже предела обнаружения. Количества FeO и Fe₂O₃ рассчитаны по балансу зарядов.

вероятно, обусловлено относительно широкое распространение барита, его преобладание среди метаморфогенных минералов бария.

В участках развития бариевых минералов плагиоперидотиты содержат 348–518 г/т бария и 4–6 г/т стронция, что свидетельствует об их мобилизации. В процессах низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации наблюдается перераспределение Ва и вынос Sr. Сходная картина поведения стронция в процессах низкоградного метаморфизма установлена в работе (Путинцева и др., 2016) для метакимберлитов цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций.

МИНЕРАЛЫ БАРИЯ В НИЗКОГРАДНО МЕТАМОРФИЗОВАННЫХ ПЛАГИОПЕРИДОТИТАХ ЙОКО-ДОВЫРЕНСКОГО ИНТРУЗИВА

Минералы бария – бесстронциевый барит и Ва-Fe-Cl слюда (хлордоминантный феррокиношталит) ассоциируют с минералами родингитовой ассоциации – гидрогранатами, тремолитом, диопсидом, хлоритами, антигоритом.

Барит в мелких до 30 мкм неправильной формы выделениях довольно широко распространен в метаморфизованных плагиоперидотитах, где наблюдается в агрегатах диопсида, тремолита, гидрогранатов, хлорита (рис. 2а, б). Поразительная особенность данного барита – полное отсутствие в его составе стронция. Поэтому на фотографиях в режиме отраженных электронов нет намека на зональное строение его выделений.

Феррокиношталит развит в тех участках сульфидоносных плагиоперидотитов, где весь флогопит замещен хлоритом – рипидолитом, часть оливина замещена серпентинами, алюмохромит – хроммагнетитом, битовнит – гидросульфидом. Размер ксеноморфных кристаллов феррокиношталита до 20 мкм, их скоплений – до 70 мкм (рис. 3а-г). Как правило, феррокиношталит замещает флогопит (рис. 3в,г), изредка – плагиоклаз. Центральные части зональных кристаллов феррокиношталита менее железисты и обеднены барием (ан. 15, 17, табл. 4), внешних зон – более железисты и обогащены Ва и Cl (ан. 18, 20). Состав обособленных выделений феррокиношталита в одних случаях (рис. 3а) близок к составу центральных зон зональных кристаллов (ан. 16), в других (рис. 3б) – более железистый, близок

Таблица 4. Химический состав хлордоминантного феррокиношталита из плагиоперидотитов Йоко-Довыренского интрузива, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации

Компо- ненты	№ анализа					
	15	16	17	18	19	20
	мас. %					
SiO ₂	23.26	22.98	21.24	21.42	21.01	20.76
Cr ₂ O ₃	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.17
Al ₂ O ₃	15.78	16.14	16.24	15.95	15.58	15.41
Fe ₂ O ₃	0.55	-	-	-	-	0.51
FeO	27.08	27.25	28.15	29.13	30.48	30.57
MnO	нпо	0.15	0.12	0.10	0.13	0.15
MgO	4.93	4.00	3.53	2.95	2.07	1.83
CaO	нпо	1.03	0.36	0.30	нпо	нпо
Na ₂ O	нпо	0.16	0.18	0.17	нпо	нпо
K ₂ O	2.28	1.93	0.83	1.35	1.16	1.19
BaO	18.24	18.11	19.39	19.89	20.99	20.48
Cl	9.27	9.43	9.57	10.07	10.58	10.63
S	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.12
сумма – O=Cl ₂	99.30	99.05	97.45	99.06	99.62	99.25
	Число атомов в формуле					
Si	2.25	2.27	2.15	2.17	2.16	2.14
Al ^{IV}	1.75	1.73	1.85	1.83	1.84	1.86
Сумма	4	4	4	4	4	4
Fe ²⁺	2.20	2.25	2.38	2.46	2.62	2.63
Fe ³⁺	0.04	-	-	-	-	0.04
Mg	0.71	0.59	0.53	0.45	0.32	0.28
Mn	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ^{VI}	0.05	0.15	0.08	0.08	0.05	0.02
Cr	-	-	-	-	-	0.01
Сумма	3	3	3	3	3	3
Ba	0.69	0.70	0.77	0.79	0.85	0.83
K	0.28	0.24	0.11	0.17	0.15	0.16
Na	-	0.03	0.04	0.04	-	-
Ca	-	0.11	0.04	0.03	-	-
Сумма	0.97	1.08	0.96	1.03	1.00	0.99
Cl	1.52	1.58	1.64	1.73	1.84	1.86
OH	0.48	0.11	0.36	0.17	0.10	0.12
O	-	0.31	-	0.10	0.06	-
S	-	-	-	-	-	0.02
Сумма	2	2	2	2	2	2
f	75.8	79.4	81.8	84.7	89.3	90.5

Примечания. F, Ti, V не обнаружены; нпо – ниже предела обнаружения. Количество FeO и Fe₂O₃ рассчитаны по балансу зарядов.

