

и позволили дать долгосрочный прогноз распространения ореолов загрязнения для наиболее вероятных сценариев изменения гидродинамической обстановки. Расчеты показали, что эксплуатация каскада водоемов в течение планируемых сроков не скажется на качестве вод питьевого водозабора.

Следует отметить, что математическая модель создавалась как постоянно действующая, что предполагает возможность ее развития с учетом изменения природно-техногенных условий рассматриваемой территории и появления новых данных ОМСН. Основой математической модели стала детально проработанная ГМ, охватывающая территорию размещения не только каскада водоемов в пади Широндукуй, но и остальных техногенных и природных объектов, находящихся в пределах рассматриваемого водосборного бассейна. Созданная на ее основе ГФМ позволила учесть все основные факторы формирования потока ПВ. В результате разработанную математическую модель можно в дальнейшем использовать для проведения расчетов по оценке влияния других объектов, находящихся в области моделирования как на формирование потока ПВ, так и на их качество.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Верхотуров, Г.Г.* Изменение состава подземных вод в районе г. Краснокаменск как результат хозяйственного освоения территории / Г.Г. Верхотуров, А.Г. Верхотуров // Вестник ТГУ. — 2014. — Т. 19. — Вып.5. — С. 1650–1654.
2. *ГН 2.1.5.1315-03* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

3. *ГН 2.1.5.2280-07* Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03.
4. *Гриневский, С.О.* Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей / С.О. Гриневский, С.П. Поздняков // Водные ресурсы. — 2010. — Т. 37. — № 5. — С. 543–557.
5. *Климова, Т.И.* Влияние природных и техногенных факторов на подтопление территории пади Сухой Урулюнгуй / Т.И. Климова, Е.Б. Севтинова, Л.Я. Максимова // Разведка и охрана недр. — 2013. — № 10. — С. 82–87.
6. *СанПиН 2.1.4.1074-01* Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения.
7. *Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 — 09.* Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
8. *Шестаков, В.М.* Геогидрология / В.М. Шестаков, С.П. Поздняков. — Изд. ИКЦ «АКАДЕМКНИГА». — 2003. — 176 с.
9. *Fitts, C.* Groundwater Science. San Diego, California / C. Fitts. — Academic Press, 2002. — 450 p.
10. *GMS User Manual*, Vol. 1–4, 2014.
11. *Understanding variation in partition coefficient, Kd, values.* Vol. II: Review of Geochemistry and Available Kd Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium, Tritium, and Uranium. EPA (Environmental Protection Agency), US-EPA, Office of Air and Radiation, Washington, USA. EPA 402-R-99-004B. 1999.
12. *Zhang, L.* A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration / L. Zhang, K. Hickel, W.R. Dawes et al. // Water Res. Research. — 2004. — Vol. 40. — W02502. doi:10.1029/2003WR002710.
13. [http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentation\\_31\\_10\\_2013/Sevtinova.pdf](http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentation_31_10_2013/Sevtinova.pdf) (дата просмотра 28.10.2020).

© Кононченко Е.В., Петраш А.Б., Дорофеев А.Н., 2021

Кононченко Елена Владимировна // lena.konon@mail.ru  
Петраш Александр Борисович // A.B.Petrash@yandex.ru  
Дорофеев Александр Николаевич // ANDorofeev@rosatom.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 552.11

Горбатова Е.А., Пирогов Б.И. (ФГБУ «ВИМС»)

### РЕАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД — ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

*Минералогические исследования основных магматических горных пород позволили выявить и проанализировать особенности реакционных структур, являющихся индикаторами изменяющихся условий процессов минералообразования. Наличие реакционных кайм ортопироксен-амфиболового состава свидетельствует о первоначальном присутствии в интрузивных горных породах магматического оливина. Продукты изменения оливина (симплектитовые сростания ортопироксена и амфиболов, серпентин, сапонит, сапонит и гетит) отражают физико-химические параметры процес-*

*сов минералообразования, что позволяет воссоздать постмагматические процессы преобразования горных пород. **Ключевые слова:** продукты изменения оливина, реакционные каймы, симплектитовые сростания ортопироксена и магнетита, индикаторы среды минералообразования.*

Gorbatova E.A., Pirogov B.I. (VIMS)

### REACTION STRUCTURES OF BASIC IGNEOUS ROCKS-INDICATORS OF MINERAL FORMATION CONDITIONS

*Mineralogical studies of the main igneous rocks allowed us to identify and analyze the features of reaction structures that are indicators of changing conditions of mineral formation processes. The presence of reaction rims of orthopyroxene-amphibole composition indicates the initial presence of igneous olivine in intrusive rocks. The products of olivine changes (symplectic accretions of orthopyroxene and amphiboles, serpentine, saponite, saponite, and goethite) reflect the physical and chemical parameters of mineral formation processes,*

which allows us to recreate the post-magmatic processes of rock transformation. **Keywords:** olivine change products, reaction rims, symplectic accretions of orthopyroxene and magnetite, indicators of the mineral formation environment.

