

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

УДК 549.0

© В. С. АПЛОНОВ,* д. чл. А. А. ЗОЛОТАРЁВ**

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ШПИНЕЛИ ТАЛНАХСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД (СЕВЕРО-ЗАПАД СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ)

* Всероссийский научно-исследовательский институт геологии
и минералогии ресурсов Мирового океана, ВНИИОкеангеология,
190121, Санкт-Петербург, Английский пр., д. 1

** Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; e-mail: zolotarev_aa@rambler.ru

В работе обобщены результаты изучения представительной коллекции химических анализов минералов группы шпинели из различных горных пород Талнахского месторождения (240 микронзондовых анализов). Используются также данные по составу минералов этой группы в составе горных пород Зубовского (4 анализа) и Норильск-1 (53 анализа) месторождений. Минералы группы шпинели в интрузивных горных породах и породах метаморфического ореола Талнахского месторождения относятся к пяти минеральным видам: магнетит, хромит, магнезиохромит, шпинель и герцинит. В составе горных пород Талнахского месторождения могут присутствовать также магнезиоферрит, титаномаггемит и маггемит. Некоторые химические анализы в учтенной нами выборке можно пересчитать на кристаллохимические формулы этих минеральных видов. В интрузивных породах Норильск-1 и Зубовского месторождений идентифицирована ульвошпинель. Несмотря на многообразие минералов группы шпинели, вариации их состава описываются тремя схемами изоморфизма: $Mg \leftrightarrow Fe^{2+}$; $Al \leftrightarrow Fe^{3+} \leftrightarrow Cr$; $Fe^{3+VI} + Fe^{3+IV} \leftrightarrow Ti^{4+VI} + Fe^{2+IV}$. Роль других элементов — Si, Ni, Co, Mn, Ca, Na, K, Zn, V — в составе минералов группы шпинели незначительна.

Ключевые слова: Талнахское месторождение, химический состав, группа шпинели.

V. S. APLONOV,* A. A. ZOLOTAREV.** PECULIARITIES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF SPINEL GROUP MINERALS IN THE TALNAKH COPPER-NICKEL ORE DEPOSIT (NORTH-WEST OF THE SIBERIAN PLATFORM)

* VNIIOkeangeologia, Saint Petersburg, Russia

** Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

There are generalized data of the representative collection of chemical analyses of spinel group minerals from various rocks of the Talnakh deposit (in total — 240 microprobe analyses). Data on composition of spinelids from rocks of Zubovskoe (4 analyses) and Norilsk-1 (53 analyses) deposits have been used also. Spinel group minerals in igneous rocks and the metamorphic halo of the Talnakh deposit belong to five mineral species: magnetite, chromite, magnesiochromite, spinel and hercynite.

Magnesioferrite, maghemite and titanomaghemite may be present in the ore field rocks also: some chemical analyses in the studied collection might be recalculated in chemical formulas of these mineral species. Ulvöspinel was identified in rocks of Norilsk-I and Zubovskoe deposits. Despite the diversity of spinel group minerals, variations of their compositions are described by only three schemes of isomorphism: $Mg \leftrightarrow Fe^{2+}$; $Al \leftrightarrow Fe^{3+} \leftrightarrow Cr$; $Fe^{3+VI} + Fe^{3+IV} \leftrightarrow Ti^{4+VI} + Fe^{2+IV}$. The role of other elements — Si, Ni, Co, Mn, Ca, Na, K, Zn, V — is insignificant.

Key words: Talnakh deposit, chemical composition, spinel group.

Талнахское месторождение расположено в зоне пересечения Норильско-Хараелахским рудоконтролирующим глубинным разломом центриклинальных частей Норильской (на юге) и Хараелахской (на севере) мульд. К первой из них приурочено Норильское, а ко второй — Талнахское месторождение медно-никелевых руд. Геолого-структурная позиция этих месторождений отражена в многочисленных статьях и монографиях (Додин, Батуев, 1971; Иванов и др., 1971; Золотухин и др., 1975; Наторхин и др., 1977; Дюжиков и др., 1988, и др.).

Авторами данной статьи был создан и проанализирован банк данных химических анализов породообразующих минералов норильских и талнахских интрузий, парагенетически связанных с медно-никелевыми рудами. Были показаны возможности использования типохимических особенностей амфиболов, пироксенов, слюд, полевых шпатов и оливина; установлено видовое разнообразие минералов этих групп в соответствии с современными номенклатурными правилами (Аплонов, Золотарёв, 2005, 2008; Золотарёв, Аплонов, 2006, 2010, 2014).

Сведения о химическом составе минералов группы шпинели Талнахского месторождения в литературе носят отрывочный и несистематизированный характер. По данным В. В. Золотухина с соавторами (1975), в горных породах и рудах Верхнеталнахской интрузии (ВТИ) присутствуют магнетит, хромшпинель, титаномagnetит. И. А. Натрохин с соавторами (1977) приводит сведения о наличии в породах ВТИ магнетита, титаномagnetита и хромшпинелидов. М. П. Гора (2003) отмечает присутствие в ВТИ хромшпинелидов с широким разнообразием составов — от хромпикотита до хромистого титаномagnetита, что, по мнению этого автора, свидетельствует об огромном разбросе температур их кристаллизации «от магматических до гидротермальных». Кроме приведенных выше в литературе, посвященной Талнахскому месторождению, можно встретить также и другие названия минералов группы шпинели: магномagnetит, хромagnetит, магнезиоалюмохромит, магнезиохромит, пикотит, хромпикотит, шпинель, плеонаст, хромплеонаст, хромгерцинит, герцинит, ультвошпинель. Широкое использование синонимов, излишних и устаревших названий создает ложное представление о большом видовом разнообразии минералов группы шпинели в породах Талнахского месторождения.

Настоящая работа посвящена систематизации особенностей химического состава минералов группы шпинели, присутствующих в различных горных породах Талнахского месторождения. Учтено 240 микронзондовых химических анализов, использованы также данные по составу минералов этой группы в горных породах Zubovskogo (4 анализа) и Норильск-I (53 анализа) месторождений (Юдина, 1970; Золотухин и др., 1975; Кавардин, 1976; Рябов, Золотухин, 1977; Генкин и др., 1979; Куделина и др., 1983; Рябов и др., 2000, и др.).

Результаты микронзондовых анализов минералов группы шпинели (все-го 297) пересчитывались на формулы по единой методике. Двадцать химических анализов, результаты пересчета которых на кристаллохимические фор-

**Химический состав минералов группы шпинели (мас. %) Талнахского,
Норильск-I и Zubovskoe месторождений**

**Chemical composition of spinel group minerals (wt %) in Talnakh,
Norilsk-I and Zubovskoe deposit**

Номер образца	Компонент										Сумма
	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	V ₂ O ₅	
Магнетит											
КЗ-1672/1910-17	3.94	12.33	20.52		55.39		0.45	4.92			97.55
КЗ-184/189-3			0.16		95.26		0.24	0.25			95.91
КЗ-1441/1287.5-2	8.69	4.78	23.18		57.79		0.25	3.33			98.02
Хромит											
Т-17-18	9.70	5.40	33.7	12.2	35.5			3.20			99.70
КЗ-184/189-2	1.05	23.38	26.79		26.95		0.13	9.65			97.95
ЮВС-12-2	1.57	18.90	32.90	13.95	24.34	0.01	0.41	7.32	0.12		99.52
Магнезиохромит											
ЮВС-60/3а-1	0.97	1.72	68.56	2.39	5.66		0.85	16.76	0.26		97.35*
ЮВС-59-17	2.52	24.35	44.46		2.17	0.01	0.19	24.27	0.02		97.99
Т-8	1.90	19.70	32.60	16.70	18.40			12.20			101.50
Шпинель											
КЗ-1672/1910-24	0.93	60.56	0.31		22.10		0.14	16.54			100.58
КЗ-585/859.4-3	2.08	45.97	0.05	27.61			0.08	25.49	0.08		101.36
ЮВС-59-28	1.53	29.26	42.59		0.74	0.01	0.21	24.63	0.05		99.02
Герцинит											
948-3	0.14	58.80	0.20	3.30	30.80			7.10			100.34
КЗ-1615/1555-1	1.54	26.72	29.95		33.68		0.25	9.49			101.63
Ульвошпинель											
ПЕ-35/533-3	19.36	2.29	0.16		73.04	0.01	0.55	0.27		1.01	96.69
ПЕ-35/718-2	32.55	0.73	0.08		62.83		1.05	0.21		0.72	98.17
АС-28/355.5	29.27	1.61	1.10		43.39	0.12	0.32	15.48		0.69	91.98
Магнезиоферрит											
КЗ-585/859.4	2.76	4.43	0.30		76.12		0.51	12.63	0.12		96.87
КЗ-1162/1532	12.09	13.78	0.17	40.36	22.23		0.80	10.62			100.05
Титаномагнетит / Магнетит (?)											
КЗ-1162/1540-1	11.21	1.16	0.05	49.20	38.12		0.25	0.19			100.18

Примечание. * SiO₂ = 0.12, Na₂O = 0.06 мас. %.