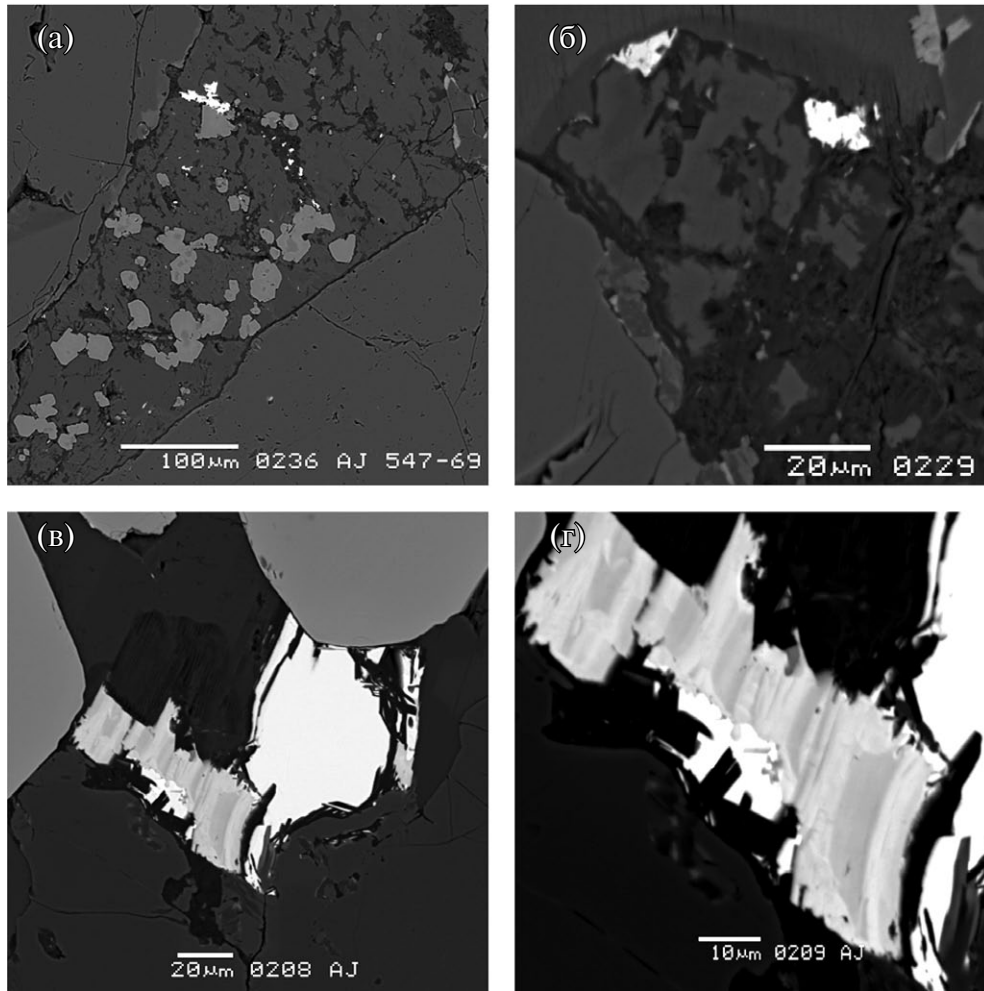


Рис. 3. Феррокиношитацит в метаморфизованных плагиоперидотитах Йоко-Довыренского интрузива: (а) – выделения неправильной формы феррокиношитацита (белое) (ан. 16, табл. 4) в агрегатах метаморфогенных гидрограната (светло-серое, ан. 9-10, табл. 3), тремолита (ан. 14, табл. 3) и диопсида (неровное темно-серое) и антигорита (черно-серое) по пироксенам и битовниту в промежутке между кристаллами кумулюсного оливина (ровное серое слева и справа); (б) – неправильной формы выделения феррокиношитацита (белое) (ан. 19, табл. 4) в агрегате хлорита (ан. 7, табл. 3) и антигорита (темно-серое), замещающих пироксены (сверху) и битовнит (в центре снимка) у контакта с оливином (ровное серое слева); (в) – полиминеральная псевдоморфоза по флогопиту у гнезда сульфидов (белое) рядом с кристаллами алюмохромита (светло-серое). Флогопит замещен хлоритом различного состава, антигоритом (черно-серое и темно-серое) и феррокиношитацитом («гармошка» от светло-серого до белесого цвета); (г) – деталь рис. 3в. «Гармошка» из зональных кристаллов феррокиношитацита, внутренние серые зоны обеднены барием и хлором (ан. 15, 17, табл. 4), внешние зоны обогащены барием и хлором (ан. 18, 20, табл. 4). Справа и ниже «гармошки» феррокиношитацита – сростания троилита, пирротина и пентландита (белое). Изображения в отраженных электронах.

