

УДК 553.31:549.32/.32:553.491.4(470.5)

ВОЛКОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ И МЕДНО-ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД С СОПУТСТВУЮЩЕЙ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ (СРЕДНИЙ УРАЛ, РОССИЯ)

© 2011 г. Ю. А. Полтавец, З. И. Полтавец, Г. С. Нечкин

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, Екатеринбург, пер. Почтовый, 7*

Поступила в редакцию 12.10.2010 г.

Рассматривается геологическое строение Волковского месторождения, состав и петро-геохимические особенности его пород, титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых руд с сопутствующей благороднометальной минерализацией, а также условия их образования. Особое внимание уделено изучению благороднометальной минерализации, выявленной в результате исследований последних лет, и показан ее “сопутствующий” титаномагнетитовому оруденению характер. Приводится характеристика минералов руд и их взаимоотношений, описаны ранние ликвационные сульфидные образования и прослежена их эволюция вплоть до взаимоотношений с кумулятивными формами оксидов и силикатов, отражены основные закономерности распределения благородных металлов (БМ) в титаномагнетитовых и медно-титаномагнетитовых рудах. Показано, что на протяжении всего рудообразующего процесса происходит постепенное накопление БМ в минералах: силикатах–оксидах–сульфидах; максимальное же накопление (высокие концентрации) БМ связано с образованием сульфидных шширо- и жилоподобных обособлений в габброидах. Предполагается, что формирование месторождения обусловлено дифференциацией базитового расплава. Отложение собственно медно-железных руд и выделение в них благородных металлов в виде самостоятельных минералов (преимущественно теллуридов), а также самородного золота происходило в конечные этапы кристаллизации габбровой интрузии из остаточных флюидсодержащих расплавов, обогащенных Cu, Fe, Ti, V и летучими компонентами – Р и S. Показано, что формирование главных рудных минералов и благороднометальной минерализации происходило в широком интервале температур (800–570°C).

ВВЕДЕНИЕ

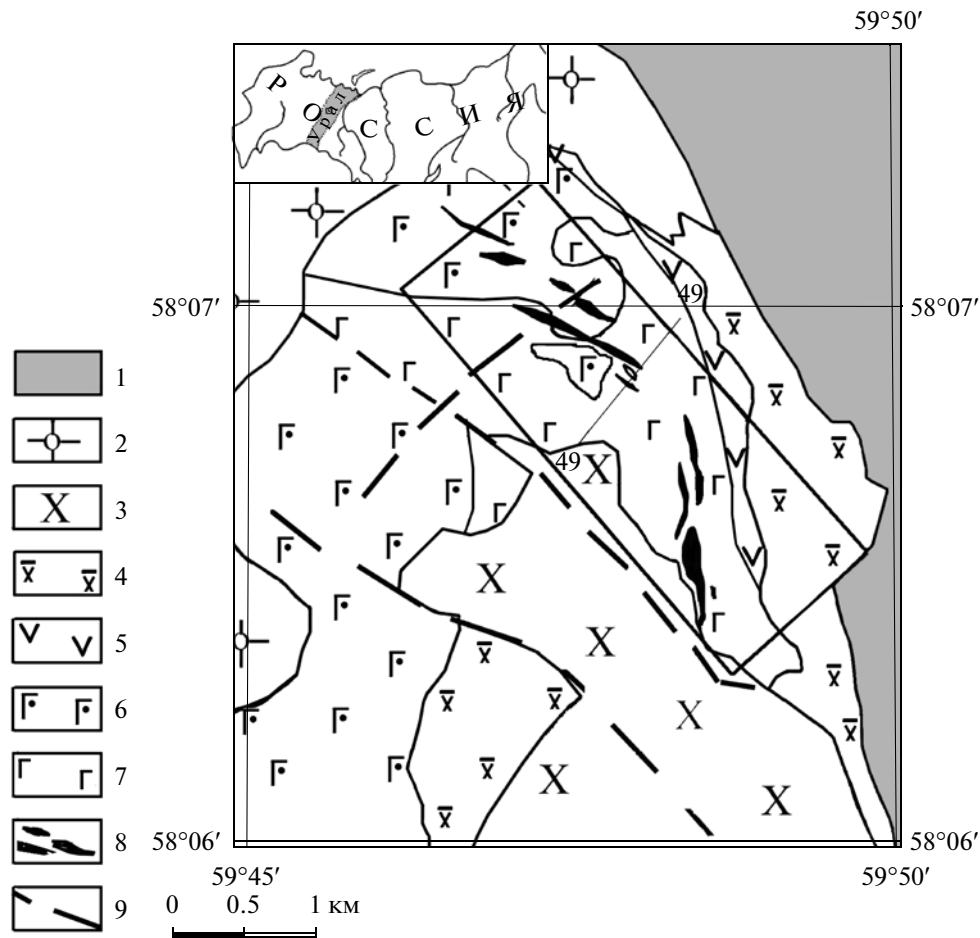
Волковское месторождение комплексных апатит- и ванадийсодержащих титаномагнетитовых и медносульфидных руд с сопутствующей золото-палладиевой минерализацией было открыто еще в начале XIX в. и рассматривалось вначале как медное месторождение вкрапленных руд в габбро. По железу оно является средним, а по меди – крупным, кроме того, обладает значительными запасами апатита, золота и платиноидов. Структурно-геологическая и петрографическая характеристика его освещена в работах (Кашин, 1948; Тимохов, 1963, 1967; Штейнберг и др., 1963; Николайченков, 1981; Фоминых, Клевцов, 1984). Достаточно подробные, но разрозненные сведения о минералах рудных парагенезисов, главным образом титаномагнетите и апатите, приведены в работах (Фоминых, Клевцов, 1984; Штейнберг и др., 1965), сульфидов меди и минералах благородных металлов (Мурзин и др., 1988; Нечкин, Полтавец, 2003; Нечкин, Шагалов, 2004; Полтавец и др., 2006, 2007 и др.). Новейшие изотоп-

но-геохимические данные приведены в статьях (Краснобаев и др., 2006; Мурзин и др., 2007). Однако вопросы, касающиеся физико-химических условий образования габброидов Волковского месторождения и генетических особенностей титаномагнетитовых и медносульфидных руд, остаются еще дискуссионными. Решению этих задач посвящена предлагаемая работа. Основное внимание сосредоточено на закономерностях строения рудных залежей, характере взаимосвязи титаномагнетитового и медносульфидного оруденения, размещении в них благородных металлов. Также рассмотрены возможные физико-химические условия концентрирования благородных металлов и генезис месторождения.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Волковское месторождение расположено в 26 км к северо-западу от г. Тагила и в 14 км к юго-востоку от г. Кушвы в северо-восточной части Волковского дифференцированного габбрового массива

Адрес для переписки: З.И. Полтавец. E-mail: poltavetszi@igg.uran.ru



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Волковского месторождения (по материалам Красноуральской ГРП).

1 – вулканогенно-осадочные породы ($S_{2p}-D_1^2$); 2 – диорит-сиенитовый комплекс (Кушвинский); 3 – диориты кварцевые и кварцсодержащие (Черновский массив); 4 – диориты пироксен-роговообманковые; 5 – габбро-диориты; 6 – габбро пироксен-оливиновые; 7 – габбро нормальные; 8 – рудные тела; 9 – разрывные нарушения.

