

УДК 552.111

И.И. Чайковский¹, В.А. Корякин², Е.П. Чиркова¹

¹Горный институт УрО РАН, г. Пермь

²Пермский государственный национальный
исследовательский университет, г. Пермь

О МЕХАНИЗМАХ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ПЕТРОГЕННЫХ И РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛОСЧАТО-ВКРАПЛЕННЫХ РУДАХ РУДНИКА «СКАЛИСТЫЙ» ТАЛНАХСКОГО РУДНОГО УЗЛА

Охарактеризованы полосчато-вкрапленные руды, для которых показано проявление силикатно-оксидного (оливин, шпинель, плагиоклаз) фракционирования, силикатно-сульфидной и халькопирит-пирротиновой несмесимости. Установлено накопление в сульфидном расплаве не только флюидов (Cl, P, H₂O, O₂), но и петрогенных компонентов (SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, FeO, MgO, CaO, K₂O) которые вызывают во вмещающих породах окисление железа, появление гидроксилсодержащих минералов и проявление различных типов метасоматических реакций, мобилизацию и пространственное перераспределение благородных металлов и халькофильных элементов.

Ключевые слова: Талнахская интрузия, вкрапленные руды, магматические и постмагматические процессы

DOI: 10.17072/chirvinsky.2025.167

Для выявления процессов дифференциации, проявившихся в силикатных и сульфидных расплавах, были исследованы вкрапленные руды рудника «Скалистый» с глубины около 1600 м. Талнахский интрузив является типичным представителем рудоносных массивов норильского типа, который дифференцирован от пикритовых габбро-долеритов в подошве до габбро-диоритов в кровле (ссылка). Вкрапленные руды приурочены к нижней части рудоносной интрузии (пикритовые и такситовые габбро-долериты). Исследование химического и минерального состава проводилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20 (Tescan, Чехия).

В отличие от типичных «капельников» сульфидные обособления не только расслоены на пирротиновую (нижнюю) и халькопиритовую (верхнюю) части иногда пространственно разобщенные, но и вытянуты согласно неясной полосчатости габброидов, особенно крупные (рис. 1). В кровле мелких округлых и крупных вытянутых сульфидных агрегатов присутствует оторочка мелкозернистой породы шириной до 2 см,