к составу внешних зон зональных кристаллов (ан. 19). Минерал содержит до 21 мас.% BaO, 31% FeO, 11% Cl; его железистость варьирует от 75.8 до 90.5%. Характерны стандартные изоморфные замещения Ba – K и Fe – Mg (табл. 4). Содержание бариевого минала варьирует от 69 до 85%. Описанная Ba – Fe – Cl слюда – хлордоминантный феррокиношитацит, состав наиболее богатого хлором индивида отвечает $(\text{Ba}_{0.83}\text{K}_{0.16})_{0.99}(\text{Fe}^{2+}_{2.63}\text{Mg}_{0.28}\text{Fe}^{3+}_{0.04}\text{Al}_{0.02}\text{Cr}_{0.01}\text{Mn}_{0.01})_3$ $[(\text{Cl}_{1.86}\text{OH}_{0.12}\text{S}_{0.02})_2/\text{Al}_{1.86}\text{Si}_{2.14}\text{O}_{10}]$.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установлено, что в плагиоперидотитах Йоко-Довыренского интрузива, захваченных низкоградным метаморфизмом в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, наблюдается перераспределение Ba и Cl, вынос Sr. Минералы-носители бария и хлора – флогопит, плагиоклаз, хлорферропаргасит, хлорферрисаданагаит, хлоркалийевый ферропаргасит, хлорапатит в процессах метаморфизма были за-