### **Актуальность**

Минералогические исследования горных пород юго-восточной части массива Гремяха-Вырмес проводилось с целью выявления и анализа особенностей реакционных структур, являющихся индикаторами изменяющихся условий процессов минералообразования.

Оливин, как наиболее реакционноспособный минерал, неустойчив по отношению к внешним агентам и легко поддается воздействию гидротермальных растворов, метаморфизму низких ступеней и выветриванию. Наиболее широко представлены продукты окисления оливина — магнетит и ортопироксен [10, 14–17], а также продукты низкотемпературного изменения и выветривания — серпентин и брусит, сапонит, сапонит и гетит и др.

Процесс преобразования оливина всегда определяется фугитивностью кислорода, температурой и давлением, которые могут являться индикаторами постмагматических процессов, что обуславливает актуальность их изучения.

### **Методы исследования**

Исследованы магматические горные породы с ильменит-титаномagnetитовой минерализацией юго-восточной части массива Гремяха-Вырмес. Минералогические исследования выполнены в ФГБУ «ВИМС» в соответствии с методическими документами Научного Совета по методам минералогических исследований (НСОММИ).

Оптико-петрографическое и минераграфическое изучение руды проводилось на световом микроскопе Leica DM RX с системой анализа изображения Leica QWin Standard и TomAnalysis.

Элементный состав рудных минералов установлен с помощью электронно-зондового микроанализатора Jeol JXA-8100, оснащенного 3-я волновыми спектрометрами и энерго-дисперсионной приставкой Link Pentafet. Порог обнаружения содержаний химических элементов не превышают 0,2 масс. %.

Рентгенографические исследования выполнены на дифрактометре X'Pert PRO MPD (Cu-K $\alpha$  излучение с графитовым монохроматором). Порог обнаружения кристаллических фаз составляет 0,5–1 %.

### **Объект исследования**

Массив Гремяха-Вырмес расположен в северо-западной части Кольского полуострова, в области сопряжения Приимандровской и Центрально-Кольской зон Кольско-Норвежского мегаблока, сложенного супракрустальными породами кольского (Горяинов, 1976) и кольско-беломорского комплексов архея (Загородный, Радченко, 1983). Массив контролируется западной ветвью глубинного Нясюко-Панского разлома северо-западного простиранья, интрузивная деятельность которого охватывает временной интервал

от архея до верхнего протерозоя. С запада и востока от массива наибольшим распространением пользуются гранат-биотитовые, дистен-биотитовые, биотит-амфиболовые и другие разновидности гнейсов с линзами амфиболитов и согласными прослоями гнейсо-диоритов [3].

Массив в плане имеет форму овала, вытянутого в северо-западном направлении. Он сформирован следующими комплексами пород: гипербазит-базитовым (перидотитов-габбро-анартозитов), ийолитов-нефелиновых сиенитов, щелочных гранитов и граносиенитов, щелочных метасоматитов [3, 5].

Геологический разрез восточного контакта массива Гремяха-Вырмес сложен: ороговикованными породами зоны эндоконтакта, магматическими породами основного и ультраосновного составов, перемежающимися с метасоматически измененными и метаморфическими породами — амфиболитами, плагиоамфиболитами. Основным мотивом строения краевой зоны является многократная смена магматических и метаморфизованных пород с частичными элементами метасоматоза с учетом содержания рудных минералов.

### *Текстурно-структурные особенности горных пород*

Горные породы группы габбро — лейкогаббро, габбро, оливиновое габбро, меланогаббро имеют широкое распространение в геологическом разрезе краевой зоны восточного контакта массива. Макроскопически породы группы габбро большей частью характеризуются пятнистым сложением, обусловленным неравномерным распределением силикатных и фемических минералов и наложенными постмагматическими процессами. Реже наблюдаются породы массивной текстуры. В меланогаббро фиксируется слабовыраженная трахитоидность породы, обусловленная ориентированным расположением длиннопризматических индивидов клинопироксена. Промежутки между их зернами выполнены выделениями плагиоклаза и оливина.

Строение горных пород группы габбро неравномернозернистое, от мелко- до крупнозернистого. В большинстве случаев преобладает мелко- и среднезернистая структура, только в единичном случае для лейкогаббро строение силикатной части породы средне- и крупнозернистое.