размером 15×9 км (фиг. 1). Особенность массива – его псевдостратификация, или грубая неявно выраженная расслоенность. Расслоенность согласуется с текстурной полосчатостью габбро (чередованием светлых слоев, обогащенных полевым шпатом, и более темных, обогащенных темноцветными минералами) и нередко проявляющейся плоскостной ориентировкой плагиоклазов. Наиболее отчетливо псевдостратификация массива выражается в расположении рудных тел Волковского месторождения.

Среди пород, слагающих Волковское месторождение, доминируют габбро нормального ряда с различным содержанием оливина; количество SiO_2 в них колеблется в пределах 42–52 мас. %, но в рудных меланократовых разностях оно понижается до 38 мас. %. Незначительным распространением пользуются также габбро-нориты и нориты, образующие обособленные полосы и участки. Состав плагиоклаза габброидов варьирует от An_{50} до An_{98} . Основность его (увеличение аноритовой составляющей в плагио-

клазах) возрастает с глубиной и от периферии к центру месторождения. Так, плагиоклазы, отвечающие по составу битовниту и анортиту, более присущи габбро, слагающим срединную и нижнюю области разреза в центральной части месторождения, а также северо-западную и северную краевую часть его, рассматриваемую как выдвинутый вверх, представляемый габбро с повышенным содержанием оливина. Разности габбро с плагиоклазом состава $An_{50} - An_{70}$ (лабрадором) преобладают в восточной, северо-восточной периферии месторождения и в верхних горизонтах его центральной части. Они связаны между собой постепенными переходами. Наиболее распространены – габбро мезократовые, реже – мелано- и лейкократовые. В целом это полнокристаллические средне- и мелкозернистые породы с однородной или такситовой текстурой. Они подвержены вторичным низкотемпературным изменениям: сосюритизации и деанортизации плагиоклаза, уралитизации пироксена, а также их хлоритизации, пренитизации, цоизитизации. Отдельно

следует отметить процессы биотитизации и амфиболитизации пород, широко развитые в рудных габбро такситовой текстуры; они проявляются в образовании мелких зерен биотита и амфибола, часто создающих каймы вокруг пироксена и акцессорного титаномагнетита.

Волковское месторождение представляет собой в плане дугообразно вытянутую рудную зону протяженностью 3.5 км при ширине в 1 км. Она содержит серию многочисленных субпараллельных кулисообразно расположенных рудных тел, характеризующихся постепенно меняющимся простиранием от северо-западного на севере до субмеридионального на юге с углами падения на запад от 75° до 30° – 50° . На месторождении выделено более 200 рудных тел; наиболее крупные – рудные тела 1, 7, 24, 32, 67, 501 (фиг. 2а).

В поперечном разрезе рудные тела имеют линзообразную форму, тогда как в продольном их можно представить в виде протяженных изогнутых “словес”, залегающих согласно с элементами грубой слоенности габброидов. Они характеризуются протяженностью от нескольких десятков до 1500 м, мощностью от 10 до 100 м, преобладают слепые рудные тела, смещающиеся на глубину по мере приближения к восточному краю массива (фиг. 3). Границы рудных тел, представленных на разрезе, проведены условно, по данным химических анализов (кондиционное содержание не ниже 14% железа и 0.4% меди). Рудные тела представляют собой габбро с богатой рудной вкрапленностью, образующей иногда при максимальной насыщенности сплошные руды. Однако внутри тел нередко отмечаются и участки с некондиционным содержанием полезных компонентов. Руды – комплексные, содержащие, кроме титаномагнетита с ванадием, борнита, халькопирита, апатита, самородного золота также и минералы платиновой группы (МПГ), преимущественно в виде теллуридов палладия, открытые на Волковском месторождении в последнее двадцатилетие и еще мало изученные.

В технологических целях на месторождении принято выделять титаномагнетитовые, медно-титаномагнетитовые (борнит-халькопирит-титаномагнетитовые) и медносульфидные (халькопирит-пиритовые) руды. Резко преобладают первые два типа, которые и определили понятие “волковский” тип оруденения. Последний тип руд – медносульфидный – представляет собой, в сущности, прожилково-вкрапленную халькопирит-пиритовую минерализацию, генетически связанную со становлением более позднего кварц-диоритового Черновского массива (Николайченков, 1981), примыкающего к месторождению с юга и имеющего интрузивные контакты с габбро (Маегов, 1999). Эта минерализация наложена на первые два типа руд в самой южной части месторождения (в Лаврово-Николаевском карьере) и выходит за пределы рудных

габброидов, прослеживаясь по тектонически ослабленной зоне северо-западного направления.

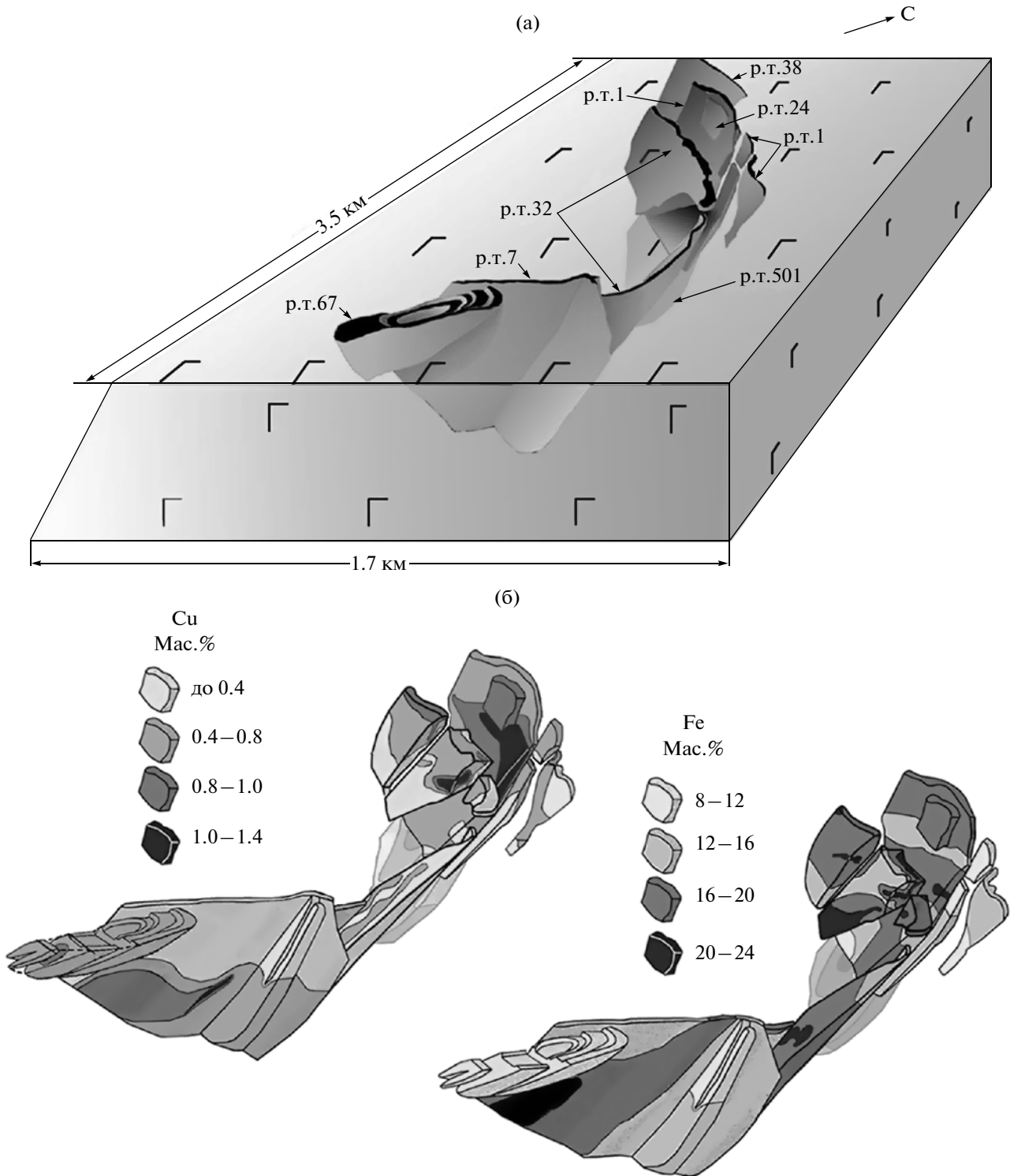
Распространение главных типов руд имеет следующие закономерности (Николайченков, 1981): 1) центральные части крупных рудных тел сложены преимущественно медно-титаномагнетитовыми рудами, а на периферии тел преобладают титаномагнетитовые; 2) мелкие тела, как правило, сложены каким-либо одним типом руд. Разрез (фиг. 3) в целом подтверждает это положение.