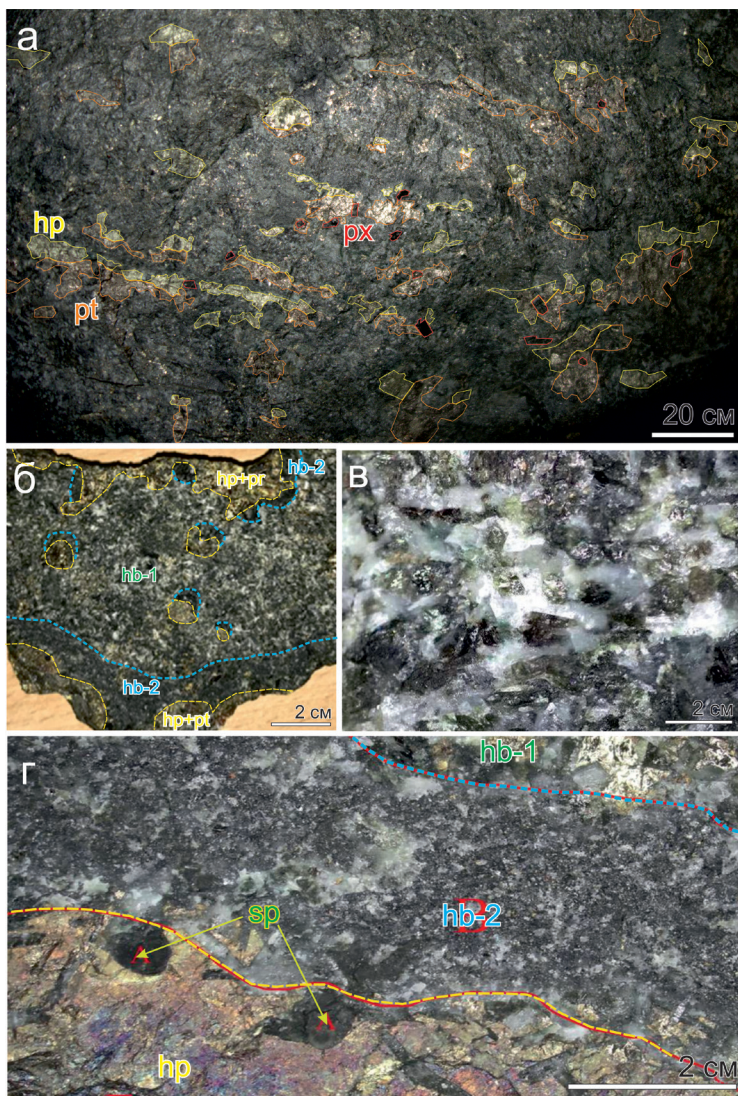


Рис. 1. Общий вид и детали строения оруденелых габброидов: а – полосчато-вкрапленные сульфидные обособления расслоившиеся на пирротиновые (pt) и халькопиритовые (hp) агрегаты и вкрапленность крупных кристаллов пироксена (px); б – взаимоотношение троктолита (hb-1), сульфидных обособлений и ореола мелкозернистой метасоматической породы (hb-2) над ними; в – детали строения троктолита; г- сферолиты серпентина (sp) на контакте халькопирита и метасоматической породы

образование которой Э.М. Спиридонов [4] связывает с воздействием на основную породу флюида, отделившегося от сульфидного расплава.

Основная масса габброида сложена среднезернистыми неясными темными и светлыми полосами, позволяющими отнести породу к троктолиту (рис. 2). Первые представлены зернами трещиноватого субизометричного оливина и шпинелью со сглаженными очертаниями, вторые – битовнитом. Кроме того отмечены отдельные зерна энстатита и его реакционные каймы с магнетитом на оливине, актинолит (с магнетитом) по оливину, изометричные зерна ильменита с фрагментами магнетитовой каймы, мелкие каплевидные агрегаты сульфидов (пирротина, халькопирита, петландита). Ксеноморфный хлорапатит отмечается

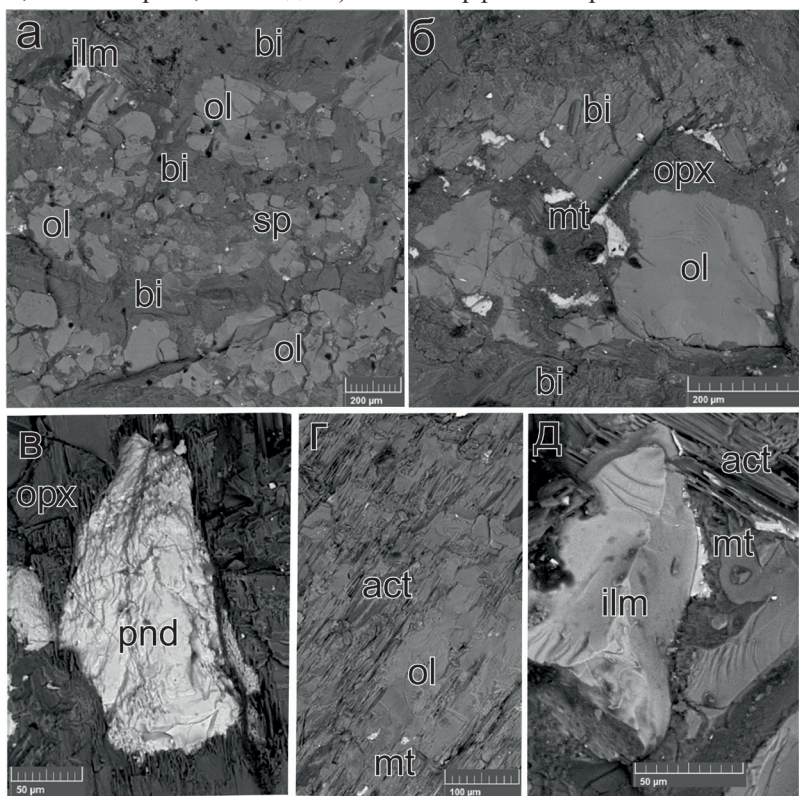


Рис. 2. Детали строения троктолита: а – неясно полосчатое строение, обусловленное неравномерным распределением оливина (ol), шпинели (sp) и битовнита (bi); б – реакционная кайма ортопироксена (opx) и магнетита (mt) на оливине; в – коррозионные отношения ортопироксена и пентландита (pnd); г – актинолит (act) и магнетит по оливину; д – магнетитовая кайма на ильмените (ilm)