мулы, использованы в данной работе для иллюстрации разнообразия минеральных видов группы шпинели в горных породах Талнахского, Норильск-I и Zubovskoe месторождений и сделанных на этой основе выводов, приведены в таблице.

Первоначально результаты некоторых из использованных нами химических анализов, в которых железо было приведено в виде Fe₂O₃ или разделено авторами публикаций на Fe₂O₃ и FeO на основе расчетных данных, были пе-

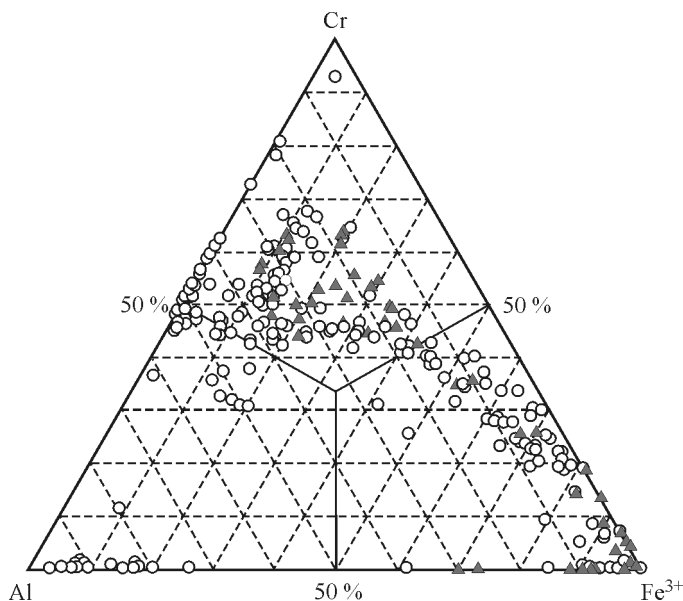


Рис. 1. Содержания Al, Cr и Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ ат. %) в минералах группы шпинели Талнахского (кружки) и Норильск-1 (треугольники) месторождений.

Fig. 1. Contents of Al, Cr and Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ mol %) in spinel group minerals of Talnakh (circles) and Norilsk-I (triangles) deposits.

рассчитаны на общее содержание железа в форме FeO. Затем результаты анализов пересчитывались на формулу на основе теоретической суммы катионов, приравняваемой к 3, с последующим подбором коэффициентов для Fe²⁺ и Fe³⁺ так, чтобы сохранить электронейтральность, т. е. расчет выполнялся на 8 положительных зарядов или, что то же самое, на коэффициент кислорода, равный 4 (O = 4). Лишь в 19 случаях из 297 учтенных нами химических анализов, пересчет на формулу производился по кислороду (O = 4), разделение железа по валентности в этих случаях приводило к отрицательным значениям коэффициентов, либо для Fe³⁺ (17 анализов), либо для Fe²⁺ (2 анализа). Распределение катионов по структурным позициям производилось с учетом выделения в группе шпинели минералов с нормальной и обращенной (инверсионной) структурами (Минералы, 1967; Булах и др., 2008). Алюминий, хром, ванадий и титан полностью помещались в октаэдрическую позицию. Так как Fe³⁺ входит в состав магнетита и магнезиоферрита, т. е. минералов с обращенной структурой, его количество распределялось поровну между тетраэдрической и октаэдрической позициями. Количество Fe²⁺ в октаэдрической координации определялось суммой коэффициентов Ti и Fe³⁺ в этой структурной позиции. В эту же позицию добавлялся Mg, если содержание Fe²⁺ было меньше суммы коэффициентов Ti^{VI} и Fe^{3+VI}. Затем рассчитывалось содержание минералов, вся схема и последовательность вычислений традиционна и подробно описана А. Г. Булахом с соавторами (Булах и др., 2014).

В группе шпинели по преобладающему трехвалентному катиону традиционно выделяют алюмо-, хром- и ферришпинели. С учетом этого вариации химического состава минералов группы шпинели Талнахского и Норильск-1 месторождений показаны на треугольной диаграмме (рис. 1), в вершинах которой располагаются Al, Cr и Fe³⁺.

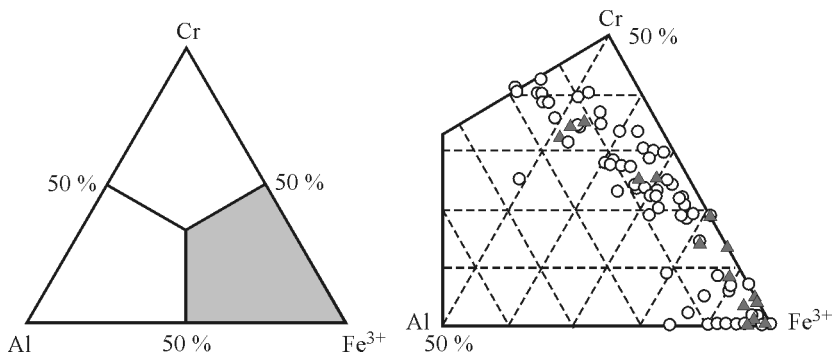


Рис. 2. Содержания Al, Cr и Fe^{3+} ($\Sigma = 100$ ат. %) в магнетите Талнахского (кружки) и Норильск-I (треугольники) месторождений.

Fig. 2. Contents of Al, Cr and Fe^{3+} ($\Sigma = 100$ mol %) in magnetite of Talnakh (circles) and Norilsk-I (triangles) deposits.

В соответствии с результатами расчета коэффициентов в формулах, минералы группы шпинели могут быть отнесены к следующим минеральным видам: магнетиту, хромиту, магниохромиту, шпинели, герцениту, ульвошпинели, магниоферриту и титаномаггемиту.

Магнетит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ (99 анализов). Магнетит является наиболее распространенным минералом группы шпинели на Талнахском месторождении, формируясь от начальных этапов интрузивного процесса до завершающих этапов гидротермального рудообразования. Он присутствует практически во всех горных породах ВТИ и ее метасоматического ореола.

Как видно на треугольной диаграмме (рис. 2), точки состава магнетита попадают в вытянутое эллипсовидное поле. Его длинная ось проходит от вершины треугольника Fe^{3+} до точки с координатами $\text{Fe}^{3+} = 43$ %, $\text{Cr} = 43$ %, $\text{Al} = 14$ ат. %. Вариации химического состава магнетита определяются главным образом соотношением Fe^{3+} и Cr и могут быть описаны в рамках изоморфного ряда магнетит—хромит. При этом с увеличением содержания хрома несколько возрастает и количество алюминия в составе магнетита. Максимальное содержание алюминия установлено в магнетите из такситовых габбро-долеритов Верхнеталнахской интрузии (ВТИ) (обр. КЗ-1672/1910-17, Рябов и др., 2000; см. таблицу): $(\text{Fe}_{0.375}^{3+}\text{Fe}_{0.365}^{2+}\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Cr}_{0.55}\text{Al}_{0.50}\text{Fe}_{0.475}^{2+}\text{Fe}_{0.375}^{3+}\text{Ti}_{0.10})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Отметим, что по правилу доминирующей валентности минерал с записанной таким образом кристаллохимической формулой следует относить к хромиту.

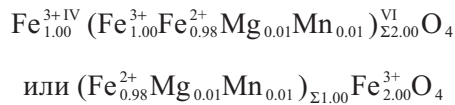
Рассчитаем минеральный состав данного минерала. Последовательность расчета следующая. 1. По коэффициенту титана определим содержание ульвошпинелевого минерала, $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$. Оно равно 10 мол. %. 2. Распределив трехвалентное железо поровну между тетраэдрической и октаэдрической позициями ($0.75/2 = 0.375$), определим количество магнетитового минерала — 37.5 мол. %. $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$. 3. По количеству двухвалентного железа, оставшегося после операций 1 и 2 [$0.84 - (0.20 + 0.375) = 0.265$], рассчитаем содержание хромитового минерала — 26.5 мол. % $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$. 4. По коэффициенту магния определяем количество шпинелевого минерала $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$, оно равно 25 мол. %. 5. После всех проведенных расчетов неучтенными остались 0.01 Mn и 0.02 Cr, которые объединяем в минерал $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — манганохромит, его количество равно 1 мол. %. По правилу доминирующего минерала (Бу-

лах и др., 2014) этот минерал следует отнести к магнетиту усложненного состава.

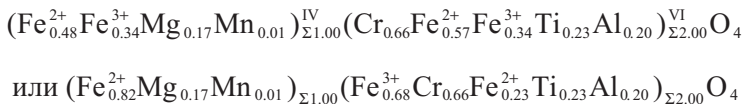
Заметим, что обычно формулу магнетита и других минералов групп шпинели представляют иначе, заселяя первую структурную позицию двухвалентными катионами до их теоретической суммы равной 1.00, а трехвалентные катионы, титан и неиспользованные двухвалентные катионы помещают во вторую позицию: $(\text{Fe}_{0.74}^{2+}\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}(\text{Fe}_{0.75}^{3+}\text{Cr}_{0.55}\text{Al}_{0.50}\text{Ti}_{0.10}\text{Fe}_{0.10}^{2+})_{\Sigma 2.00}\text{O}_4$. При такой записи формулы сомнений в отнесении минерала к магнетиту не возникает.