Крупные тектонические нарушения непосредственно на месторождении не выявлены, но здесь явно выражена пострудная трещиноватость. Трещины, располагающиеся в зоне сочленения габбро с кварцевыми диоритами на юге месторождения, контролируют размещение незначительных объемов прожилково-вкрапленной халькопирит-пиритовой минерализации, связанной чаще всего с участками эпидотизации, хлоритизации в габброидах, реже – с кварцевыми или карбонатными жилами мощностью в первые сантиметры.

Все исследователи Волковского месторождения в качестве литологического контроля отмечают приуроченность оруденения как апатит-титаномагнетитового, так и борнит-халькопирит-титаномагнетитового к мезо- и меланократовому габбро с такситовой текстурой. Эта порода состоит из участков различного строения и состава и характеризуется неравномерным распределением темноцветных минералов и плагиоклаза, с одной стороны, и различной крупностью зерна, с другой, когда среди основной массы породы наблюдаются небольшие (2–5 см) шпирообразные выделения изометричной или прожилковидной формы тонко- (или крупно-) зернистого сложения с нечеткими границами (Кашин, 1948; Тимохов, 1963, 1967; Фоминых, Клевцов, 1984 и др.). Зоны такситовых рудоносных габбро на месторождении распределены неравномерно. Наибольшее их количество отмечается в срединной части рудной зоны.

Нормативный минеральный состав (CIPW) показал, что габброиды с промышленными концентрациями Fe и Cu ($Fe_{вал} \geq 14.0$ мас. % и $Cu \geq 0.4$ мас. %) относятся преимущественно к породам с нормативным оливином. При этом рудные габбро характеризуются высоким фемическим индексом, для которых $Fem/Pl \geq 1.0$, тогда как в безрудных габбро $Fem/Pl \leq 1$ (табл.1).

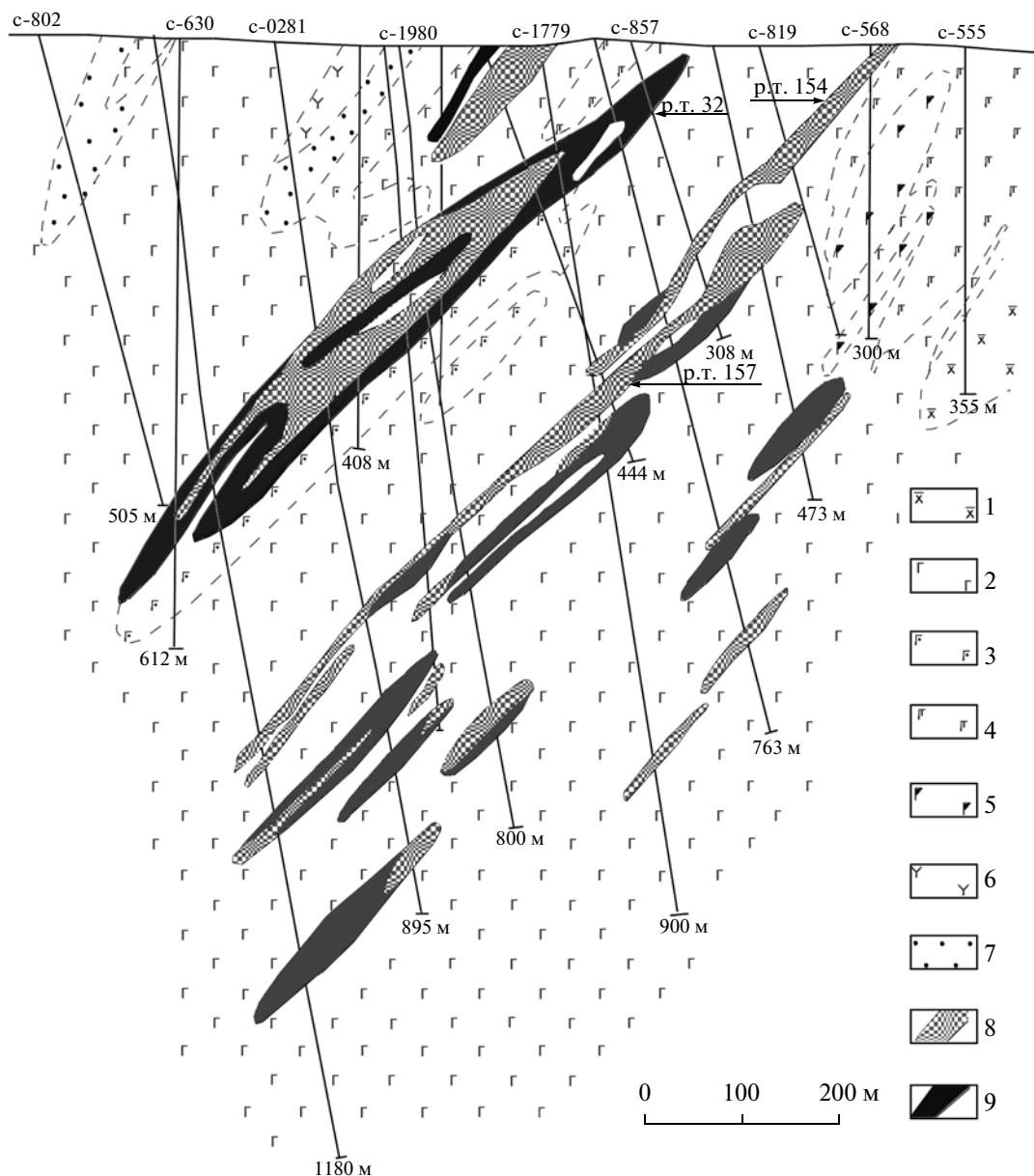
Ранее (Полтавец, 2004), с целью оценки возможных физико-химических условий становления габброидов Волковского массива, была проведена серия модельных расчетов кристаллизации исходного расплава основного состава в изобарических условиях с использованием водной версии программы “КОМАГМАТ” (Арискин, Бармина, 2000) при заданных режимах внешних условий (P, f_{O_2} , содержание H_2O). В качестве критерия оптимальности оценки условий кристаллизации принималось со-



Фиг. 2. Блок-диаграмма Волковского месторождения с наиболее крупными рудными телами (а) и распределением в них Cu и Fe (б).