в виде отдельных зерен, но чаще тяготеет к сульфидным обособления (пирротиновым и халькопиритовым).

Мелкозернистые каймы над сульфидными обособлениями содержат наряду с реликтовыми минералами троктолитов (оливин, шпинель, ильменит) собственные: анортит, халькопирит, флогопит и серпентин (табл. 1, рис. 3). Оливина становится существенно меньше (за счет замещения актинолитом, серпентином и флогопитом), а доля реликтовой шпинели увеличивается. Здесь же отмечен магнетит с вростками бадделеита. Мелкозернистые породы по сравнению с исходными обеднены кремнием, кальцием и натрием (табл. 2, рис. 4)

Таблица 1

Сопоставление кристаллохимических формул минералов в первичной породе и измененных оторочках

Минерал	Реальная формула	
	Среднезернистая основная масса	Мелкозернистая оторочка
Оливин	Fe ₇₂	Fe ₇₀₋₇₃
Плаггиоклаз	An ₇₁	An ₉₁
Энстатит	(Fe _{0,32-0,49} Ca _{0,02} Mg _{1,50-1,62} Na _{0,02-0,09})Si _{1,91-2,07} O ₆	-
Ильменит	(Fe _{0,88-0,99} Mg _{0,06-0,18} Mn _{0,02-0,04})(Ti _{0,92} V _{0,01})O ₃	-
Шпинель	(Mg _{0,67} Fe _{0,15})(Al _{1,85} Fe _{0,31})O ₄	(Mg _{0,65} Fe _{0,17})(Al _{1,82} Fe _{0,34})O ₄
Актинолит	(Ca _{1,41} Na _{0,41})(Mg _{3,63} Fe _{1,37})(Al _{1,21} Si _{6,83} O _{22,6} (Cl _{0,08} OH _{1,92}))	+
Хлорапатит	Ca _{4,85-4,96} (P _{2,93-3,11} O ₁₂)(Cl _{0,95-0,96})	-
Фторапатит	Ca _{4,89-5,34} (P _{3,12} O _{11,54-11,99})(Cl _{0,12-0,39} F _{0,50-0,60} OH _{0,38})	-
Пирротин	Fe _{0,90-0,98} S _{1,01-1,1}	-
Пентландит	(Fe _{4,36} Ni _{4,27})S _{8,37}	-
Халькопирит		Cu _{0,91-0,96} Fe _{0,99-1,03} S _{2,01-2,10}
Серпентин	-	(Mg _{2,71-2,86} Fe _{0,08-0,14})(Si _{1,96-2,01} Al _{0,03-0,07} O _{4,87-5,18})(Cl _{0,02-0,08} OH _{3,92-3,98})
Флогопит	-	(K _{0,63-0,87} Na _{0,11-0,16})(Mg _{2,38-2,86} Ti _{0,04} Fe _{0,56-0,76})(Si _{2,87-3,54} Al _{1,31-1,63} O ₁₆)(Cl _{0,12} OH _{1,88})

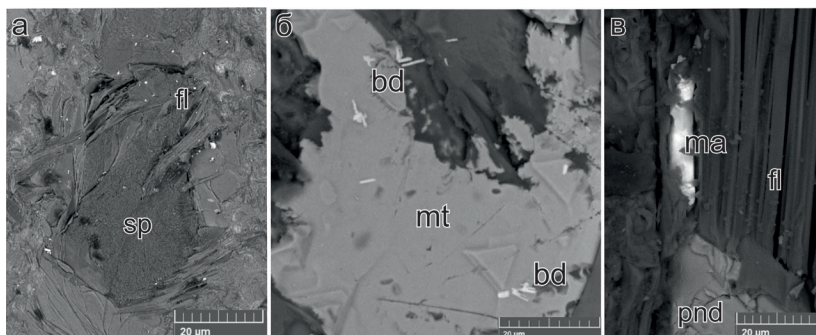


Рис. 3. Детали строения метасоматической породы: а – псевдоморфозы серпентина (sp) и флогопита (fl) по оливину; б – магнетит (mt) с вкрапленностью бадделейта (bd); в – майчнерит (ma) в флогопите вблизи пентландита (pnd)