Расселение атомов в структуре магнетита было показано ранее в обобщенном виде (Булах и др., 2008). Материал по магнетиту Талнахского месторождения позволяет конкретизировать эти схемы. Изменения состава магнетита в горных породах Талнахского месторождения описывают следующие схемы изовалентного изоморфизма: $\text{Fe}^{3+} \leftarrow \text{Cr}^{3+} \leftarrow \text{Al}^{3+}$ и $\text{Fe}^{2+} \leftarrow \text{Mg}^{2+} \leftarrow \text{Mn}^{2+}$. В составе магнетита установлены также существенные вариации содержания титана. Вхождение титана на место трехвалентного железа в октаэдрической позиции компенсируется заменой трехвалентного железа двухвалентным в тетраэдрической координации по следующей схеме: $\text{Fe}^{3+VI} + \text{Fe}^{3+IV} \leftarrow \text{Ti}^{4+VI} + \text{Fe}^{2+IV}$. Среди других элементов-примесей в отдельных анализах магнетита установлены в небольших количествах никель и ванадий, входящие в тетраэдрическую и октаэдрическую позиции соответственно. Все приведенные схемы изоморфизма значительно расширяют примеры для магнетита в работе А. Г. Булах с соавторами (Булах и др., 2014). Несколько необычным и трудно объяснимым является небольшое количество натрия в результатах некоторых анализов.

Ниже приведены две кристаллохимические формулы магнетита, точки состава которых на треугольной диаграмме располагаются на максимальном удалении друг от друга. Они позволяют оценить вариации состава этого минерала и его изоморфную емкость:



(обр. КЗ-184/189-3, Рябов и др., 2000);



(обр. КЗ-1441/1287.5-2, Рябов и др., 2000).

Если образец КЗ-184/189-3 без всяких оговорок является магнетитом, то образец КЗ-1441/1287.5-2 по правилу доминирующей валентности следует относить к хромиту. Если состав этого минерала представить в виде суммы минералов: $\text{Fe}^{3+IV}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 34 мол. %, $\text{Fe}^{2+IV}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 25 %, $\text{Fe}^{2+IV}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 23 %, $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 10 %, $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 7 % и $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 %, то по правилу доминирующего минерала — это магнетит.

Магнетит присутствует во многих горных породах ВТИ (78 анализов). Наибольшими вариациями химического состава отличается магнетит из так-

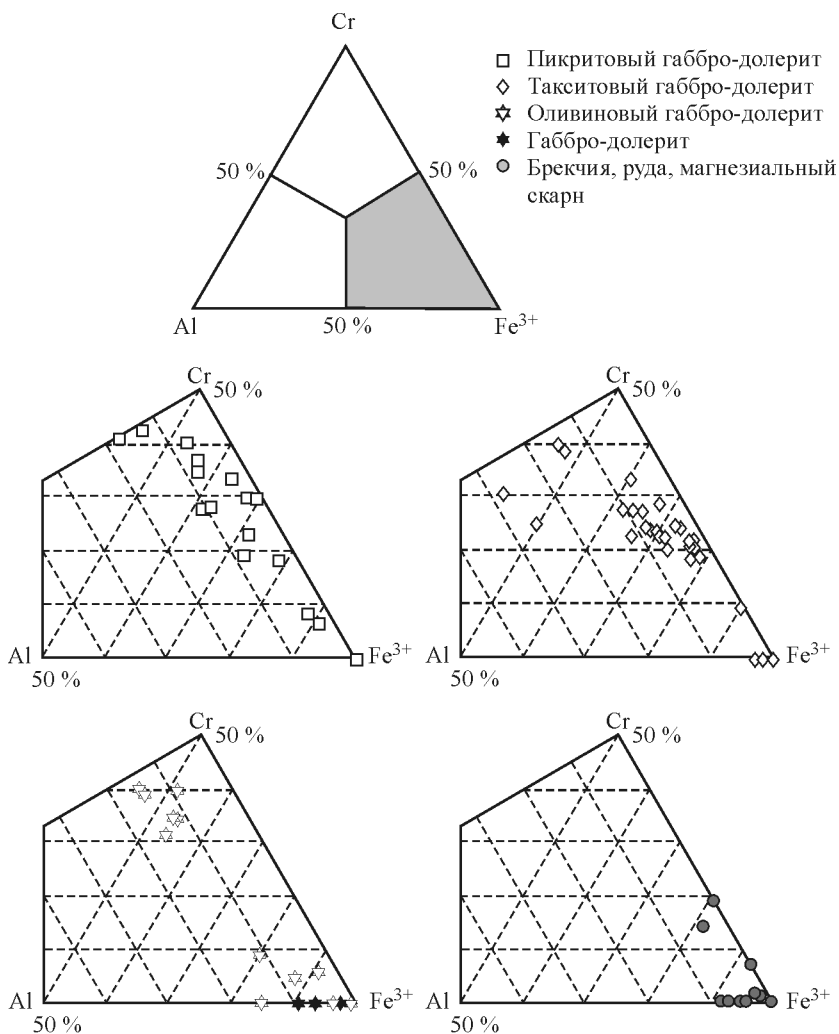


Рис. 3. Содержания Al, Cr и Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ ат. %) в магнетите из различных горных пород Талнахского месторождения.

Fig. 3. Contents of Al, Cr and Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ mol %) in magnetite from various rocks of the Talnakh deposit.

ситовых, пикритовых и оливиновых габбро-долеритов (рис. 3). Никакой зависимости химического состава магнетита от состава вмещающих его горных пород не наблюдается. Широкие вариации химического состава магнетита в интрузивных породах Талнахского месторождения, по нашему мнению, свидетельствуют о полигенности и полихронности его образования. Магнетит из скарнов и руд менее изменчив по химическому составу и наиболее близок к идеальной формуле минерала (рис. 3).

Хромит Fe^{2+IV}Cr₂^{VI}O₄ (105 анализов). Хромит встречается главным образом в пикритовых и такситовых габбро-долеритах Верхнеталнахской и Норильск-I интрузий. Он установлен также в диоритах и габбро месторождения Норильск-I и в платиноидно-хромитовых скарнах, развитых в ореоле ВТИ.

Точки химического состава хромита на треугольной диаграмме образуют поле треугольной формы (рис. 4), ограниченное содержанием хрома от 40 до

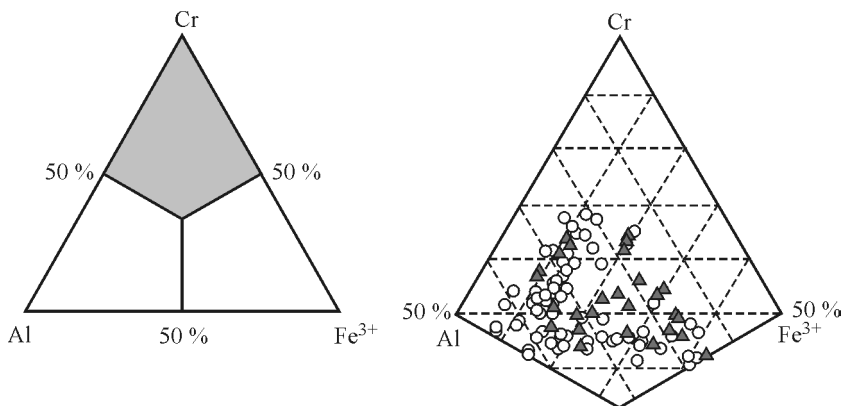


Рис. 4. Содержания Al, Cr и Fe³⁺ (Σ = 100 ат. %) в хромите Талнахского (кружки) и Норильск-I (треугольники) месторождений.

Fig. 4. Contents of Al, Cr and Fe³⁺ (Σ = 100 mol %) in chromite of Talnakh (circles) and Norilsk-I (triangles) deposits.

70 ат. % и с широкими вариациями содержаний Al (от 15 до 45 ат. %) и Fe³⁺ (от 5 до 40 ат. %). Изоморфизм осуществляется в соответствии со следующей схемой: Cr ← Fe³⁺ ← Al. В отдельных анализах хромита установлена примесь ванадия, который также замещает хром по схеме изовалентного изоморфизма. Постоянной примесью в хромите является титан, который входит в состав минерала по схеме гетеровалентного изоморфизма: Fe^{3+VI} + Fe^{3+IV} ← Ti^{4+VI} + Fe^{2+IV}. Двухвалентное железо может замещаться магнием и марганцем: Fe²⁺ ← Mg²⁺ ← Mn²⁺, при этом количество Mg варьирует достаточно широко, вплоть до его преобладания над Fe²⁺ в тетраэдрической позиции. С учетом этих схем изоморфизма ниже приведены кристаллохимические формулы и минеральный состав хромитов, существенно отличающихся по особенностям химического состава.

Образец Т-17-18 (Генкин и др., 1979) — обособления хромита в пикритовых габбро-долеритах ВТИ, кристаллохимическая формула: (Fe_{0.735}²⁺Fe_{0.15}³⁺Mg_{0.115})_{Σ1.00}^{IV} · (Cr_{0.95}Fe_{0.355}²⁺Ti_{0.26}Al_{0.23}Fe_{0.15}³⁺Mg_{0.055})_{Σ2.00}^{VI} O₄.