ответствие (степень совпадения) смоделированных трендов содержаний петрогенных компонентов (FeO^* и MgO , мас. %) в исходном расплаве с эмпирическим (природным) трендом тех же петроген-

ных компонентов, построенном по результатам анализов неизмененных габброидов Волковского месторождения. Наибольшее совпадение с эмпирическим трендом (фиг. 4, “интрузивная серия”) на-



Фиг. 3. Геологический разрез по профилю 49 (по материалам Красноуральской ГРП).

1 – диориты пироксен-роговообманковые; 2 – габбро нормальные; 3 – габбро пироксен-оливиновые; 4 – габбро пироксен-биотитовые; 5 – габбро пироксен-роговообманковые; 6 – диабаз жильный; 7 – роговики пироксен-амфибол-плагиоклазовые; 8 – руды медно-титаномагнетитовые; 9 – руды титаномагнетитовые.

блюдается у тренда с параметрами: $P = 5$ кбар, $H_2O = 8\%$ (черная линия). В целом по результатам компьютерного моделирования было показано, что оптимальная модель кристаллизации магматического расплава соответствует следующим физико-химическим условиям: $P = 5$ кбар, $T = 1146.5 - 915.1^\circ C$ и lgf_{O_2} от -9.53 до -12.93 для исходного расплава состава (мас. %): $SiO_2 - 44.73$, $TiO_2 - 0.92$, $Al_2O_3 - 15.30$, $Fe_2O_3 - 1.51$, $FeO - 12.24$, $MnO - 0.15$, $MgO - 10.87$, $CaO - 11.54$, $Na_2O - 1.89$, $K_2O - 0.35$ и $P_2O_5 - 0.50$ с задаваемым переменным содержа-

нием воды 6–8 мас. %. Как видно, давление превышает литостатическое (исходя из глубины формирования массива 3–5 км, что соответствует 1.5–2 кбар).

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Корреляционные взаимоотношения между основными рудными элементами (Fe, Cu, V, P и Ti) руд Волковского месторождения изучались многими исследователями (С.А.Кашиным, Ю.С. Николайченковым, В.Г. Фоминых, Ю.А.Полтавцом). Для различных типов руд наблюдаются разные за-

Таблица 1. Среднее содержание рудообразующих элементов и некоторых петрохимических характеристик в габброидах в зависимости от интенсивности оруденения, Волковское месторождение

Компоненты	Содержание FeO* в габброидах, мас.%,				
	11.17(25)	14.60(53)	17.36(51)	25.11(18)	32.77(13)
Cu	0.06	0.31	0.47	0.63	1.22
P	0.34	0.76	0.99	1.72	3.59
TiO ₂	0.89	1.17	1.41	2.09	2.70
Fem	30.09	35.02	37.11	34.60	25.78
Pl ^{An}	0.73	0.78	0.80	0.84	0.91
Q ^{Mt}	5.21	8.59	11.45	19.45	27.38
Fem/Pl	0.64	0.86	0.97	1.55	2.29
(Fem + Q ^{Mt})	35.3	43.61	48.56	54.05	53.16
Fem / (Fem + Pl)	0.38	0.46	0.49	0.60	0.70

Примечание. FeO* = (0.9Fe₂O₃ + FeO); Fem = Di + Hy + Ol и Pl – нормы по CIPW; Pl^{An} – количество анортитовой молекулы в плагиоклазе; Q^{Mt} – количество титаномагнетита. Расчет произведен с использованием уравнения связи: Fe^{Mt} = 0.963 Fe_{вал} – 4.708, мас. %. Состав рудоносных габброидов был ранжирован с интервалом содержаний FeO*, равного 5%, с целью более корректного сопоставления и выявления геохимических особенностей разных групп пород. В скобках – количество анализов.

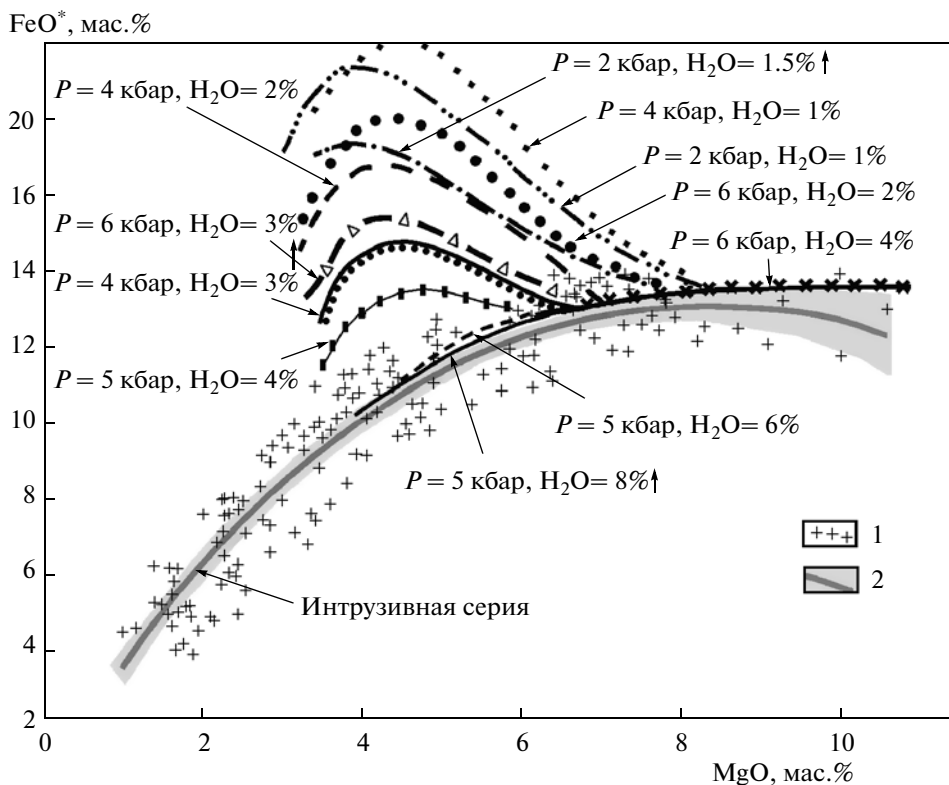
висимости. Так, титаномагнетитовые руды характеризуются четкой прямой корреляцией между содержаниями Fe, TiO₂, V₂O₅ и P и отсутствием какой-либо связи этих элементов (за исключением Fe) с Cu. В медно-титаномагнетитовых рудах характер взаимоотношений Fe, TiO₂, V₂O₅ и P соответствует таковому в титаномагнетитовых рудах, и в то же время имеется прямая зависимость между содержаниями этих элементов и содержанием Cu. В результате анализа геохимических данных по штуфным пробам, а также магнетитовых и сульфидных концентратов из этих руд выявлена тесная корреляционная связь ($r = 0.7 - 0.9$) содержаний Cu с P. Для изучения закономерностей распределения главных рудных элементов в них была использована большая база данных по химическому составу руд и пород, полученная при разведке месторождения. Геохимические ореолы Fe, Cu (фиг. 2б) характеризуются компактностью, за контурами рудных тел концентрации указанных элементов резко снижаются до “кларковых” значений, области с повышенными содержаниями элементов сближены. Прямая корреляция Cu с остальными элементами в медно-титаномагнетитовых рудах отражает их генетические особенности и обуславливается сопутствующим характером отложения рассматриваемых элементов из общего источника, что отчетливо видно по распределению рудообразующих элементов в рудных телах. Эти данные являются веским аргументом, опровергающим достаточно распространенное мнение (Штейнберг, Еремина, 1963; Ефимов и др., 2002) о наложенном гидротермально-метасоматическом характере сульфидной минерализации в целом.