Таблица 2
Результаты валового анализа
крупнозернистого троктолита (кз) и
мелкозернистой метасоматической
породы (мз), мас. %

	кз	мз
O	43,57	44,93
Si	20,70	15,62
Ti	0,23	0,23
Al	9,25	14,09
Fe	9,14	8,85
Mg	6,59	7,26
Mn	0,16	0,13
Ca	6,48	5,40
Na	1,61	0,75
K	0,88	1,37
S	0,62	0,50
Cl	0,57	0,65
Cu	0,19	0,32

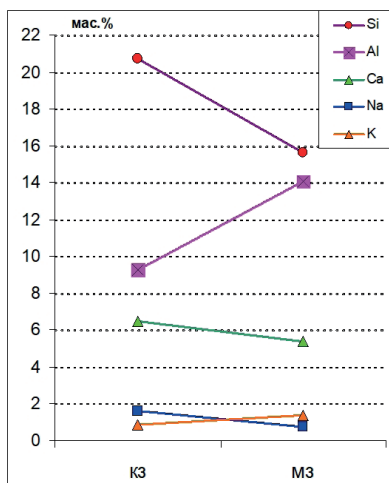


Рис. 4. Поведение элементов в процессе метасоматоза базитов на контакте с сульфидными обособлениями

В крупных сульфидных обособлениях отмечены укрупненные зерна плагиоклаза замещенного по периферии хлоритом, а также поздние секущие прожилки флогопита (рис. 5). На границе с мелкозернистой породой отмечены сферолиты серпентина вставшие в сульфидную массу. По периферии мелких изометричных сульфидных «капель» нередко отмечаются кристаллы ильменита, ростки апатита (рис. 6).