Минеральный состав:

Ульвошпинель Fe^{2+IV}(Fe²⁺Ti)^{VI}O₄ — 26 мол. %

Хромит Fe^{2+IV}Cr₂^{VI}O₄ — 47.5 мол. %

Шпинель Mg^{IV}Al₂^{VI}O₄ — 11.5 мол. %

Магнетит Fe^{3+IV}(Fe³⁺Fe²⁺)^{VI}O₄ — 9.5 мол. %

Магнезиоферрит Fe^{3+IV}(Fe³⁺Mg)^{VI}O₄ — 5.5 мол. %.

Образец КЗ-184/189-2 (Рябов и др., 2000) — обособления хромита в пикритовых габбро-долеритах ВТИ, кристаллохимическая формула: (Fe_{0.49}²⁺Mg_{0.435} · Fe_{0.075}³⁺)_{Σ1.00}^{IV} (Cr_{0.92}Al_{0.87}Fe_{0.08}²⁺Fe_{0.075}³⁺Ti_{0.03}Mg_{0.025})_{Σ2.00}^{VI} O₄.

Минеральный состав:

Ульвошпинель Fe^{2+IV}(Fe²⁺Ti)^{VI}O₄ — 3 мол. %

Хромит Fe^{2+IV}Cr₂^{VI}O₄ — 46 мол. %

Шпинель Mg^{IV}Al₂^{VI}O₄ — 43.5 мол. %

Магнетит Fe^{3+IV}(Fe³⁺Fe²⁺)^{VI}O₄ — 5 мол. %

Магнезиоферрит Fe^{3+IV}(Fe³⁺Mg)^{VI}O₄ — 2.5 мол. %.

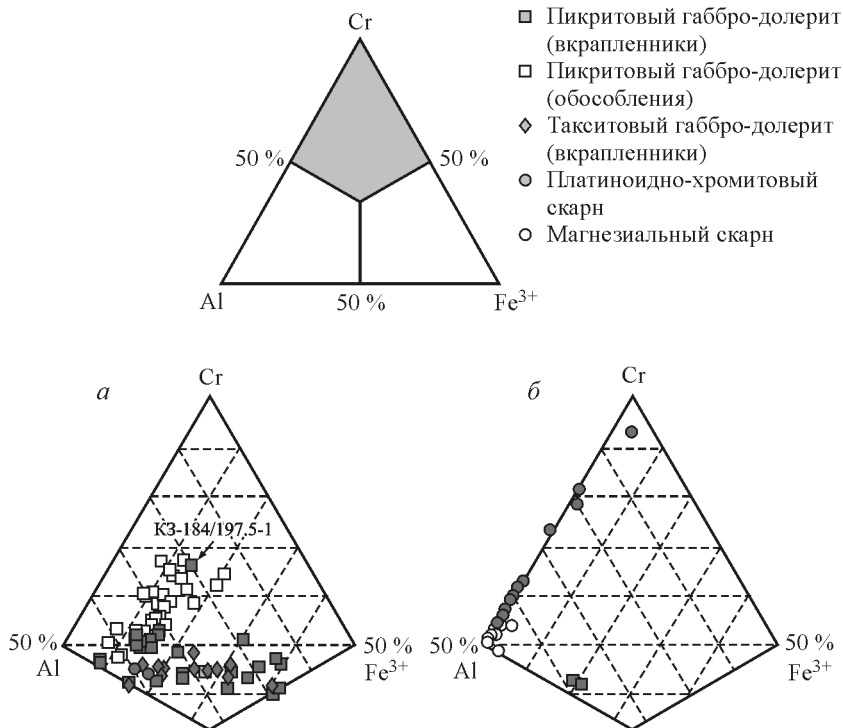


Рис. 5. Содержания Al, Cr и Fe^{3+} ($\Sigma = 100$ ат. %) в хромите (а) и магнезиохромите (б) из различных горных пород Талнахского месторождения.

Fig. 5. Contents of Al, Cr and Fe^{3+} ($\Sigma = 100$ mol %) in chromite (a) and magnesiochromite (b) from various rocks of the Talnakh deposit.

Вариации состава хромита из такситовых габбро-долеритов ВТИ (16 анализов) определяются широкими колебаниями в содержании Fe^{3+} и Al, тогда как количество Cr практически постоянно (от 40 до 50 %) (рис. 5, а). Более широкие вариации химического состава наблюдаются у хромита из пикритовых габбро-долеритов ВТИ (57 анализов). Точки хромита на треугольнике составов можно сгруппировать в два поля (рис. 5, а). В одно поле попадают составы хромита с содержанием хрома от 40 до 50 %, вариации его химического состава определяются, как и в случае хромита из такситовых габбро-долеритов, существенными колебаниями в содержаниях Fe^{3+} и Al. Во второе поле объединяются составы хромита, вариации химического состава которого определяются соотношением Al и Cr при близком содержании Fe^{3+} (от 10 до 20 %). Такие особенности химического состава хромита из пикритовых габбро-долеритов ВТИ связаны с генетическими причинами. Как установлено исследованиями А. Д. Генкина и В. В. Дистлера с соавторами (1979, 1981), на Талнахском месторождении выделяются две разновидности хромита, отличающиеся по характеру распределения — рассеянная вкрапленность и скопления (обособления), которые различаются также и по химическому составу и по отражательной способности. Как видно на рис. 5, а, наши данные подтверждают отличия выделенных разновидностей хромита по химическому составу. Лишь одна точка состава (обр. КЗ-184/197.5-1; Рябов и др., 2000) выпадает из общей закономерности, что, видимо, связано с неверным отношением образца к вкрапленной разновидности.

Химический состав хромита из платиноидно-хромитовых скарнов ВТИ отражает следующая кристаллохимическая формула: $(\text{Fe}_{0.46}^{2+}\text{Mg}_{0.36}\text{Fe}_{0.17}^{3+}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}} \cdot (\text{Cr}_{0.85}\text{Al}_{0.73}\text{Fe}_{0.21}^{2+}\text{Fe}_{0.17}^{3+}\text{Ti}_{0.04})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}} \text{O}_4$ (обр. ЮВС-12-2; Рябов и др., 1996).

Минальный состав этого минерала:

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 4 мол. %

Магнетит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 17 мол. %

Хромит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 42 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 36 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 мол. %

Манганохромит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 мол. %.

Магнезиохромит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ (30 анализов). Магнезиохромит присутствует главным образом в составе магнезиальных и платиноидно-хромитовых скарнов, он установлен также в двух образцах из пикритовых габбро-долеритов ВТИ.

Точки химического состава магнезиохромита на треугольной диаграмме располагаются вдоль стороны Al—Cr (рис. 5, б), т. е. вариации химического состава минерала связаны с вхождением алюминия вместо хрома в кристаллическую решетку минерала по схеме $\text{Cr}^{3+} \leftarrow \text{Al}^{3+}$. Только в двух случаях (обр. № Т-7 и Т-8; Генкин и др., 1979) кроме алюминия в составе магнезиохромита присутствует значимое количество Fe^{3+} . Эти составы характеризуют магнезиохромит из пикритовых габбро-долеритов ВТИ. Все остальные химические анализы относятся к магнезиохромиту из скарнов. Отметим, что магнезиохромит из магнезиальных скарнов отличается достаточно постоянным составом, точки его состава располагаются в области разделения минеральных видов по содержанию алюминия и хрома. Точки составов магнезиохромита из платиноидно-хромитовых скарнов имеют широкие вариации состава в отношении содержаний алюминия и хрома. Ниже приведены кристаллохимические формулы и минальный состав магнезиохромитов, существенно отличающиеся по особенностям химического состава.

Образец ЮВС-60/3а-1 (Рябов и др., 1996) — магнезиохромит из платиноидно-хромитовых скарнов ВТИ, кристаллохимическая формула: $(\text{Mg}_{0.84}\text{Fe}_{0.09}^{2+}\text{Fe}_{0.04}^{3+}\text{Mn}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}} (\text{Cr}_{1.81}\text{Al}_{0.07}\text{Fe}_{0.06}^{2+}\text{Fe}_{0.04}^{3+}\text{Ti}_{0.02})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}} \text{O}_4$.

Минальный состав:

Магнезиохромит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 84 мол. %

Хромит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 6.5 мол. %

Магнетит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 4 мол. %

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2 мол. %

Без названия, $\text{Ca}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %

Герцинит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 мол. %.

Образец ЮВС-59-17 (Рябов и др., 2000) — магнезиохромит из магнезиальных скарнов ВТИ, кристаллохимическая формула: $(\text{Mg}_{0.975}\text{Fe}_{0.025}^{3+})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}} \cdot (\text{Cr}_{1.02}\text{Al}_{0.83}\text{Mg}_{0.065}\text{Ti}_{0.05}\text{Fe}_{0.025}^{3+}\text{Fe}_{0.01}^{2+})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}} \text{O}_4$.