Для уточнения генетических особенностей оксидно-сульфидного оруденения важное значение имеют изотопные исследования. Ранее Ю.С. Нико-

лайченковым (1981), на основе близости среднего значения $\delta^{34}\text{S}$ к мантийному, был сделан вывод о гомогенном и магматогенном источнике серы для медно-титаномагнетитовых руд. В последнее время опубликован ряд работ по изотопному составу серы и кислорода в минералах (апатите, амфиболе и других) и породах Волковского массива (Аникина и др., 2007; Мурзин и др., 2007). По данным этих авторов, изотопный состав серы борнита, халькопирита и пирита из руд и клиноцоизитовых пород месторождения характеризуется относительно небольшими вариациями ($\delta^{34}\text{S} = -1.2...+3.1\text{‰}$), что также соответствует магматической сере. В то же время изотопные определения кислорода, проведенные Е.В. Аникиной и В.В. Мурзиным, показали, что амфибол из вкрапленных апатит-халькопиритовых руд месторождения значительно обеднен тяжелым кислородом ($\delta^{18}\text{O} = 2.2...3.6\text{‰}$), что, по мнению этих авторов, свидетельствует о возможном участии метаморфогенных вод в рудообразовании. Не отрицая в целом магматического происхождения бедновкрапленного сульфидного оруденения и флюидов, они вместе с тем придают большое значение рудоконцентрирующей роли метаморфогенного флюида и метасоматическим процессам.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУД

Описание состава руд приводится во многих ранних работах по месторождению (Геология ..., 1972; Тимохов, 1963, 1967; Штейнберг и др., 1965; Фоминых, Клевцов, 1984 и др.). Нами было продолжено изучение минералого-геохимических и структурно-морфологических особенностей рудных ассоциаций, позволяющих с большей детальностью



Фиг. 4. Модельные тренды фракционирования расплава в изобарических условиях при различных исходных содержаниях воды для габброидов Волковского месторождения (Полтавец, 2004).

1 – фигуративные точки составов пород Волковского месторождения; 2 – эмпирический тренд содержаний FeO* и MgO в габброидах месторождения (интрузивная серия); остальные кривые – расчетные тренды фракционирования расплава при различных физико-химических условиях. Модельное содержание воды со стрелкой означает дегазацию водонасыщенного магматического расплава, предполагается, что его дифференциация происходит под давлением паровой фазы.

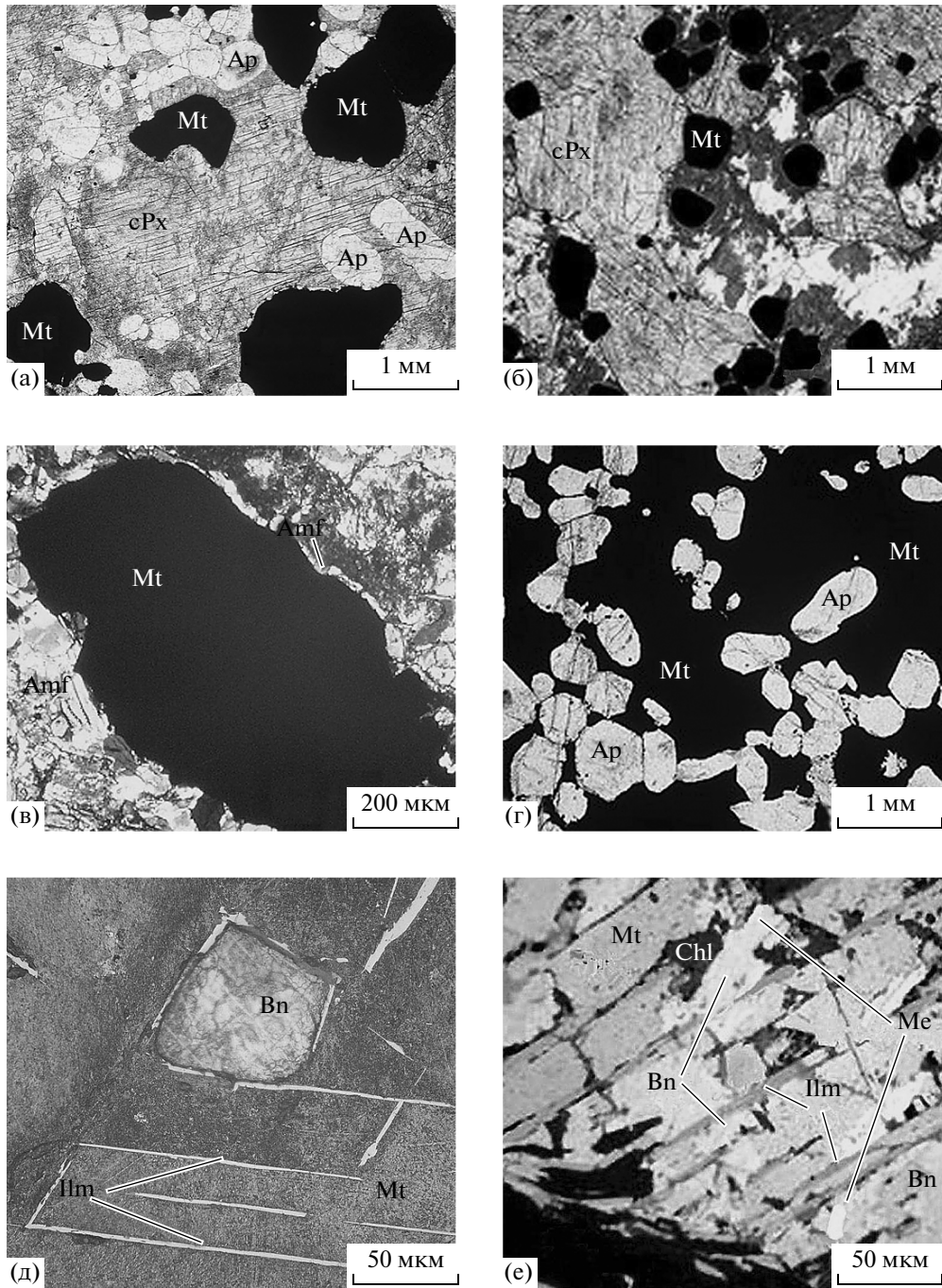
составить представление об эволюции магматического рудного процесса, начиная от наиболее ранней стадии (кумулятивные и ликвационные формы проявления рудообразования), которой было уделено основное внимание до заключительной стадии образования массивных руд.