Первоначальная габбровая структура претерпела изменения за счет развития реакционных (келифитовых) каемок на границе силикатных минералов и рудных обособлений. Каемки сложены более поздними отложениями — ортопироксеном, гранатом, биотитом и амфиболами. Породы с интенсивным развитием реакционных каемок, сложенных поликристаллической гранатовой оболочкой, характеризуются друзитовым строением.

Участками наблюдается пойкилитовое строение, обусловленное включениями зерен апатита в плагиоклазе, клинопироксене, оливине и рудных минералах. Структура замещения проявляется в развитии вторичных минералов — иддингсита, боулингита и серпентина по трещинам в агрегатах оливина.

Проявление рудной минерализации в породах характеризуется следующими структурами: мелкозернистой (вкрапленной), сидеронитовой. При этом следует учитывать, что гетерогенность рудных образований определяется разнообразием структур распада твердых растворов (РТО) вплоть до симплектитов. Сидеронитовая структура большей частью проявляется в меланократовых породах, поскольку с ними связаны значительные содержания рудных минералов, заполняющих промежутки между зернами силикатов.

#### *Минеральный состав горных пород*

Горные породы группы габбро сложены близким набором минералов — плагиоклаза (13–80 %), оливина (до 30 %), клинопироксена (5–31 %), апатита (5–15 %), рудной минерализацией (2–20 %) и вторичными образованиями (3–29 %). На основе проведенных исследований нами прослежено изменение минерального состава горных пород, что позволяет высказать предположение о возможной эволюции горных пород и процессов рудообразования.

**Плагиоклаз** является самым распространенным силикатным минералом и встречается во всех горных породах группы габбро краевой зоны. Содержание его изменяется от 63 в лейкогаббро до 14 % в меланогаббро соответственно.

По результатам рентгеноспектрального микроанализа показано, что содержание анортитового компонента в плагиоклазе колеблется от 38 до 42 %, что соответствует составу андезина (табл. 1).

Плагиоклазы образуют ксеноморфные, реже таблитчатые зерна размером до 4,0 мм. Часто зерна плагиоклаза характеризуются блоковым строением, наблюдаются тонкие полисинтетические двойники по альбитовому закону. Участками встречаются зерна с клиновидными двойниками по периклиновому закону. При сочетании в зернах плагиоклаза разных двойников наблюдается пересечение, выраженное в перпендикулярном расположении одной части зерна с двойниками по альбитовому закону относительно другой части зерна с двойниками по периклиновому закону.

**Клинопироксен** совместно с оливином образует меланократовую часть горных пород, его содержание по результатам оптико-петрографического анализа возрастает от лейко- (9 %) до меланогаббро (31 %). По химическому составу клинопироксен относится к группе

**Таблица 1**

**Химический состав плагиоклаза по данным РСМА, масс. %**

Компоненты	Лейкогаббро	Габбро (мезогаббро)	Оливиновое габбро	Меланогаббро
SiO <sub>2</sub>	58,77	57,75	57,62	58,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,54	27,14	27,46	26,41
CaO	7,72	8,34	8,41	8,05
Na <sub>2</sub> O	6,90	6,77	6,54	6,62
K <sub>2</sub> O	0,07	0,00	0,07	0,00



**Рис. 1. Реакционные каймы на границе плагиоклаза и оливина: а — проходящий свет, николи параллельны; б — проходящий свет, николи скрещены**

авгита, при содержании TiO<sub>2</sub> более 0,7 % — к титанавгиту (рис. 1).

Для клинопироксена характерно призматическое строение, реже ксеноморфное. Размер длиннопризматических зерен по удлинению достигает 5 мм. В минерале отмечаются многочисленные пластинчатые и игольчатые выделения ильменита, параллельно ориентированные по диаляговой отдельности. Редко фиксируются пойкилитовые включения ортопироксена.

**Оливин** в основном встречается в оливиновом габбро (13–16 %) и меланогаббро (28–30 %). Результаты рентгеноспектрального микроанализа показали, что по содержанию фаялитового компонента (49–56 %) оливин относится к гиалосидериту-гортонолиту (табл. 3).

Оливин присутствует в виде ксеноморфных зерен и минеральных агрегатов размером до 3,0 мм. Часто разбит трещинами, выполненными рудными или вторичными минералами. Зерна оливина частично или полностью замещены вторичными минералами.