Минальный состав:

Магнезиохромит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 51 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 41.5 мол. %

Магнезиоферрит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2.5 мол. %

Кандилит $\text{Mg}^{\text{IV}}(\text{MgTi})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 4 мол. %

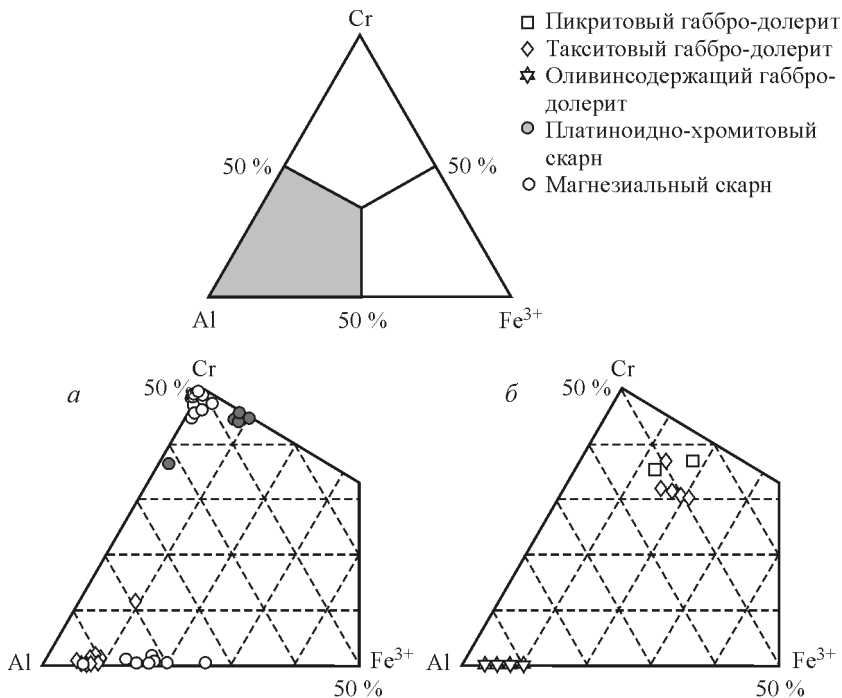


Рис. 6. Содержания Al, Cr и Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ ат. %) в шпинеле (а) и герцините (б) из различных горных пород Талнахского месторождения.

Fig. 6. Contents of Al, Cr and Fe³⁺ ($\Sigma = 100$ mol %) in spinel (a) and hercynite (b) from various rocks of the Talnakh deposit.

Без названия, Mg^{IV}(Fe²⁺Ti)^{VI}O₄ — 1 мол. %.

Кристаллохимическую формулу магнезиохромита из пикритовых габбро-долеритов иллюстрируют результаты пересчета химического анализа образца Т-8 (Генкин и др., 1979): (Mg_{0.56}Fe_{0.24}Fe_{0.20}³⁺)_{Σ1.00}^{IV}(Cr_{0.80}Al_{0.72}Fe_{0.24}²⁺Fe_{0.20}³⁺Ti_{0.04})_{Σ2.00}^{VI}O₄.

Шпинель Mg^{IV}Al₂^{VI}O₄ (43 анализа). Шпинель установлена в составе такситовых габбро-долеритов и скарнов Верхнеталнахской интрузии, в других интрузиях Норильского района она не обнаружена.

Точки химического состава шпинели на треугольной диаграмме достаточно четко разделяются на две области (рис. 6, а). Одно поле формируют образцы шпинели, в составе которых практически отсутствует примесь Cr, а наблюдаемые вариации состава определяются замещением Al³⁺ ← Fe³⁺. В эту группу попадает шпинель из такситовых габбро-долеритов и магнезиальных скарнов ВТИ. Отметим, что точки состава шпинели из интрузивных пород располагаются ближе к вершине треугольной диаграммы — Al, тогда как шпинель из скарнов отличается более высоким содержанием Fe³⁺. Ниже приведены две кристаллохимические формулы шпинели из такситовых габбро-долеритов (обр. КЗ-1672/1910-24) и магнезиальных скарнов (обр. КЗ-585/859.4-2) ВТИ с минимальным и максимальным содержанием Fe³⁺ (из учетных нами образцов).

Образец КЗ-1672/1910-24 (Рябов и др., 2000), кристаллохимическая формула: (Mg_{0.64}Fe_{0.31}²⁺Fe_{0.05}³⁺)_{Σ1.00}^{IV}(Al_{1.85}Fe_{0.07}²⁺Fe_{0.05}³⁺Ti_{0.02}Cr_{0.01})_{Σ2.00}^{VI}O₄.

Минальный состав:

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 64 мол. %

Герцинит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 28.5 мол. %

Магнетит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 5 мол. %

Хромит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 мол. %

Образец КЗ-585/859.4-2 (Рябов и др., 2000), кристаллохимическая формула: $(\text{Mg}_{0.75}\text{Fe}_{0.25}^{3+})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Al}_{1.42}\text{Fe}_{0.25}^{2+}\text{Mg}_{0.25}^{2+}\text{Ti}_{0.04}\text{Fe}_{0.04}^{2+})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Минальный состав:

Без названия, $\text{Mg}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 4 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 71 мол. %

Магнезиоферрит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 25 мол. %.

Второе поле формируют образцы шпинели, в химическом составе которых значительную роль играет примесь Cr, а Fe^{3+} отсутствует или его количество незначительно. В эту группу попадает шпинель из магнезиальных и платиноидно-хромитовых скарнов. Кристаллохимическая формула шпинели из магнезиальных скарнов приведена ниже: $(\text{Mg}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}^{3+})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Al}_{0.97}\text{Cr}_{0.95}\text{Mg}_{0.04} \cdot \text{Ti}_{0.03}\text{Fe}_{0.01}^{3+})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$ (обр. ЮВС-59-28; Рябов и др., 2000).

Минальный состав этого образца:

Кандилит $\text{Mg}^{\text{IV}}(\text{MgTi})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 3 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 48.5 мол. %

Магнезиохромит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 47.5 мол. %

Магнезиоферрит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %.

Образцы шпинели первой и второй групп характеризуются незначительной примесью Ti и достаточно широкими вариациями замещения в тетраэдрической позиции: $\text{Mg}^{2+} \leftarrow \text{Fe}^{2+}$.

Герцинит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ (11 анализов). Герцинит отмечен в оливинсодержащих, пикритовых и такситовых габбро-долеритах Верхнеталнахской интрузии, в метаморфическом ореоле интрузии он не обнаружен.

Точки химического состава герцинита на треугольной диаграмме образуют две области (рис. 6, б). Одно поле формируют образцы герцинита, в составе которых присутствует незначительное количество Fe^{3+} при отсутствии примеси Cr. Отличительной особенностью химического состава герцинита этой группы является высокое содержание Mg, замещающего Fe^{2+} в тетраэдрической структурной позиции. Генетически герцинит этой группы связан с оливиновыми и оливинсодержащими габбро-долеритами, развитыми в верхней части ВТИ. Коэффициенты катионов в формуле герцинита из оливинсодержащих габбро-долеритов (обр. 948-3, Генкин и др., 1981), рассчитанные по использованной нами методике ($\text{Fe}^{2+} = 0.71$, $\text{Mg} = 0.29$, $\text{Al} = 1.92$, $\text{Fe}^{3+} = 0.08$), очень удобно представить в виде следующей формулы: $(\text{Fe}_{0.71}^{2+}\text{Mg}_{0.29})_{\Sigma 1.00}(\text{Al}_{1.92}\text{Fe}_{0.08}^{3+})_{\Sigma 2.00}\text{O}_4$.

Но, если состав этого минерала представить в виде суммы миналов (мол. %): герцинит, FeAl_2O_4 — 67, шпинель, MgAl_2O_4 — 29 и магнетит, $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})\text{O}_4$ — 4, кристаллохимическую формулу данного минерала необходимо несколько изменить: $(\text{Fe}_{0.67}^{2+}\text{Mg}_{0.29}\text{Fe}_{0.04}^{3+})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Al}_{1.92}\text{Fe}_{0.04}^{3+}\text{Fe}_{0.04}^{2+})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Второе поле образуют образцы герцинита, в составе которых фиксируется высокое содержание Cr при незначительном количестве примеси Fe^{3+} , а также достаточно высокое содержание Mg, замещающего Fe^{2+} в тетраэдрической

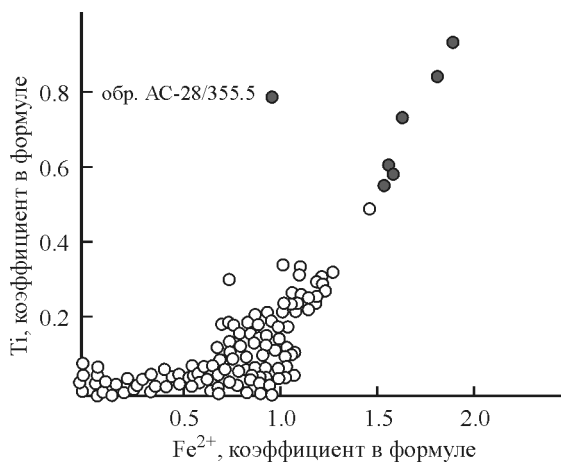


Рис. 7. Содержания Ti и Fe²⁺ в минералах группы шпинели Талнахского, Норильск-I и Zubovskoe месторождений (черные кружки — ульвошпинель).