На основании анализа структурно-текстурных взаимоотношений минералов руд устанавливается следующая временная последовательность выделения главных рудных минералов, прослеживающаяся на фоне понижения температуры: титаномагнетит, ильменит, борнит, дигенит, борнит + халькопирит, халькопирит, ковеллин, пирит.

Титаномагнетитовые руды представлены преимущественно вкрапленным типом оруденения – мелкой рассеянной вкрапленностью титаномагнетита, гораздо реже – в виде сплошных титаномагнетитовых участков, а также в виде отдельных шпиров и прожилковидных обособлений в габбро, выполненных титаномагнетитом в ассоциации с сульфидами и силикатами. Основная масса вкрапленного титаномагнетита образует ксеноморфные зерна, располагающиеся среди силикатов: плагио-

клаза, пироксена, оливина, амфибола. Но нередко, чаще всего в мезократовых разновидностях габбро, наблюдаются мелкие (до 1 мм) идиоморфные и субидиоморфные зерна титаномагнетита, располагающиеся между более крупными зернами пироксена, а также находящиеся в нем в виде мелких эвгдральных включений (фиг. 5а, 5б). Этот титаномагнетит является самой ранней генерацией, исследование состава на рентгеновском микроанализаторе “Самеса SX 100” показали повышенные количества в нем Cr (до 6–9 мас. %) и Mg (до 4.05 мас. %). Часто эти выделения титаномагнетита окаймлены тонкой постмагматической реакционной оторочкой из мелкозернистого амфибола, биотита и соссюрита (фиг. 5в). Кроме того, наблюдаются случаи нахождения мелких округлых (“каплевидных”) включений титаномагнетита в пироксене, на что ранее было обращено внимание (Кашин, 1948).

Массивные титаномагнетитовые руды, состоящие из переменного количества идиоморфных зерен фторапатита, сцементированных титаномагнетитом (фиг. 5г), нередко выделяются в отдельный апатит-титаномагнетитовый тип. Иногда в этом ти-



Фиг. 5. Структурно-морфологические особенности рудных минералов в титаномагнетитовой руде.

а – корродированные зерна титаномагнетита (Mt) и апатита (Ap) в монокристалле клинопироксена (сPx); б – включения субэвгдральных зерен титаномагнетита (Mt) в клинопироксене (сPx) и в интерстициях; в – зерно титаномагнетита, окаймленное тонкой реакционной оторочкой из мелкозернистого амфибола (Amf); г – кристаллы апатита в титаномагнетитовом “цементе”; д – структура распада титаномагнетита на магнетит (Mt) и ильменит (Ilm), на расположение ламелл ильменита влияет включение зерна раннего борнита (Bn); е – структура распада титаномагнетита на магнетит (Mt) и ильменит (Ilm), борнит (Bn) замещает магнетит, вместе с борнитом наблюдаются мельчайшие выделения теллурида палладия – меренскиита (Me). Отраженный свет. Николи параллельны.

пе руд просматривается плоскостная ориентировка кристаллов апатита, что свидетельствует в пользу кумулятивной природы этой ассоциации. В шпиро-видных и прожилковидных обособлениях зерна ти-

таномангнетита имеют крупные размеры (до 5–7 мм) и ассоциируют с крупнозернистым борнитом и халькопиритом. Подобные обособления представляют собой наиболее позднюю генерацию рудных

минералов, образовавшихся (возможно за счет перекристаллизации тонко-рассеянной вкрапленности этих же минералов) в заключительную стадию рудообразующего процесса.

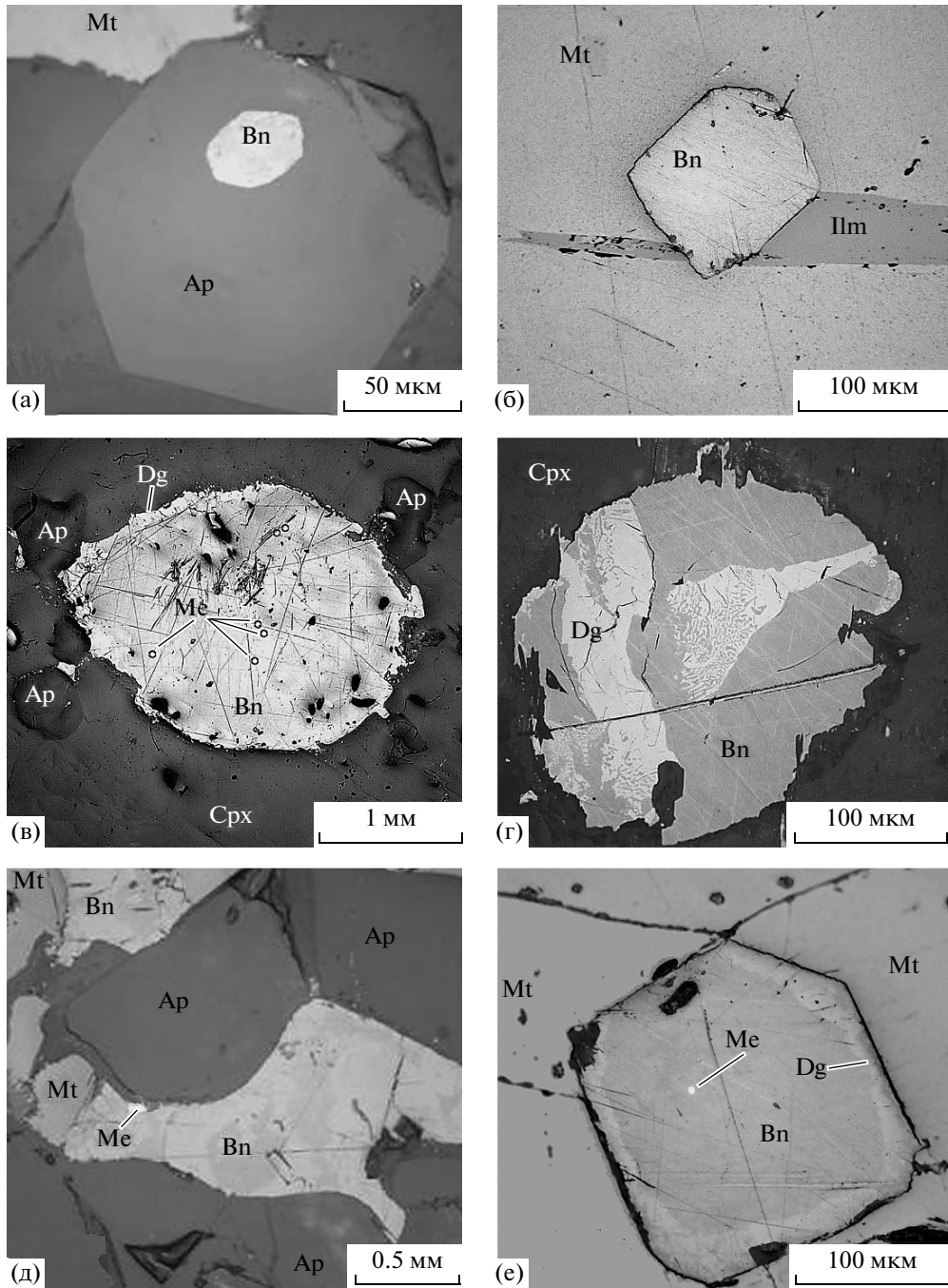
Характерная черта титаномагнетита волковских руд — наличие в нем решетчатых структур распада твердого раствора на магнетит, ильменит, ульвошпинель и шпинель (ряда плеонаст—герцинит). Ильменит выделяется в магнетите в виде тонких пластинок, располагающихся по кристаллографическим направлениям (фиг. 5д). Наряду с этим, ильменит присутствует и в форме изометричных зерен различной величины, находящихся в интерстициях между титаномагнетитом и силикатами. Последняя форма выделения ильменита встречается преимущественно в меланократовом габбро, оливинсодержащем габбро и в шлирах титаномагнетита, в то время как решетчатая структура распада смеси магнетита и ильменита более характерна для мезократового габбро (Кашин, 1948). Руды в незначительных количествах содержат сульфиды меди (Cu не более 0.4%), представленные главным образом борнитом, халькопиритом, изредка пиритом (наложенным на породы и руды южной части месторождения и связанным с внедрением Черновского массива). Позднейшие изменения, которым подверглись руды, выражаются в мартитизации, пиритизации титаномагнетита, а также в развитии по нему борнита и халькопирита. Из нерудных минералов наиболее часто отмечается замещение титаномагнетита хлоритом, сфеном, эпидотом, реже — амфиболом. Характерно, что в структурах распада изменению подвергаются только участки магнетита, оставляя ламеллы ильменита чистыми (фиг. 5е).