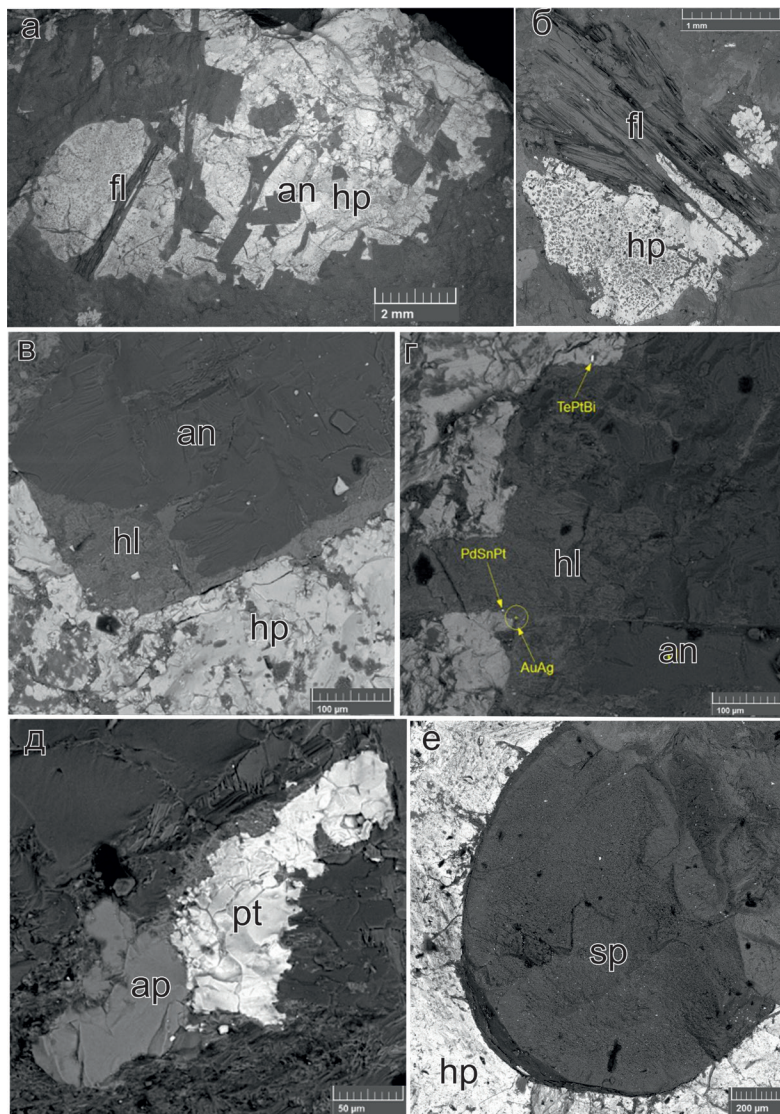


Рис. 5. Минералы приуроченные обособлениям сульфидов; а– крупное выделение халькопирита (hp) с вростками флогопита (fl) и анортита (an); б– сросток флогопита и халькопирита; в, г – реакционная хлоритовая кайма (рл) на вростке анортита (an) в сульфидной массе и приуроченные к ней включения электрума (Au,Ag), рустенбургита (Pd,Pt,Sn) и мончеита (Te,Pt,Bi); д – хлорапатит (ap) на контакте с пиротином (pt); е – сферолит серпентина (sp) врастающий в скопление халькопирита

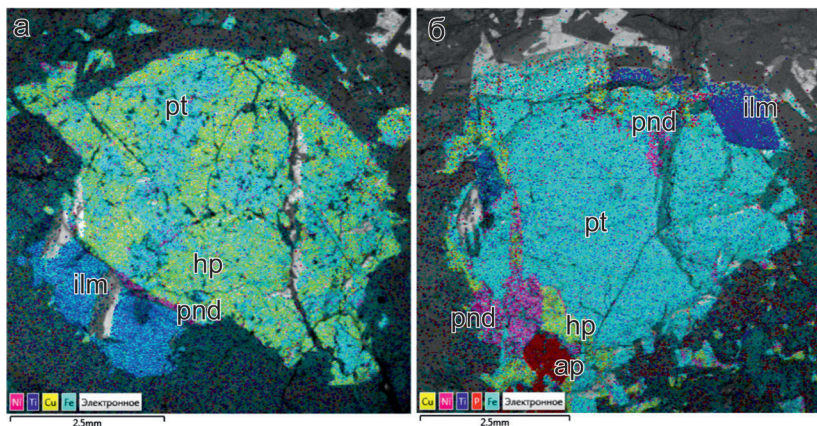


Рис. 6. Мелкие каплевидные сульфидные обособления (а, б) и их минералы: пирротин (pt), халькопирит (hp), пентландит (pnd), хлор-апатит (ap) и ильменит (ilm)

Во вкрапленных рудах зафиксировано большое число микровключений (0,2-2 мк) интерметаллидов, теллуридов, сульфидов и оксидов, большинство из которых локализовано в пределах пирротина, халькопирита и пентландита или вблизи них (табл. 3).