мещены хлоритами, тремолитом, диопсидом, гидрогранатами, антигоритом, в составе которых Ва и С1 крайне мало. Метаморфогенные минералы бария – бесстронциевый барит и Ва-Fe-S1 слюда – хлордоминантный феррокиношиталит ассоциируют с минералами родингитового парагенеза – гидрогранатами, диопсидом, тремолитом, антигоритом. Поскольку Йоко-Довыренский феррокиношиталит по составу хлордоминантный, это – новый минеральный вид.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 16-17-10129), с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анкинович С.Г., Анкинович Е.А., Рождественская И.В. (1972) Черныхит – новая бариево-ванадиевая слюда из СЗ Каратау. *Зап. ВМО* **100**(5), 76–83.
- Анкинович Е.А., Бекенова Г.К., Компанейцев В.П., Котельников П.Е., Савостин Б.А. (1997) Ванадиевые и ванадийсодержащие слюды из углеродисто-кремнистой формации кембрия хребта Большой Каратау (Южный Казахстан). 1. Черныхиты. Роскоэлиты. *Геология Казахстана* (4), 84–93.
- Арискин А. А., Конников Э. Г., Данюшевский Л.В., Кислов Е.В., Николаев Г.С., Орсов Д.А., Бармина Г.С., Бычков К.А. (2009) Довыренский интрузивный комплекс: проблемы петрологии и сульфидно-никелевой минерализации. *Геохимия* (5), 451–480.
- Ariskin A.A., Konnikov E.G., Danyushevsky L.V., Kislov E.V., Nikolaev G.S., Orsoev D.A., Barmina G.S., Vychkov K.A. (2009) The Dovyren Intrusive Complex: Problems of Petrology and Ni Sulfide Mineralization. *Geochem. Int.* **47**(5), 425–453.
- Качаровская Л.Н. (1986) Сульфидные медно-никелевые руды Йоко-Довыренского расслоенного плутона (состав и условия образования). *Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук.* Улан-Удэ: ГИ СО АН СССР, 1–24.
- Кислов Е.В., Бушляков И.Н. (1990) Галогены во флогопите и апатите Йоко-Довыренского массива. *Геология и геофизика* (6), 68–72.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г., Орсов Д.А. (1997) Роль хлора в формировании малосульфидного платинометалльного оруденения Йоко-Довыренского расслоенного массива. *Геохимия* (5), 521–528.
- Kislov E.V., Konnikov E.G., Orsoev D.A., Pushkarev E.V., Voronina L.K. (1997) Chlorine in the Genesis of the Low-Sulfide PGE Mineralization in the Ioko-Dovyrenskii Layered Massif. *Geochem. Int.* **35**(5), 455–461.
- Кислов Е.В., Конников Э.Г., Посохов В.Ф., Шалагин В.Л. (1989) Изотопные свидетельства коровой контаминации в Йоко-Довыренском массиве. *Геология и геофизика* (9), 140–144.
- Конников Э.Г., Кислов Е.В., Орсов Д.А. (1994) Йоко-Довыренский расслоенный плутон и связанное с ним оруденение (Северное Прибайкалье). *Геология рудных месторождений* **36**, 545–553.
- Миясиро А. (1976) *Метаморфизм и метаморфические пояса*. М.: Мир, 536 с. {Miyashiro A. *Metamorphism and Metamorphic Belts*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1973. 492 p.}
- Орсов Д.А. (2008) Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый массив и его платиноносность. *Благороднометалльная минерализация в расслоенных ультрабазит-базитовых массивах юга Сибирской платформы*. Новосибирск: Параллель, 89–194.
- Путинцева Е.В., Соколова Е.Л., Спиридонов Э.М. (2016) Сравнительная характеристика метакимберлитов цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций. *Международ. конф., посвящ. 300-летию Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана*, 153–155.
- Спиридонов Э.М. (2017) Низкоградный метаморфизм – рудоподготовительный, рудогенерирующий, рудопреобразующий процесс. *Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое*. СПб.: ИГГД, 166–168.
- Спиридонов Э.М., Гриценко Ю.Д. (2009) Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. М.: Научный мир, 218 с.
- Спиридонов Э.М., Ладыгин В.М., Симонов О.Н., Анастасенко Г.Ф., Кулагов Э.А., Люлько В.А., Серeda Е.В., Степанов В.К. (2000) Метаулканиты пренит-пумпеллиитовой и цеолитовой фаций трапповой формации Норильского района Сибирской платформы. М.: Издательство Московского университета, 212 с.
- Ярошевский А.А., Болиховская С.В., Коптев-Дворников Е.В. (2006) Геохимическая структура Йоко-Довыренского расслоенного дунит-троктолит-габбро-норитового интрузива, Северное Прибайкалье. *Геохимия* (10), 1027–1039.
- Yaroshvskii A.A., Bolikhovskaya S.V., Koptev-Dvornikov E.V. (2006) Geochemical Structure of the Yoko-Dovyren Layered Dunite-Troctolite-Gabbro-Norite Massif, Northern Baikal Area. *Geochem. Int.* **44**(10), 953–964.
- Amelin Yu.V., Neymark L.A., Rytsk E.Yu., Nemchin A.L. (1996) Enriched Nd-Sr-Pb isotopic signatures in the Dovyren layered intrusion (eastern Siberia, Russia): evidence for source contamination by ancient upper-crust material. *Chem. Geol.* **129**, 39–69.
- Ariskin A., Danyushevsky L., Nikolaev G., Kislov E., Fiorentini M., McNeil A., Kostitsyn Y., Goemann K., Malyshev A. (2018) The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): Insights into dynamics of an open magma chamber with implication for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos* **302-303**, 242–262.
- Brügger J., Giere R. (2000) Origin and distribution of some trace elements in metamorphosed Fe-Mn deposits, Val Ferrera, Eastern Swiss Alps. *Can. Mineral.* **38**, 1075–1101.