Fig. 7. Contents of Ti and Fe²⁺ in spinel group minerals of Talnakh, Norilsk-I and Zubovskoe deposits (black circles — ulvöspinel).

координации. Небольшое количество примеси Ti входит в состав минерала в соответствии со схемой гетеровалентного изоморфизма: Fe^{3+VI} + Fe^{3+IV} ← Ti^{4+VI} + Fe^{2+IV}. Вариации состава герцинита этой группы иллюстрирует приведенная ниже кристаллохимическая формула (обр. КЗ-1615/1555-1; Рябов и др., 2000): (Fe_{0.44}²⁺Mg_{0.43}Fe_{0.13}³⁺)_{Σ1.00}^{IV}(Al_{0.96}Cr_{0.72}Fe_{0.16}²⁺Fe_{0.13}³⁺Ti_{0.03})_{Σ2.00}^{VI}O₄.

Герцинит с высоким содержанием хрома приурочен к развитым в нижней части ВТИ пикритовым и такситовым габбро-долеритам, т. е. горным породам, обогащенным оливином в сравнении с оливиновыми и оливинсодержащими габбро-долеритами, содержащими оливин в незначительном количестве.

Ульвошпинель Fe^{2+IV}(Fe^{2+Ti})^{VI}O₄ (7 анализов). На Талнахском месторождении ульвошпинель не обнаружена, она установлена в габбро- и оливинсодержащих габбро-долеритах интрузии Норильск-I. Один образец из пикритовых габбро-долеритов Zubovskoy интрузии также может быть отнесен к ульвошпинели.

При пересчете химических анализов используемой нами выборки в семи случаях коэффициент Ti превысил 0.5 (рис. 7), что позволяет формально отнести эти образцы к ульвошпинели, идеальную формулу которой в различных справочниках приводят в следующем виде: Fe₂²⁺TiO₄.

Шесть химических анализов характеризуют состав ульвошпинели из месторождения Норильск-I. Ниже приведены кристаллохимические формулы и минеральный состав двух образцов.

В первом образце (обр. ПЕ-35/533-3; Рябов и др., 2000; см. таблицу) определено минимальное содержание титана в использованной нами выборке химических анализов, для возможного отнесения минерала к ульвошпинели. Кристаллохимическая формула минерала имеет следующий вид: (Fe_{0.57}²⁺Fe_{0.39}³⁺Mg_{0.02}Mn_{0.02})_{Σ1.00}^{IV}(Fe_{0.94}²⁺Ti_{0.55}³⁺Fe_{0.39}³⁺Al_{0.10}V_{0.02})_{Σ2.00}^{VI}O₄.

Минеральный состав:

Ульвошпинель Fe^{2+IV}(Fe^{2+Ti})^{VI}O₄ — 55 мол. %

Магнетит Fe^{3+IV}(Fe^{3+Fe²⁺})^{VI}O₄ — 39 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2 мол. %

Герцинит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %

Кульсонит $\text{Fe}^{2+\text{IV}}\text{V}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %.

Второй образец (обр. ПЕ-35/718-2; Рябов и др., 2000; см. таблицу) отличается максимальным содержанием титана, его кристаллохимическая формула: $(\text{Fe}_{0.92}^{2+}\text{Fe}_{0.04}^{3+}\text{Mn}_{0.04}\text{Mg}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Fe}_{0.96}^{2+}\text{Ti}_{0.92}\text{Fe}_{0.07}^{3+}\text{Al}_{0.03}\text{V}_{0.02})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Минальный состав:

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 92 мол. %

Магнетит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 4 мол. %

Якобсит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Fe}_2^{3+\text{VI}}\text{O}_4$ — 1.5 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1.5 мол. %

Магнезиокульсонит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{V}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %.

Один химический анализ характеризует состав ульвошпинели из пикритовых габбро-долеритов Зубовской интрузии (обр. АС-28/355.5; Рябов и др., 2000; см. таблицу), кристаллохимическая формула минерала имеет вид: $(\text{Fe}_{0.47}^{2+}\text{Mg}_{0.35}\text{Fe}_{0.17}^{3+}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}(\text{Ti}_{0.77}\text{Fe}_{0.47}^{2+}\text{Mg}_{0.47}\text{Fe}_{0.17}^{3+}\text{Al}_{0.07}\text{Cr}_{0.03}\text{V}_{0.02})_{\Sigma 2.00}\text{O}_4$.

Минальный состав:

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 47 мол. %

Кандилит $\text{Mg}^{\text{IV}}(\text{MgTi})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 30 мол. %

Магнезиоферрит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 17 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 2.5 мол. %

Магнезиохромит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1.5 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %

Магнезиокульсонит $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{V}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %.

Как видно из приведенной формулы, ульвошпинель Зубовской интрузии отличается от минерала из интрузии Норильск-I высоким содержанием магния (30 мол. % в составе минерала приходится на кандилитовый минал). Отметим, что при ином распределении Mg и Fe^{2+} по структурным позициям данный образец можно отнести к другому минеральному виду — кандилиту.

Магнезиоферрит $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ (2 анализа). Пересчет результатов только двух химических анализов из учтенной нами выборки привел к кристаллохимическим формулам магнезиоферрита.

Один анализ характеризует состав минерала из шпинель-форстеритовых скарнов, развитых в ореоле Талнахского месторождения (см. таблицу; обр. КЗ-585/859.4; Рябов и др., 2000). Состав минерала можно представить в виде суммы миналов: $\text{Fe}^{2+\text{IV}}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 7 мол. %, $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Mg})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 54 %, $\text{Fe}^{3+\text{IV}}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 30 %, $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 8 %, $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 % и $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Cr}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 %, что соответствует следующей кристаллохимической формуле: $(\text{Fe}_{0.84}^{3+}\text{Mg}_{0.08}\text{Fe}_{0.07}^{2+}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Fe}_{0.84}^{3+}\text{Mg}_{0.54}\text{Fe}_{0.37}^{2+}\text{Al}_{0.17}\text{Ti}_{0.07}\text{Cr}_{0.01})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

По правилам доминирующей валентности и доминирующего минала этот минерал является магнезиоферритом. Вариации химического состава этого минерала описываются следующими схемами изоморфизма: $\text{Mg}^{2+} \leftarrow \text{Fe}^{2+} \leftarrow \text{Mn}^{2+}$; $\text{Fe}^{3+} \leftarrow \text{Al}^{3+} \leftarrow \text{Cr}^{3+}$ и $\text{Fe}^{3+\text{VI}} + \text{Fe}^{3+\text{IV}} \leftarrow \text{Ti}^{4+\text{VI}} + \text{Fe}^{2+\text{IV}}$.

Второй анализ (обр. КЗ-1162/1532) взят из работы М. Б. Куделиной с соавторами (Куделина и др., 1983), он характеризует химический состав минерала из такситовых габбро-долеритов ВТИ. В оригинальной статье результаты химического анализа приведены с разделением (оценкой) двух- и трехвалентно-

го железа (см. таблицу), а кристаллохимическая формула минерала соотнесена с магнетитом.

При пересчете результатов этого же химического анализа на формулу на основе теоретической суммы катионов, равной 3, и подбором коэффициентов для Fe^{2+} и Fe^{3+} для сохранения электронейтральности ($O = 4$) получаем такие коэффициенты: $\text{Fe}^{2+} = 0.76$; $\text{Mg} = 0.52$; $\text{Mn} = 0.02$; $\text{Fe}^{3+} = 0.86$; $\text{Al} = 0.54$; $\text{Ti} = 0.30$. Определим минальный состав этого минерала. По коэффициенту титана ($\text{Ti} = 0.30$) определяем количество ульвошпинелевого минала, $\text{Fe}^{2+IV}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4 = 30$ мол. %. По остатку Fe^{2+} ($0.76 - 0.60 = 0.16$) определяем количество магнетитового минала — 16 мол. % $\text{Fe}^{3+IV}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$. Содержание галакситового минала определяется коэффициентом Mn и равно 2 мол. % MnAl_2O_4 . Остаток алюминия ($0.54 - 0.04 = 0.50$) связываем в шпинелевый минал, его количество равно 25 мол. % MgAl_2O_4 . Магнезиоферритовый минал определяем по магнию, оставшемуся после расчета шпинелевого минала ($0.52 - 0.25 = 0.27$), его количество равно 27 мол. %. По правилу доминирующего минала это ульвошпинель.

Кристаллохимическая формула этого минерала будет иметь следующий вид: $(\text{Fe}_{0.43}^{3+}\text{Fe}_{0.30}^{2+}\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.02})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Al}_{0.54}\text{Fe}_{0.46}^{2+}\text{Fe}_{0.43}^{3+}\text{Ti}_{0.30}\text{Mg}_{0.27})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$. По правилу доминирующей валентности этот минерал является герцинитом с идеальной формулой $\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$.