К второстепенным минералам горных пород группы габбро относятся ортопироксен, амфиболы, слюды, хлорит, серпентин, иддингсит, боулингит,

**Таблица 2**  
Химический состав клинопироксена по данным PCMA, масс. %

Компоненты	Лейкогаббро	Габбро	Оливиновое габбро	Меланогаббро
SiO <sub>2</sub>	52,47	51,60	52,07	52,46
TiO <sub>2</sub>	—	0,78	0,34	0,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,26	2,31	1,59	2,21
CaO	22,34	18,86	20,88	20,89
FeO	9,06	10,98	10,26	7,87
MgO	12,95	14,53	14,04	15,39
MnO	0,24	0,42	0,38	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,67	0,53	0,44	0,56

**Таблица 3**  
Химический состав оливина по данным PCMA, масс. %

Компоненты	Лейкогаббро	Оливиновое габбро	Меланогаббро
MgO	23,16	23,01	27,56
FeO	38,14	41,65	36,87
MnO	0,47	0,70	0,59
SiO <sub>2</sub>	33,62	34,63	34,98

кальцит, скаполит, цоизит, гранаты, шпинель. Рудные минералы в породах группы габбро представлены ильменитом, магнетитом и в меньшей степени сульфидами — пирротинитом, халькопиритом и пиритом. Соотношение рудных минералов различное.

#### Результаты исследования

Во всех горных породах группы габбро наблюдаются реакционные (келифитовые) каймы, сложенные ромбическим пироксеном и амфиболом. Участками между зернистыми выделениями ортопироксена и амфибола фиксируется более поздний биотит. Такие каймы обычно формируются на структурных границах зерен оливина и плагиоклаза в результате интергранулярных (межзерновых) реакционно-кристаллизационных процессов (рис. 1).

Формирование большинства типичных реакционных структур в габброидах обычно происходит в статическом режиме в условиях фации гранатовых амфиболитов. Оно осуществляется при малой подвижности летучих компонентов и относительно небольшом их количестве. В результате на границах между магматогенными зернами оливина и плагиоклаза образуется полими-

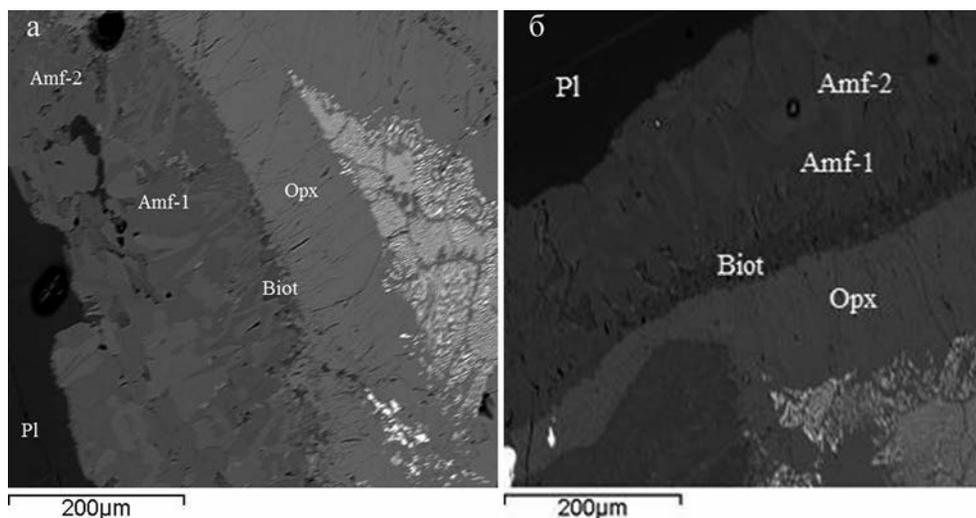
неральная кайма с резкой фазовой гетерогенностью, повторяя очертания замещаемых зерен-реагентов. Тем самым они сохраняют контуры протоструктур, типичных для кристаллизации минералов из магматического расплава [8].

Развитие реакционной каймы начинается непосредственно на общих граничных поверхностях реагентов — оливина и плагиоклаза. Дальнейшее формирование структуры происходит за счет встречной диффузии реагирующих компонентов через кайму новообразованных кристаллических фаз. Уменьшение размеров зерен-реагентов является следствием разрастания реакционной каймы в обоих направлениях [8].

Оптико-петрографические исследования пород группы габбро позволили выявить последовательность выделения минералов в каймах между оливином и плагиоклазом: *гортнолит* → *ортопироксен энстатит-ферросилитового ряда* → *Amf-1 + Amf-2 (амфиболы двух видов)* → *андезин* (рис. 2, табл. 4). Центральная часть реагента — оливина — характеризуется разной степенью преобразования и представлена симплектитовыми сростками магнетита и ортопироксена (иногда с реликтами оливина) или зернами оливина с вторичными продуктами его изменения (серпентином, иддингситом и боулингитом).

Отмечается зависимость между мощностью каймы и степенью изменения зерен оливина. С глубиной мощность реакционной каймы сокращается, а зерна оливина подвержены только частичным изменениям (рис. 3).