Медно-титаномагнетитовые руды содержат Cu более 0.4% и Fe не менее 14%. По существу это те же титаномагнетитовые руды, но с большим количеством сульфидов меди, — главным образом борнита и халькопирита; очень редко наблюдаются: халькозин, ковеллин, тэтраэдрит, малахит, азурит, куприт. Преобладающая форма выделения этих минералов — рассеянная в габбро сульфидная вкрапленность с размерами зерен от долей до 5 мм. В южной части месторождения довольно широко развиты гнездообразные и шширообразные обособления, сложенные халькопиритом и борнитом, иногда с титаномагнетитом; встречаются также халькопиритовые и борнитовые прожилки и жилы мощностью до 5—7 см, но во вкрапленниках халькопирит повсеместно имеет реакционные, даже псевдоморфные взаимоотношения с борнитом.

Структурные взаимоотношения главного Cu-содержащего минерала этих руд — борнита — с остальными минералами довольно сложны. Мельчайшие включения его наблюдаются в кристаллах несосюритизированного сдвойникового плагиоклаза и в клинопироксене, где фиксируются две формы выделения: 1) первая, наиболее ранняя, представляет со-

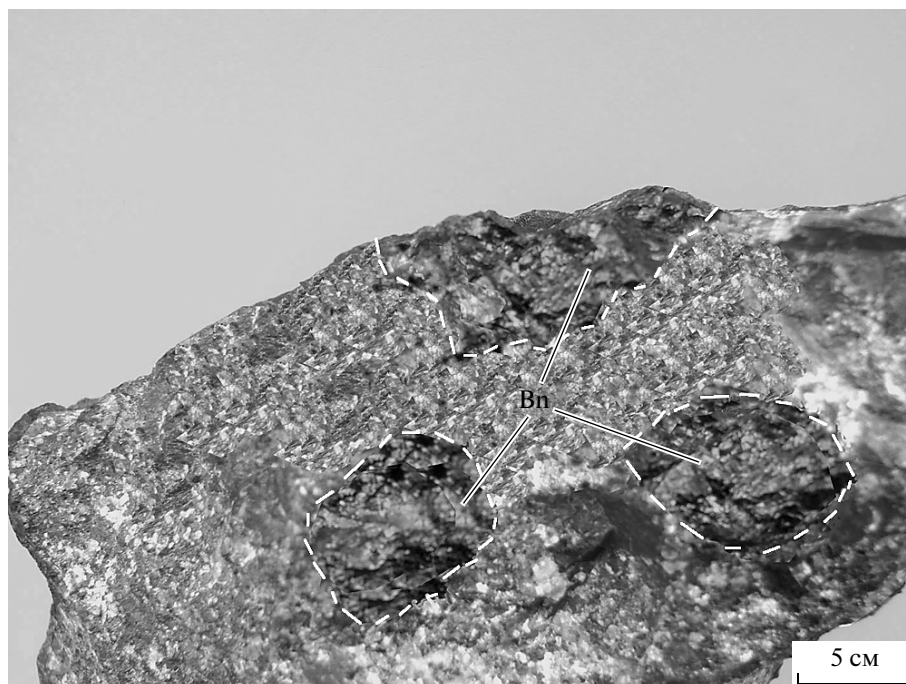
бой “цепочки” тонких борнитовых зерен в пироксене, в котором проявилась сетка титаномагнетитового распада; 2) вторая форма — мозаичное развитие борнита в узлах спайной сетки пироксена, по-видимому, синхронная начальной стадии амфиболизации. Изредка отмечаются графические сростания борнита с дигенитом, заключенные в плагиоклазе и пироксене. Они, вероятно, также синхронны с началом процесса амфиболизации последнего. Какая-то доля борнита кристаллизовалась вместе с титаномагнетитом (фиг. 5д) и апатитом (фиг. 6а); часто мелкие его кристаллы наблюдаются по периферии этих минералов. Перечисленные морфологические разновидности борнита, относящиеся к редким, наиболее ранним высокотемпературным его модификациям, свидетельствуют о появлении первых сульфидных образований (возможно первоначально в виде капель) в кристаллизующемся силикатном расплаве на раннем этапе флюидно-магматической дифференциации габброидной магмы. Характерная их особенность — эвгедральная и субгедральная формы выделения. Их первичные, скорее всего “сферические” формы искажены и подчинены кристаллической структуре минерала-хозяина, захватившего капли расплава в период предкумулятивного роста. Сопоставление их с данными по внутриинтрузивным крупным сульфидным месторождениям (Годлевский, 1968) и малосульфидным слоям в расслоенных базитовых интрузиях (Уэйджер, Браун, 1970) показывает, что это могут быть закристаллизовавшиеся индивидуализированные капли сульфидного расплава — ликвата. Жидкостная природа подобных образований была аргументирована А.Д. Генкиным (Структурно-текстурные..., 1964). Об относительном времени консолидации расплавных включений и вероятных температурах этого периода можно судить по поведению ильменита в структуре распада титаномагнетита, контактирующего с сульфидными выделениями. Иногда наблюдаются ламеллы ильменита, окаймляющие борнитовое включение (фиг. 5д) или борнит, препятствующий росту крупных ильменитовых ламелл при распаде титаномагнетита (фиг. 6б). Подобные явления описаны для норильских руд (Годлевский, 1968), их также можно видеть на иллюстрациях, сопровождающих описание Скергаардского интрузива (Уэйджер, Браун 1970). Вероятная температура для сосуществования ильменита и магнетита в волковских рудных габбро — 840°C (Полтавец и др., 1996).

Можно предположить, что наблюдаемые “сферические” выделения борнита в окружении порообразующих минералов габбро (фиг. 6в, 6г) — это основные реликтовые формы отдельных сульфидных капель близкого (борнитового) состава, большая часть которых к моменту коалесценции начала терять сферическую поверхность. О фрагментарности сфер свидетельствуют их “вздохмаченные” поверхности и следы разнонаправленных деформаций, подчеркнутых зонами дигенитового распада.