Как видно на этом примере, один и тот же химический анализ можно пересчитать на коэффициенты в формуле по-разному, а использование различных вариантов распределения катионов по структурным позициям приводит к возможности отнесения минерала к разным минеральным видам. Все это позволяет утверждать, что наличие магнезиоферрита в горных породах Талнахского месторождения является редчайшим явлением.

Титаномаггемит с идеальной формулой $\text{Fe}^{3+IV}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti}, \text{Fe}^{2+}, \square)_2^{\text{VI}}\text{O}_4$. Основываясь только на данных химического анализа, наличие данного минерального вида в горных породах Талнахского месторождения можно лишь предполагать. Расчет коэффициентов на 4 катиона с подбором коэффициентов для железа разной валентности не позволяет рассчитать формулу титаномаггемита. Наличие этого минерального вида можно только предположить для тех случаев, когда по результатам химического анализа, с одной стороны, установлено достаточно большое содержание титана, а с другой — коэффициент у Fe^{3+} больше единицы. Рассмотрим в качестве примера образец КЗ-1162/1540-1 (Куделина и др., 1983), результат пересчета химического анализа (см. таблицу) которого на формулу приведен ниже: $(\text{Fe}_{0.655}^{3+}\text{Fe}_{0.325}^{2+}\text{Mg}_{0.01}\text{Mn}_{0.01})_{\Sigma 1.00}^{\text{IV}}(\text{Fe}_{0.975}^{2+}\text{Fe}_{0.655}^{3+}\text{Ti}_{0.32}\text{Al}_{0.05})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Минальный состав:

Ульвошпинель $\text{Fe}^{2+IV}(\text{Fe}^{2+}\text{Ti})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 32 мол. %

Магнетит $\text{Fe}^{3+IV}(\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+})^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 65.5 мол. %

Шпинель $\text{Mg}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %

Галаксит $\text{Mn}^{\text{IV}}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 1 мол. %

Герцинит $\text{Fe}^{2+IV}\text{Al}_2^{\text{VI}}\text{O}_4$ — 0.5 мол. %.

При таком написании кристаллохимической формулы и по правилу доминирующего минала — это магнетит усложненного состава, связанного главным образом с замещением Fe^{3+} титаном по следующей схеме: $\text{Fe}^{3+VI} + \text{Fe}^{3+IV} \leftarrow \text{Ti}^{4+VI} + \text{Fe}^{2+IV}$.

Коэффициенты в формуле этого минерала можно рассчитать иначе, с учетом возможной вакансии во второй структурной позиции. Методом итерации подбираем количество катионов (с учетом вакансии их должно быть меньше 3), дополнительными условиями расчета коэффициентов в формуле предполагаем, что все железо в минерале присутствует только в форме Fe^{3+} , а сумма положительных зарядов равна 8, т. е. количество кислорода равно 4. Получим кристаллохимическую формулу, которая отвечает минеральному виду — титаномаггемиту: $\text{Fe}_{1.00}^{3+IV}(\text{Fe}_{1.25}^{3+}\text{Ti}_{0.27}\text{Al}_{0.04}\text{Mg}_{0.01}\text{Mn}_{0.01}\square_{0.42})_{\Sigma 2.00}^{\text{VI}}\text{O}_4$.

Как видно, один и тот же химический анализ можно рассчитать на коэффициенты в формуле разными способами, а также по-разному распределить катионы по структурным позициям, что позволяет соотнести его с разными минеральными видами. Кроме титаномаггемита отдельные химические анализы из учтенной нами выборки могут быть пересчитаны на формулу еще одного минерального вида — маггемита с идеальной формулой $\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$. Поэтому установление видового разнообразия минералов группы шпинели в горных породах Талнахского месторождения (как и на других объектах) только на основе данных химического анализа представляется не всегда корректным. Вместе с тем результаты проведенного анализа имеющегося фактического материала о химическом составе минералов группы шпинели Талнахского месторождения позволяют сделать следующие выводы.

1. Минералы группы шпинели в интрузивных горных породах и породах метаморфического ореола Талнахского месторождения относятся в основном к пяти минеральным видам: магнетиту, хромиту, магнезиохромиту, шпинели и герциниту.

2. Зависимость химического состава магнетита от состава вмещающих его горных пород не выявлена. Широкие вариации химического состава магнетита в интрузивных породах Талнахского месторождения свидетельствуют о полигенности и полихронности его образования. Магнетит из скарнов и руд менее изменчив по химическому составу и его формулы наиболее близки к идеальной.

3. Две разновидности хромита, выделяемые в интрузивных горных породах Талнахского месторождения, — вкрапленники и обособления (скопления) — отличаются друг от друга по особенностям химического состава. Вариации химического состава хромита из скоплений определяются в основном изоморфным замещением $\text{Cr}^{3+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+}$, тогда как изменения состава хромита вкрапленников происходит по схеме: $\text{Cr}^{3+} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$.

4. Магнезиохромит на Талнахском месторождении встречается главным образом в составе скарнов. В магнезиальных скарнах минерал имеет относительно постоянный химический состав, тогда как в платиноидно-хромитовых скарнах он характеризуется более широкими вариациями в отношении содержания алюминия и хрома.

5. По химическому составу можно выделить две разновидности шпинели. Одна встречается в магнезиальных и платиноидно-хромитовых скарнах и характеризуется значительным содержанием примеси Cr и низким количеством Fe^{3+} . Напротив, шпинель другой разновидности, встреченная в составе такситовых габбро-долеритов и магнезиальных скарнов, отличается низким содержанием примеси Cr или ее отсутствием и широкими вариациями содержания Fe^{3+} .

6. Герцинит из пикритовых и такситовых габбро-долеритов Талнахского месторождения характеризуется высоким содержанием хрома, тогда как в составе герцинита из оливиновых и оливинсодержащих габбро-долеритов, раз-

витых в верхней части Верхнеталнахской интрузии, хром отсутствует. Таким образом, примесь хрома в герцинитах можно рассматривать в качестве типоморфного признака этого минерала.

7. Несмотря на многообразие минералов группы шпинели в породах Талнахского месторождения, вариации их состава описываются главным образом тремя следующими схемами изоморфизма: $Mg \leftrightarrow Fe^{2+}$; $Al \leftrightarrow Fe^{3+} \leftrightarrow Cr$; $Fe^{3+VI} + Fe^{3+IV} \leftrightarrow Ti^{4+VI} + Fe^{2+IV}$. Роль других элементов — Si, Ni, Co, Mn, Ca, Na, K, Zn, V — в составе минералов группы шпинели незначительна.

8. В составе горных пород Талнахского месторождения возможно присутствие еще нескольких минеральных видов из группы шпинели — магнезиоферрита, титаномаггемита и маггемита. В габбро и оливинсодержащих габбро-долеритах интрузии Норильск-I и в такситовых габбро-долеритах Зубовской интрузии установлено наличие ульвошпинели.

Список литературы

Аглонов В. С., Золотарёв А. А. Особенности химического состава амфиболов Талнахского медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // ЗРМО. 2005. № 4. С. 45—56.

Аглонов В. С., Золотарёв А. А. Особенности химического состава оливина Талнахского платиноидно-медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // ЗРМО. 2008. № 6. С. 98—110.

Булах А. Г., Золотарёв А. А., Кривовичев В. Г. Структура, изоморфизм, формулы, классификация минералов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014. 132 с.

Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарёв А. А. Общая минералогия. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 416 с.

Генкин А. Д., Дистлер В. В., Гладышев Г. Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.

Генкин А. Д., Дистлер В. В., Лапутина И. П. Хромитовая минерализация дифференцированных трапповых интрузий и условия ее образования / Условия образования магматических рудных месторождений. М.: Наука, 1979. С. 105—127.

Гора М. П. Особенности кристаллизации окиснорудных минералов в траппах Норильского района / Современные проблемы формационного анализа, петрология и рудоносность магматических образований. Новосибирск, 2003. С. 78—79.

Додин Д. А., Батуев Б. Н. Геология и петрология Талнахских дифференцированных интрузий и их метаморфического ореола / Петрология и рудоносность Талнахских и Норильских дифференцированных интрузий. Л.: Недра, 1971. С. 31—100.

Дюжиков О. А., Дистлер В. В., Струнин Б. М. и др. Геология и рудоносность Норильского района. М.: Наука, 1988. 279 с.

Золотарёв А. А., Аглонов В. С. Особенности химического состава плагиоклазов в горных породах Талнахского рудного узла (северо-запад Сибирской платформы) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2014. № 3. С. 25—31.

Золотарёв А. А., Аглонов В. С. Особенности химического состава слюд Талнахского платиноидно-медно-никелевого месторождения (северо-запад Сибирской платформы) // ЗРМО. 2006. № 4. С. 48—65.

Золотарёв А. А., Аглонов В. С. Химический состав и номенклатура пироксенов из интрузивных и метасоматических пород Норильско-Талнахского рудного узла // ЗРМО. 2010. № 5. С. 55—66.

Золотухин В. В., Рябов В. В., Васильев Ю. Р., Шатков В. А. Петрология Талнахской рудоносной дифференцированной трапповой интрузии. Новосибирск: Наука, 1975. 436 с.