Таблица 3

Реальные формулы микроминералов и их пространственная локализация

Минерал-включение	Реальная формула	Вмещающий минерал*				
		1	2	3	4	5
Паоловит	$Pd_{1,33-1,34}Sn_{0,65-0,67}$	+				
Рустенбургит	$(Pt_{0,25-0,26}Pd_{2,41-2,44})Sn_{1,30-1,34}$	+				
?	$Pb_{1,03-1,26}Ag_{1,07-1,40}Se_{0,94-1,14}Te_{0,52-0,63}$	+				
Pd-Мончеит	$Pd_{0,92}Pt_{0,04-0,19}(Te_{0,84-0,85}Bi_{0,78-0,79}As_{0,0-0,26})$	+			+	
Майчнерит	$Pd_{1,01-1,03}Bi_{0,95}Te_{1,02-1,04}$	+	+			
Гессит	$Ag_{1,92-2,07}Te_{0,93-1,08}$	+	+	+		
Котульскит	$Pd_{1,02-1,13}(Te_{0,36-0,70}Bi_{0,48-0,61}Sn_{0,0-0,14})$		+			
Галенит	PbS		+			
Бисмуклит	$Bi_{0,99}Cl_{1,02}O_{0,99}$		+			
Мончеит	$Pt_{0,92-1,04}(Te_{1,56-1,61}Bi_{0,43-0,76})$		+	+		
Сопчеит	$Ag_{3,02-3,33}Pd_{3,35-3,54}Te_{4,30-4,43}$			+		
Соболевскит	$Pd_{0,94-0,96}Bi_{0,82-0,83}Te_{0,03-0,15}Sb_{0,06-0,07}$			+		
Электрум	$Au_{0,51-0,60}Ag_{0,40-0,49}$			+		+

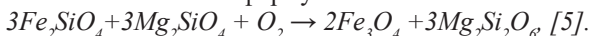
* 1-пирротин, 2-халькопирит 3- пентландит, 4-флогопит, 5-энстатит

Общие текстурные особенности руд, реальные кристаллохимические формулы минералов и их пространственные взаимоотношения позволяют показать проявление следующих процессов.

1. Наличие шпинели в описываемых рудах говорит о пересыщении глиноземом, вероятно связанным с фракционной природой самих троктолитов.

2. Вытянутость крупных сульфидных обособлений вдоль неясной полосчатости и их расслоение на пирротиновую и халькопиритовую части, иногда пространственно разобщенные, говорит о преобладании на руднике «Скалистом» латерального течения расплава и проявлении силикатно-сульфидной и пирротин-халькопиритовой жидкостной несемимости уже во время течения. О постепенном затвердевании расплава во время течения может говорить трещиноватость части зерен оливина.

3. Замещение оливина ортопироксеном и магнетитом в троктолите идущее с уменьшением железности (f_{ol} -28, $f_{орп}$ -21), свидетельствует о проявившемся после кристаллизации основной силикатной массы окислении и может быть описано формулой:



4. Замещение оливина (f-28) актинолитом (f-27) подтверждается незначительным количеством образовавшегося магнетита и отражает привнос флюида с кальцием, алюминием, хлором и гидроксил-ионом.

5. Коррозионные взаимоотношения пироксена и пентландита в троктолите отражает сульфидизацию (замещение) образовавшихся железнистых силикатов.

6. Тяготение хлор-апатита к сульфидным обособлениям в троктолите отражает растворимость фосфата кальция в пирротиновом и халькопиритовом расплаве и его отделение при остывании.

7. Замещение оливина флогопитом (f-20) и серпентином (f-4) в мелкозернистой породе в кровле сульфидных обособлений и субизометричных «капель» отражает поступление из сульфидного расплава воды, калия и алюминия. Исчезновение первично-магматического битовнита и образование вторичного анортита может говорить о происходящем при хлоридно-калиево-глиноземистом метасоматозе выносе натрия. Сопоставление валовых составов первичной среднезернистой породы и вторичной мелкозернистой оторочки, говорит о том, что при замещении выносятся еще и кремний с кальцием.

8. Реакционное замещение плагиоклаза железнистым хлоритом в центре крупного сульфидного обособления свидетельствует о «сбросе» оксидного железа из сульфидного расплава в силикатную фазу. Рост сферолитов серпентина во внутрь сульфидного расплава, говорит о том, что из сульфидного флюида выносились также кремний, магний, хлор и вода. Об отделении из сульфидного расплава еще и калия с кремния

свидетельствует рассеивание сульфидных обособлений более поздним флогопитом. Вероятно, с фракционированием оксидных железа и титана, может быть связано образование ильменита по периферии изометричных сульфидных «капель».

9. Пространственная локализация микроминералов показывает, что для различных сульфидов (и силикатов) характерен свой набор минералов, однако только золото в составе электрума тяготеет к пентландиту. Минералы остальных элементов (Ag, Pd, Pt, Pb, Sn, Bi, Te, Se) не проявили определенной геохимической связи с пирротинитом, халькопиритом или пентландитом, что может говорить об их кристаллизации не из расплава на магматической стадии, а из флюидов на некотором расстоянии от исходного субстрата.