- Dunn P.J. (1995) Franclin and Sterling Hill, New Jersey: the world most magnificent mineral deposits. Franklin: Franklin-Ogdensburg Mineral. Soc., 755 p.
- Fortey N.J., Beddoe-Stephens B. (1982) Barium silicates in stratabound Ba-Zn mineralization in the Scottish Dalradian. *Mineral. Mag.* **46**, 63–72.
- Gnos E., Armbruster T. (2000) Kinoshitalite, $Ba(Mg)_3(Al_2Si_2)O_{10}(OH, F)_2$, a brittle mica from a manganese deposit in Oman: paragenesis and crystal chemistry. *Am. Mineral.* **85**, 242–250.
- Graeser S.G., Hetherington C.J., Gieré R. (2003) Ganterite, a new barium-dominant analogue of muscovite from the Berisal Complex. Simplon region, Switzerland. *Can. Mineral.* **41**, 1271–1280.
- Guggenheim S., Frimmel H.E. (1999) Ferrokinochitalite, a new species of brittle mica from the Broken Hill mine, South Africa: structural and mineralogical characterization. *Can. Mineral.* **37**, 1445–1452.
- Harlow G.E. (1995) Crystal chemistry of barium enrichment in micas from metasomatized inclusions in serpentinite, Motagua fault zone, Guatemala. *Eur. J. Mineral.* **7**, 775–789.
- Leake B.E., Woolley A.R., Birch W.D., Burke E.A.J., Ferraris G., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Schumacher J.C., Stephenson N.C.N., Whittaker E.J.W. (2003) Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's 1997 recommendation. *Can. Mineral.* **41**(6), 1355–1362, doi:10.2113/gscanmin.41.6.1355.
- Pattiaratchi D.B., Saadi E., Sahama T.G. (1967) Anandite, a new barium iron silicate from Wilagedera, North Western Province, Ceylon. *Mineral. Mag.* **36**, 1–4.
- Philpotts A.R., Ague J.J. (2009) Principles of igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press, 667 p.
- Segnit E.R. (1946) Barium feldspars from Broken Hill, New South Wales. *Mineral. Mag.* **27**, 166–174.
- Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I. M., Korotaeva N.N., Zhukov N.N. (2016) Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt Mineralization in the Noril'sk sulfide ore deposit, Siberia. *Can. Mineral.* **54**, 429–462. doi 10.3749/canmin.1500028.
- Tracy R.J. (1991) Ba-rich micas from the Franclin Marble, Lime Crest and Sterling Hill, New Jersey. *Am. Mineral.* **76**, 1683–1693.

BARIUM MINERALS – BARITE AND CHLORINEDOMINANT FERROKINOSHITALITE $BaFe^{2+}_3[Cl_2/Al_2Si_2O_{10}]$ IN PLAGIOPERIDOTITES YOKO-DOVYREN INTRUSION (NORTHERN BAIKAL REGION) – PRODUCTS OF EPIGENETIC LOW GRAD METAMORPHISM

© 2019 E. M. Spiridonov^a

^aLomonosov Moscow State University
Geological Faculty
Russia, 119234 Moscow, Leninskie Gory, 1
e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Received: 30.03.2018

Received version received: 25.04.18

Accepted: 11.01.2019

In the plagioperidotite of the ultramafite-mafic Yoko-Dovyren intrusion captured by low-grad metamorphism (NGM) under conditions of the prenite-pumpellite facies (PPF), mobilization of Ba, Cl and Sr is observed. The content of barium in plagioperidotite ranges from 36 to 313 (an average of 130 g/t); strontium – from 25 to 169 (an average of 86 g/t); Ba/Sr value varies from 0.5 to 4 (on average 1.5). Barium minerals – phlogopite and plagioclase; chlorine – chloroferrisadanagite from inclusions in aluminochromite, late-magmatic phlogopite, potassium chlorate ferropargasite and chlorapatite in the margins of sulphide nests. During the NGM processes, these minerals were replaced by chlorites, tremolite, diopside, which included very little Ba and Cl. In the areas of barium minerals development, plagioperidotites contain 348–518 g/t of barium and 4–6 g/t of strontium, which indicates the redistribution of Ba and the removal of Sr. Metamorphogenic barium minerals – non-strontium barite and Ba-Fe-Cl mica – chloro-dominant ferrokinochitalit. They coexist with the minerals of the rodingite association – hydrogarnet, tremolite, diopside, chlorite, antigorite, magnetite, hydroxylapatite. Ferrokinochitalit replaces phlogopite, plagioclase, sulfides, contains up to 21 wt. % BaO, 31% FeO, 11% Cl and has a iron index of $f = 75.8–90.5$. The composition of the most chlorine-rich individual responds $(Ba_{0.83}K_{0.16}Ca_{0.99})(Fe^{2+}_{2.63}Mg_{0.28}Fe^{3+}_{0.04}Al_{0.02}Cr_{0.01}Mn_{0.01})[(Cl_{1.86}OH_{0.12}S_{0.02})_2/Al_{1.86}Si_{2.14}O_{10}]$. Since Yoko-Dovyrenkiy ferrokinochitalit is chloro-dominant, this is a new mineral species.

Keywords: chloroferrisadanagite, chloropotassium ferropargasite, low-grad metamorphism, serpentine, antigorite, chlorite, ripidolite, barite, chlorine-dominant ferrokinochitalite, hydrogrossular

(For citation): Spiridonov E.M. Barium Minerals — Barite and Chlorinedominant Ferrokinochitalite $BaFe^{2+}_3[Cl_2/Al_2Si_2O_{10}]$ in Plagioperidotites Yoko-Dovyren Intrusion (Northern Baikal Region) — Products of Epigenetic Low Grad Metamorphism. *Geokhimiya*. 2019;64(11):1196–1205. DOI: 10.31857/S0016-752564111196-1205)