Исследования горных пород группы габбро показали, что к наиболее распространенным продуктам изменения оливина относятся симплектитовые сростания магнетита и ортопироксена, являющиеся продуктами окислительного «распада» оливина при снижении температуры. Окисление оливина сопровождается одновременным возникновением двух новых фаз, кристаллические структуры которых значительно отличаются от кристаллической структуры исходного



**Рис. 2. Строение реакционной каймы:** *Opx* — ортопироксен, *Amf* — амфибол, *Biot* — биотит, *Pl* — плагиоклаз. Изображение в обратно-рассеянных электронах

Таблица 4

Химический состав минералов реакционных кайм (по данным РСМА, масс. %)

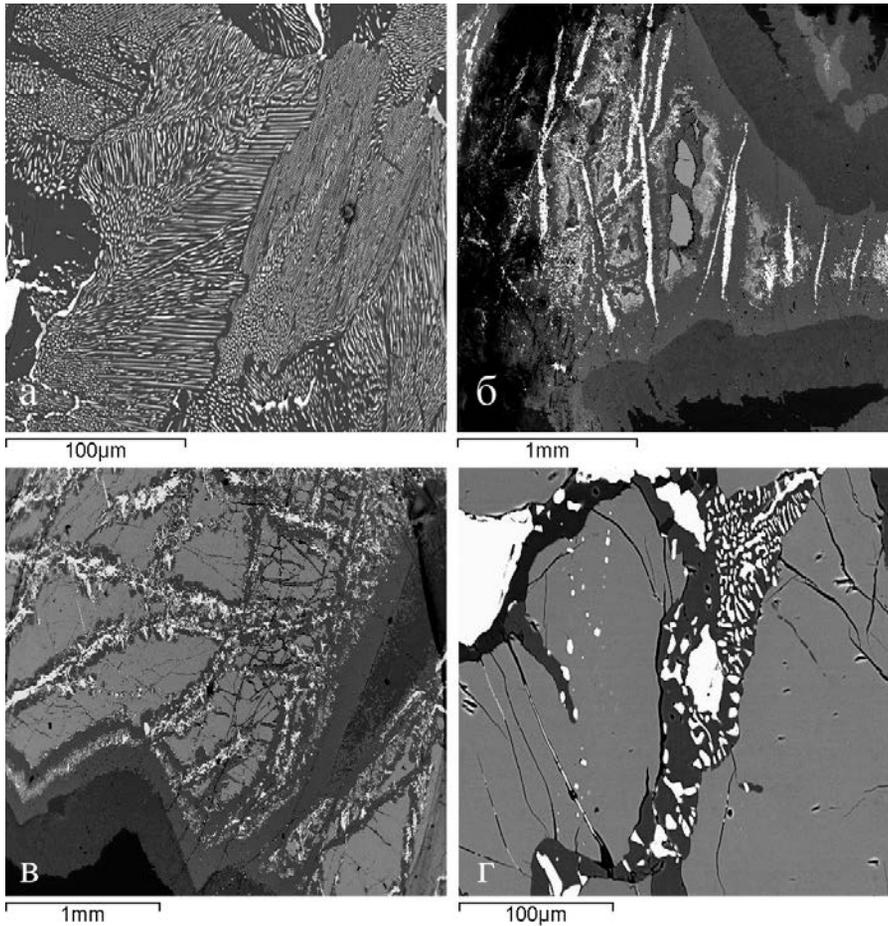
Глубина	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	CoO
<b>Оливин (Ol)</b>												
039	0,00	23,89	0,00	35,03	0,02	0,01	0,05	0,07	0,03	0,60	39,65	0,65
	0,00	24,71	0,00	35,13	0,01	0,00	0,03	0,03	0,09	0,71	38,77	0,52
214	0,18	22,58	0,30	34,22	0,00	0,03	0,03	0,05	0,06	0,69	41,59	0,26
	0,03	23,85	0,39	34,25	0,00	0,04	0,00	0,05	0,00	0,72	40,38	0,29
264	0,04	27,65	0,00	36,02	0,00	0,11	0,05	0,14	0,00	0,73	35,26	0,00
	0,02	27,57	0,01	35,53	0,00	0,09	0,03	0,07	0,00	0,66	36,02	0,00
<b>Ортопироксен (Orx)</b>												
039	0,07	17,88	0,92	51,67	0,02	1,07	0,13	0,00	0,00	0,64	27,32	0,28
	0,24	21,62	0,81	52,53	0,08	0,00	0,03	0,00	0,00	0,63	23,87	0,20
214	0,15	22,71	0,69	56,74	0,00	0,18	0,00	0,03	0,00	0,40	19,11	0,00
	0,03	22,43	0,59	52,75	0,00	0,17	0,02	0,03	0,19	0,52	23,26	0,00
264	0,01	24,41	0,46	54,12	0,00	0,26	0,08	0,00	0,00	0,78	19,88	0,00
	0,03	24,19	0,26	53,69	0,05	0,26	0,00	0,00	0,00	0,64	20,88	0,00
<b>Амфиболы (Amf)</b>												
039	2,72	9,98	12,64	41,68	0,71	11,11	1,57	0,28	0,00	0,19	17,01	0,19
	3,29	11,81	17,89	40,33	0,36	9,95	0,00	0,00	0,03	0,36	14,20	0,22
	3,28	14,96	19,10	39,88	0,02	0,49	0,10	0,00	0,00	0,47	19,18	0,39
	3,23	15,30	18,48	39,88	0,00	0,55	0,03	0,00	0,01	0,54	19,38	0,45
214	2,68	11,37	17,74	38,62	0,82	10,08	0,00	0,00	0,04	0,30	12,33	0,13
	2,59	12,68	11,81	42,45	0,99	11,79	3,40	0,09	0,00	0,27	12,38	0,00
	0,35	18,05	14,30	40,43	0,00	0,13	0,00	0,09	0,01	0,32	23,46	0,00
	0,58	16,52	18,36	35,85	0,01	0,35	0,00	0,00	0,00	0,60	24,60	0,14
264	3,46	12,88	17,80	41,14	0,27	10,55	0,13	0,00	0,00	0,18	12,23	0,00
	3,45	11,03	18,44	40,33	0,34	10,54	0,00	0,00	0,00	0,31	14,03	0,00
<b>Биотит (Biot)</b>												
21,5	0,45	14,97	19,09	37,51	10,03	0,17	0,25	0,00	0,08	0,00	17,44	0,00
	0,34	15,23	18,65	37,23	9,98	0,15	0,31	0,00	0,03	0,00	17,89	0,18