Описываемые вкрапленные руды свидетельствуют о сложной истории их формирования и проявлении разнообразных процессов силикатно-оксидного (оливин, шпинель, плагиоклаз) фракционирования, силикатно-сульфидной и халькопирит-пирротинитовой несмесимости, накопления в сульфидном расплаве не только флюидов (хлор, фосфор, вода, кислород?), но и петрогенных компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , FeO , MgO , CaO , K_2O) которые вызывают окисление, гидролиз и различные типы метасоматических реакций, мобилизацию и пространственное перераспределение малых элементов (Ag, Pd, Pt, Pb, Sn, Bi, Te, Se).

Процессы окисления, проявленные в оливин-содержащих магматитах объясняются реакцией диссоциации воды, которая может проникать в магматический комплекс в эпоху растяжения и высокотемпературной гидратации [1, 2]. Однако диссоциация воды ведет не к окислению, а образованию гидроксил-содержащих силикатов (серпентинов, амфиболов, хлоритов и др.) и H^+ , который приводит к образованию самородных минералов (аварунит, медь, золото и др.), что было показано М.И. Новгородовой [3]. Представляется, что наличие обильной магнетитовой вкрапленности в массивных сульфидных рудах, описываемой как результат взаимодействия сульфидного расплава с силикатными породами [4], может являться результатом перехода кислорода растворенного в сульфидном расплаве в свободную форму. Кроме кислорода в нем присутствуют и оксиды, из которых кристаллизуются, дорастают (и замещаются) плагиоклазы и флогопит. Магнетит в самих габброидах, вероятно, формируется неоднократно за счет формирования вторичных минералов с убывающей железистостью ($f_{\text{act}} -27$, $f_{\text{орх}} -21$, $f_{\text{флог}} -20$, $f_{\text{серп}} -4$).

Наличие относительно низкокремнистых мелкозернистых флогопит-анортитовых шапок над сульфидными обособлениями отражает проявление специфического метасоматоза габброидов – калиевого, обескремнивающего.

Библиографический список

1. *Ефимов А.А.* Платиноносный пояс Урала: тектоно-метаморфическая история древней глубинной зоны, записанная в ее фрагментах // Отечественная геология. 1999. № 3, с. 31-39
2. *Ефимов А.А., Малич К.Н.* Магнетит-ортопироксеновые симплекситы в уральских оливиновых габбро: структурный след реакций окисления в связи с процессом водного метаморфизма. Ежегодник ИГиГ УрО РАН, Екатеринбург, 2007. с. 159-164
3. *Новгородова М.И.* Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука, 1983. 288 с.
4. *Спиридонов Э.М. Гриценко Ю.Д.* Эпигенетический низкоградный метаморфизм и Co-Ni-Sb-As минерализация в Норильском рудном поле. –М.: Научный мир, 2009. 218 с.
5. *Muir I.D., Tilley C.E.* Contribution to the petrology of Hawaiian basalts, I. The picritic basalt of Kiauea // Am. J. Sci. 1957. V. 255.p. 241-253.

ON THE MECHANISM OF DIFFERENTIATION OF PETROGENIC AND ORE ELEMENTS IN BANDED-DISSEMINATED ORES OF THE SKALISTIY MINE OF THE TALNAKH ORE CLUSTER

I.I. Chaikovskiy, V.A. Koryakin, E.P. Chirkova

ilya@mi-perm.ru

The banded-disseminated ores are characterized, for which the manifestation of silicate-oxide (olivine, spinel, plagioclase) fractionation, silicate-sulfide and chalcopryrite-pyrrhotite immiscibility is shown. It has been established that the sulfide melt accumulates not only fluids (Cl, P, H₂O), but also petrogenic components (SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, FeO, MgO, CaO, K₂O), which cause iron oxidation, the appearance of hydroxyl-containing minerals and various types of metasomatic reactions, mobilization and spatial redistribution of noble metals and chalcophile elements.

Keywords: Talnakh intrusion, disseminated ores, magmatic and postmagmatic processes