Иванов М. К., Иванова Т. К., Тарасов А. В., Шатков В. А. Особенности петрологии и оруденения дифференцированных интрузий Норильского рудного узла / Петрология и рудоносность Талнахских и Норильских дифференцированных интрузий. Л.: Недра, 1971. С. 197—304.

Кавардин Г. И. Металлогения северо-запада Сибирской платформы. Л.: Недра, 1971. 159 с.

Куделина М. Б., Кудрявцева Г. П., Гаранин В. К. Особенности химического и фазового состава шпинелидов и ильменита Талнахского интрузива (Норильский район) // Геология рудных месторождений. 1983. № 5. С. 24—37.

Минералы. Справочник. Том III. Вып. 3. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы. М.: Наука, 1967. 676 с.

Натрохин И. А., Архипова А. И., Батуев Б. Н. Петрология Талнахских интрузий. Л.: Недра, 1977. 236 с.

Рябов В. В., Золотухин В. В. Минералы дифференцированных траппов. Новосибирск: Наука, 1977. 392 с.

Рябов В. В., Шевко А. Я., Гора М. П. Магматические образования Норильского района. Новосибирск: Нонпарель, 2000. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 600 с.

Рябов В. В., Шевко А. Я., Симонов О. Н., Аношин Г. Н. Состав платиноносных высокотемпературных скарнов Талнаха // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 7. С. 62—77.

Юдина В. В. Известковые скарноиды центральной и юго-восточной частей Талнахского месторождения и особенности их зональности / Геология и петрология интрузивных траппов Сибирской платформы. М., 1970. С. 143—178.

References

*Aplonov V. S., Zolotarev A. A. Peculiarities of chemical composition of amphiboles in Talnakh copper-nickel ore field (North-west of Siberian platform). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 2005. N 4. P. 45—56 (in Russian).*

*Aplonov V. S., Zolotarev A. A. Peculiarities of chemical composition of olivines in Talnakh PGM-copper-nickel ore field (North-west of Siberian platform). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 2008. N 6. P. 98—110 (in Russian).*

Bulakh A. G., Krivovichev V. G., Zolotarev A. A. General mineralogy. Moscow: Academia, 2008. 416 p. (in Russian).

Bulakh A. A., Zolotarev A. A., Krivovichev V. G. The structure, isomorphism, formulas, classification of minerals. Saint Petersburg: SPbSU, 2014. 132 p. (in Russian).

*Dodin D. A., Batuev B. N. Geology and petrology of Talnakh differentiated intrusions and their metamorphic aureole. In: *Petrology and ore bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions*. Leningrad: Nedra, 1971. P. 31—100 (in Russian).*

Dyuzhikov O. A., Distler V. V., Strunin B. M. et al. Geology and ore bearing of the Norilsk region. Moscow: Nauka, 1988. 279 p. (in Russian).

Genkin A. D., Distler V. V., Gladishev G. D. Sulfide Cu-Ni ores of Norilsk deposits. Moscow: Nauka, 1981. 234 p. (in Russian).

*Genkin A. D., Distler V. V., Laputina I. P. Chromite mineralization in the differentiated trap intrusions and conditions of its formation. In: *The conditions of the formation of magmatic ore deposits*. Moscow: Nauka, 1979. P. 105—127 (in Russian).*

*Gora M. P. Features of the crystallization oxide ore minerals in Norilsk area traps. In: *Modern problems of the formational analysis, petrology and ore-bearing of magmatic formations*. Novosibirsk, 2003. P. 78—79 (in Russian).*

*Ivanov M. K., Ivanova T. K., Tarasov A. V., Shatkov V. A. Peculiarities of the petrology and ore mineralization of differentiated intrusions of the Norilsk ore field. In: *Petrology and ore bearing of Talnakh and Norilsk differentiated intrusions*. Leningrad: Nedra, 1971. P. 197—304 (in Russian).*

Kovardin G. I. Metallogeny of the northwestern Siberian platform. Leningrad: Nedra, 1971. 159 p. (in Russian).

*Kudelina M. B., Kudriavtseva G. P., Garanin V. K. Peculiarities of the chemical and phase composition of spinel and ilmenite of the Talnakh intrusion (Norilsk region). *Geol. Ore Deposits*. 1983. N 5. P. 24—37 (in Russian).*

Minerals. Handbook. Vol. 3. N 3. Complex oxides, titanates, niobates, tantalates, antimonates, hydroxides. Moscow: Nauka, 1967. 676 p. (in Russian).

Natrokhin I. A., Arkhipova A. I., Batuev B. N. Petrology of the Talnakh intrusions. Leningrad: Nedra, 1977. 236 p. (in Russian).

Ryabov V. V., Shevko A. Ya., Gora M. P. Igneous rocks the Norilsk region. Novosibirsk: Nonparel, 2000. Vol. 1. 408 p.; Vol. 2. 600 p. (in Russian).

*Ryabov V. V., Shevko A. Ya., Simonov O. N., Anoshin G. N. The composition of platinum-bearing high-temperature skarns of Talnakh. *Russian Geol. Geophys.* 1996. Vol. 37. N 7. P. 62—77 (in Russian).*

Ryabov V. V., Zolotukhin V. V. Minerals of differentiated traps. Novosibirsk: Nauka, 1977. 392 p. (in Russian).

*Yudina V. V. The calcareous skarnoids of central and south-eastern parts of the Talnakh deposit and features of their zoning. In: *Geology and petrology of intrusive traps of the Siberian platform*. Moscow, 1970. P. 143—178 (in Russian).*

Zolotarev A. A., Aplonov V. S. Chemical composition and nomenclature of pyroxenes from intrusions and metasomatic rocks of Norilsk-Talnakh ore field. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2010**. N 5. P. 55—66 (in Russian).

Zolotarev A. A., Aplonov V. S. Peculiarities in chemical composition of micas of Talnakh platinum-bearing copper-nickel ore deposit (North-west region of Siberian platform). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2006**. N 4. P. 48—65 (in Russian).

Zolotarev A. A., Aplonov V. S. Peculiarities of the chemical composition of plagioclase in rocks of Talnakh ore field (north-west of the Siberian platform). *Vestnik SPbSU. Ser. 7. Geol. Geogr.* **2014**. N 3. P. 25—31 (in Russian).

Zolotukhin V. V., Ryabov V. V., Vasiliev Yu. R., Shatkov V. A. Petrology of the Talnakh ore-bearing differentiated intrusion. Novosibirsk: Nauka, **1975**. 436 p. (in Russian).

Поступила в редакцию
27 сентября 2016 г.

УДК 549.731.11+ 552.21 (470.1/2)

ЗРМО, № 3, 2017
Zapiski RMO, N 3, 2017

© Е. В. ПУТИНЦЕВА,* поч. чл. Э. М. СПИРИДОНОВ**

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ИЛЬМЕНИТА ДРЕВНЕЙШИХ В РОССИИ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ КИМОЗЕРА, КАРЕЛИЯ

* Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
199034, С.-Петербург, Университетская наб., 7/9; e-mail: e.putintseva@spbu.ru

** Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, геологический факультет,
119899, Москва, Воробьевы горы; e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Рассмотрены морфология и вариации состава минералов группы ильменита кимберлитовых пород двух фаз древнейшего в России проявления Кимозера. Марганцовистые пикроильменит и железистый гейкилит вкрапленников в кимберлитах обеих фаз сходны по морфологии и по составу. Ильменит цементирующей массы кимберлитов II фазы, обогащенный магнием и слагающий оторочки небольших правильной формы вкрапленников хромшпинелидов, в кимберлитах I фазы не установлен. Распространенные в цементирующей массе кимберлитов II фазы ильменит, манганильменит и железистый пирофанит (с 22—24 мас. % MnO) вдвое богаче ниобием и существенно богаче марганцем, чем ильменит до манганильменита цементирующей массы кимберлитов I фазы. Ильменит и манганильменит кимберлитов I фазы заметно богаче цинком (до 1.5 мас. % ZnO). Ильменит кимберлитов II фазы содержит до 3 % Cr₂O₃. По содержанию ниобия (до 3.5 % Nb₂O₅) кимберлитовые породы Кимозера не отличаются от стандартных кимберлитов Мира. Общая особенность состава минералов группы ильменита кимберлитовых пород Кимозера — значительная обогащенность марганцем. Сделано предположение, что кимберлиты, в которых все типы минералов группы ильменита от мегакристов и вкрапленников до мелких выделений в цементирующей массе обогащены марганцем, возникли при участии карбонатитовых расплавов повышенной щелочности.

Ключевые слова: кимберлит, минералы группы ильменита, пикроильменит, манганильменит, марганцовистый, Кимозера, Карелия.

E. V. PUTINTSEVA,* E. M. SPIRIDONOV** ILMENITE GROUP MINERALS IN THE OLDEST RUSSIA'S DIAMONDIFEROUS KIMBERLITES OF KIMOZERO, KARELIA

* Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

** Moscow State University, Moscow, Russia

Morphology and variations in composition were studied for ilmenite group minerals from two phases of rocks of the oldest Russia's Kimozero kimberlite occurrence. Mn-bearing picroilmenite and