оливина. Такие изменения требуют перестройки структуры оливина, которая возможна на краях зерен или в дислоцированной структуре, но маловероятна в участках ненарушенной структуры минерала [2, 4].

Скорость реакции окисления определяется фугитивностью кислорода и температурой, от которой зависят разность свободной энергии между фазами и скорости диффузии. Для равновесных условий превращения оливина с низким содержанием фаялитового минерала необходимы повышенные значения фугитивности кислорода ( $10^{-19}$  —  $10^{-7}$  атм.) и температур (550–1000 °С). «Чистый» фаялит в равновесных условиях не пересекает границы поля устойчивости ассоциации оливин + пироксен + магнетит. Если при охлаждении отклонение от равновесия будет увеличиваться, то глубина диффузии сократится, и окисление будет проявляться в локальном масштабе внутри кристалла [6, 20].

В горных породах группы габбро симплектитовые сростания по морфологическим особенностям подразделяются на две основные группы: глобулярные, представленные минеральными индивидами магнетита с изометричными, каплевидными или эллипсоидными очертаниями в ортопироксене (рис. 3г); ламеллярные, образующие сростания пластинчатых зерен магнетита и ортопироксена (рис. 3а). Между глобулярными и ламеллярными морфологическими разновидностями симплектитовых сростаний прослеживаются промежуточные разности этих минералов (рис. 3б, в). Разнообразие морфологических особенностей сростаний определяется длительностью стадийности их формирования и скоростью реакции окисления и нуклеации.

Процесс серпентинизации связан с гидратацией оливина и образованием серпентина и брусита. Реакция богатого железом брусита с водным кремнеземом



**Рис. 3. Продукты изменения оливина — симплектитовые сростки магнетита и ортопироксена (от полного до начального замещения): а — глубина 39 м; б — 50 м; в — 214 м; г — 264 м. Изображение в обратно-рассеянных электронах**

сопровождается выделением серпентина и магнетита (рис. 4). Согласно результатам термодинамических расчетов, максимальная температура реакции от 360 до 410 °С при варьировании давления от 150 до 3000 атм. Дальнейшее повышение давления до 10 000 атм. приводит к ее возрастанию только на 10 °С. Серпентинизация природных оливинов, содержащих Fe, обычно протекает при более низкой температуре, чем в случае чистого форстерита [6, 20].

Минеральные агрегаты, такие как иддингсит и боулингит [11, 12], являются продуктами изменения оливина (рис. 4). Боулингит (сапонит) в тонком сечении выглядит «как слюдястый мелкозернистый агрегат, в котором отдельные чешуйки обычно распределены случайным образом» [12]. Он рассматривается как продукт изменения оливина, образующийся в неокислительных условиях [19]. Когда среда минералообразова-

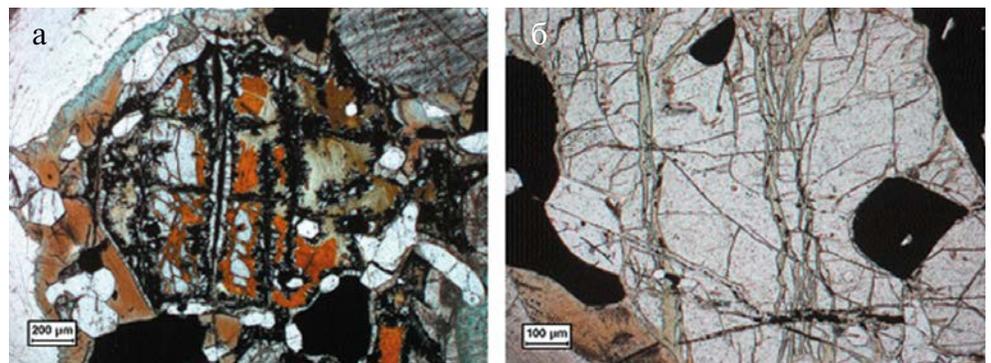
ния становится окислительной, сам боулингит превращается в сложную смесь, содержащую гетит и сапонит. Иддингсит не является минералом с определенной структурой и химическим составом и не рассматривается как простое субмикроскопическое срастание двух или более минералов. Он состоит из смеси гетита и сапонита, в которой оси X, Y и Z гетита и оси Z, X и Y глины параллельны осям X, Y и Z оливина [18]. Эти кристаллографические соотношения предполагают, что иддингсит образует эпитактические или топотактические срастания [1, 9, 13].

Образование иддингсита не зависит от исходного состава оливина, а определяется степенью окисления и содержанием воды. Богатые водой магмы являются предпосылкой для образования иддингсита [7]. Превращение оливина в иддингсит происходит в сильно окислительных условиях при низком давлении и средних температурах (<400 °С). Развиваться иддингсит по оливину начинает с периферии и по трещинам зерен, постепенно проникая вовнутрь. В процессе иддингситизации внутренняя структура или химический состав оливина изменяется, а его

внешняя форма сохраняется. Состав иддингсита, начиная с исходного кристалла оливина, подвержен постоянным изменениям и проходит через многие стадии структурных и химических преобразований [1].

#### Выводы

Наличие реакционных кайм ортопироксен-амфиболового состава на структурных границах двух реагентов, одним из которых является плагиоклаз, свидетельствует о первоначальном присутствии в интрузивных горных породах магматического оливина.



**Рис. 4. Замещение оливина: а — иддингситом и боулингитом; б — серпентином. Проходящий свет, николи параллельны**

Продукты изменения оливина (симплектитовые срастания ортопироксена и амфиболов, серпентин, сапонит, сапонит и гетит) отражают параметры процессов минералообразования. Поэтому, зная степень изменения оливина и состав вторичных минералов, можно воссоздать постмагматические процессы преобразования горных пород.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гей, П. Некоторые наблюдения по иддингситу / П. Гей, Р.В. Ле Мэтр // Американский минералог. — 1961. — № 46. — С. 92–111.
2. Ефимов, А.А. Магнетит-ортопироксеновые симплектиты в уральских габбро: структурный след окисления оливина / А.А. Ефимов, К.Н. Малич // ЗРМО. — 2010. — № 5. — С. 18–28.
3. Осокин, А.С. Размещение и вещественный состав апатит-титаномагнетит-ильменитовых руд массива Гремяха-Вырмес / А.С. Осокин. — Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1987. — 90 с.
4. Патнис, А. Основные черты поведения минералов: Пер. с англ. / А. Патнис. — М.: Мир, 1983. — 304 с.
5. Полканов, А.А. Массив Гремяха-Вырмес на Кольском полуострове / А.А. Полканов. — М.: Наука, 1967. — 236 с.
6. Хитаров, Н.И. Процесс серпентинизации и связанные с ним вопросы / Н.И. Хитаров, В.Я. Леонидов, В.А. Пугин // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. — Л.: Наука, 1967. — С. 194–210.
7. Эдвардс, Эндрю. Формирование Иддингсайта. О минерале / Эндрю Эдвардс // Американский минералог. — 1938. — С. 277–281.
8. Япаскурт, В.О. Структурогенез статического метаморфизма: Учеб. пособие / В.О. Япаскурт. — М.: Изд-во МГУ, 2004. — 152 с.
9. Brown, G. A structural study of iddingsite from New South Wales, Australia / G. Brown, I. Stephen // Amer. Mineral. — 1959. — № 44. — P. 251–259.
10. Champness, P.E. Nucleation and growth of iron oxides in olivines, (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. / P.E. Champness // Mineral Mag. — 1970. — № 37. — P. 790–800.
11. Deer, W.A. Rockforming Minerals / W.A. Deer, R.A. Howie, J. Zussman, 1962. — Vol. 1. — 333 pp.
12. Delvigne, J. Olivines, their pseudomorphs and secondary products / J. Delvigne, E.V.A. Bisdom, J. Sleeman, G. Stoops // Pedologie. — 1979. — № 29. — P. 247–309.
13. Eggleton, R.A. (1984) Formation of iddingsite rims on olivine: A transmission electron microscope study / R.A. Eggleton // Clays & Clay Minerals. — 1984. — № 32. — P. 1–11.
14. Kitamura, M. Fine textures of laihunite, a nonstoichiometric distorted olivine-type mineral / M. Kitamura, B. Shen, S. Banno, N. Morimoto // Am Mineral. — 1984. — № 69. — P. 154–160.
15. Kohlstedt, D.L. An electron microscopy study of naturally occurring oxidation produced precipitates in iron-bearing olivines / D.L. Kohlstedt, J.B. Vander Sande // Contrib Mineral Petrol. — 1975. — № 53. — P. 1354.
16. Putnis, A. Electron petrography of high-temperature oxidation in olivine from Rhum layered intrusion / A. Putnis — Mineral Mag. — 1979. — № 43. — P. 293–296.
17. The alteration of olivine in basaltic and associated lavas Part 1: High temperature alteration / S.E. Haggerty, I. Baker // Contrib Mineral and Petrol. — 1967. — 16. — P. 233–257.
18. Weathering of basalt: formation of iddingsite / K.L. Smith, A.R. Milnes, R.A. Eggleton // Clays and Clay Minerals. — 1987. — Vol. 35. — No. 6. — P. 418–428.
19. Wilshire, H.G. (1958) Alteration of olivine and orthopyroxene in basic lavas and shallow intrusions / H.G. Wilshire // Amer. Mineral. — 1958. — № 43. — P. 120–147.
20. Wolfgang, Bach. Unraveling the sequence of serpentinization reactions: petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15N (ODP Leg 209, Site 1274) / Wolfgang Bach, Holger Paulick, Carlos J. Garrido, Benoit Ildefonse, William P. Meurer, Susan E. Humphris // Geophysical research letters. — 2006. — Vol. 33. — P. 13306.

© Горбатова Е.А., Пирогов Б.И., 2021

Елена Александровна Горбатова // lena\_gorbatova@mail.ru  
Борис Иванович Пирогов // pirogov\_bi@inbox.ru

Лихникевич Е.Г., Ожогина Е.Г., Пермякова Н.А.  
(ФГБУ «ВИМС»)

#### МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД

*На основании детальных минералогических исследований для редкометалльных руд Томторского и Чуктуконского месторождений установлены прогнозные критерии, определяющие выбор технологий их переработки: 1 — сложный морфоструктурный состав (переменный гранулярный состав, значительное количество тонкодисперсных и метаколлоидных образований, сформированных минеральными индивидами и агрегатами микро- и нанометрового размера), фазовая гетерогенность минеральных зерен, обусловленная различными причинами; 2 — переменный химический состав рудообразующих минералов, вызванный изоморфными замещениями атомов химических элементов в их кристаллической структуре; 3 — полиминеральный состав, связанный с одновременным присутствием минералов разных парагенетических ассоциаций. Установленные прогнозные минералогические критерии выбора технологий переработки редкометалльных руд позволяют обосновать оптимальные пути извлечения полезного компонента и обеспечивать комплексную переработку руд. **Ключевые слова:** редкометалльные руды, гранулярный состав, пирохлор, монацит, минералы группы крадаллита, гидрометаллургические технологии.*

Likhnikovich E.G., Ozhogina E.G., Permyakova N.A. (VIMS)

#### MINERALOGICAL FORECAST OF CHOICE TECHNOLOGIES FOR PROCESSING RARE METAL ORES

*On the basis of detailed mineralogical studies for rare-metal ores of the Tomtor and Chuktukon deposits, forecast criteria are established that determine the choice of technologies for their processing: 1 — complex morphostructural composition (variable granular composition, significant number of fine-disperse and metacolloid formations formed by mineral individuals and micro- and nanometer-sized aggregate), phase heterogeneity of mineral grains caused by various reasons; 2 — variable chemical composition of ore-forming minerals caused by isomorphic substitutions of the atoms of chemical elements in their crystal structure; 3 — polymineral composition associated with the simultaneous presence of minerals of different paragenetic associations. The established predictive mineralogical criteria for the selection of technologies for processing rare metal ores allow us to justify optimal ways to extract a useful component and ensure the complex processing of ores. **Keywords:** rare metal ores, granular composition, pyrochlore, monazite, crandallite group minerals, hydrometallurgical technologies.*

Использование редких металлов в современных наукоемких отраслях и технологиях определяет динамичное расширение их потребления в экономически