Фиг. 6. Структурно-морфологические особенности рудных минералов в медно-титаномагнетитовой руде.

а – кристалл борнита (Bn) в кристалле апатита (Ap); б – фрагмент структуры распада титаномагнетита: кристалл борнита (Bn), находящийся в зерне магнетита, препятствует росту ильменитовой ламелли; в – сферическое борнитовое выделение в апатит-клинопироксеновой матрице, в борните (Bn) шесть зерен платиноидов меренскиитовой группы (обведено кружками), включение имеет дигенитовую (Dg) кайму; г – деформированная борнитовая сфера в апатит-клинопироксеновой матрице, дигенит (Dg) располагается по зонам деформации; д – ксеноморфные выделения борнита (Bn) между зернами апатита (Ap) и титаномагнетита (Mt), видно мелкое включение меренскиита (Me); е – ограненное включение борнита (Bn) в зерне титаномагнетита, в борните наблюдается включение меренскиита (Me) около 6 мкм в поперечнике, видна дигенитовая кайма (Dg). Отраженный свет. Николи параллельны.



Фиг. 7. Шлирообразные обособления борнита (Bn) в такситовом габбро. Штуф.

Наблюдаемые полусферические, овальные и “лапчатые” выделения борнита, вероятно, отражают начальную стадию формирования кумулятивного расплава, образующегося в результате коалесценции и укрупнения сульфидных капель. В них постоянно наблюдаются вдающиеся минералы габбровой котектики. Подобные явления наблюдаются в норильских рудах (Структурно-текстурные..., 1964).

Основная масса борнита представлена рассеянной в габбро вкрапленностью в виде ксеноморфных выделений (фиг. 6д), находящихся в промежутках между зернами силикатов, титаномагнетита и апатита, иногда корродирующих их. Наблюдается развитие борнита этой модификации по магнетиту в структурах распада титаномагнетита, при этом ламеллы ильменита не замещаются борнитом и сохраняют свою ориентировку (фиг. 5е), а также по сетке спайности в пироксене, амфиболе и по трещинкам в зернах титаномагнетита. Главные породообразующие минералы габбро (плагиоклаз, пироксен) и апатит-титаномагнетитовые агрегаты замещаются борнитом с разной степенью интенсивности; при этом пироксен замещается бурой роговой обманкой, с которой равновесен борнит, образующий различные формы прорастания. Интенсивное образование борнитовой фазы, выражающееся в слиянии множества зерен в сплошные агрегаты, сопровождается отчетливыми признаками замещения: в апатитах от краев зерен появляются микротрещины, выполненные борнитом; затем по мере количественного роста последнего постепенно замещают-

ся и исчезают магнетитовая, ильменитовая и плеонастовая фазы в титаномагнетитах. Около агрегатов сплошного борнита развиваются лучевые системы тонких трещин с тем же борнитом. Околотрещинные (околорудные) изменения габбро отсутствуют. Большой интерес представляет гнездовая форма сульфидной минерализации, интенсивно проявленная в южной части месторождения (в карьере). Гнездо- и шлирообразные обособления представляют собой почти сплошные скопления борнита или халькопирита, иногда с ними ассоциирует крупнозернистый титаномагнетит. Они располагаются в габбро крайне неравномерно, форма гнезд неправильная, часто удлиненная, с очень неустойчивыми размерами в 5–15 см в поперечнике (фиг. 7). В ядерных частях их иногда просматриваются отдельные зерна габбрового субстрата. Гнезда окружены сульфидной вкрапленностью, в пределах которой габбровый субстрат и его структура хорошо сохраняются. Принципиальная особенность руд с гнездовой текстурой – отсутствие макроскопически выраженных околосульфидных изменений. Для борнитов Волковского месторождения характерны структуры распада твердого раствора на борнит и халькопирит, подробно описанные ранее (Кашин, 1948). При этом в мелких включениях борнита, находящихся в титаномагнетите, апатите или силикатах и представляющих собой раннюю генерацию, решеток распада не наблюдается. Последнее обстоятельство свойственно не столько участкам богатых медно-титаномагнетитовых руд, сколько габбро с богатой вкрапленностью титаномагнетита и борнита. Из

Таблица 2. Содержания благородных металлов (г/т) в породообразующих минералах, Волковское месторождение

Минерал	Форма нахождения минерала	Pd	Pt	Au	Ag
Пироксен (2)	Породообразующий, в неизменном габбро	$\frac{0.07}{0.03-0.11}$	0.011 (1)	$\frac{0.08}{0.05-0.12}$	3.5 (1)
Титаномагнетит (6)	Акцессорный, в неизменном габбро	$\frac{0.06}{0.01-0.09}$	$\frac{0.012}{0.009-0.017}$	$\frac{0.18}{<0.05-0.40}$	$\frac{0.3}{0.2-0.4}$

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: в числителе – среднее арифметическое, в знаменателе – интервал колебаний содержаний. В скобках – количество анализов. Предел обнаружения (г/т): Pt – 0.005, Pd – 0.01, Au – 0.02, Ag – 0.1. Анализы выполнены химико-спектральным методом в Институте геологии и геохимии УрО РАН, атомно-абсорбционным методом – в Центральной лаборатории ГП “Невскгеология”.

вторичных образований по борниту отмечаются халькозин и ковеллин, развитые преимущественно в зоне окисления в верхних горизонтах разреза до глубины 60–70 м.

Второй по распространенности минерал медно-титаномагнетитовых руд – халькопирит. Формы выделения его разнообразны. Наиболее ранняя, редко встречающаяся генерация представлена единичными идиоморфными кристаллами и треугольными “клиньями”, наблюдающимися в зернах титаномагнетита, рассеянных в габбро, а также по спайности в пироксене. Основная масса халькопирита образует зернистые агрегаты с размерами зерен до 4 мм, выполняющие интерстиции между силикатами и титаномагнетитом. Очень часто халькопирит наблюдается в тесном срастании с борнитом, границы их неровные, четкие и, как правило, без следов разъедания. Такие сплошные зернистые агрегаты распространены в основном в меланократовом габбро. Широко распространенной формой выделения являются пластинчатые вроски халькопирита в борните, образовавшиеся в результате распада твердого раствора; обычно в центральной части зерен борнита вроски халькопирита – мелкие, тонкие и малочисленные, по краям – более крупные (Кашин, 1948). Часть халькопирита отлагалась и после кристаллизации борнита, так как нередко отмечены факты замещения борнита халькопиритом. Особенность этих образований – отсутствие околосульфидных изменений. Помимо описанных форм, в южной части месторождения широко наблюдаются выше упомянутые гнездо- и жилообразные обособления крупнозернистого халькопирита в ассоциации с борнитом и титаномагнетитом, имеющие пегматоидный облик.

Кроме того, в рудах в незначительных количествах присутствуют: халькозин, в основном в виде каемок и прожилков в борните, ковеллин, дигенит, теннантит, тэтраэдрит. В верхних горизонтах разреза месторождения встречаются: малахит, азурит, кризоколла.

БЛАГОРОДНОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ

В породах и рудах Волковского месторождения благороднометальная минерализация представлена преимущественно теллуридами палладия и мелкими зернами самородного золота (Мурзин и др., 1988; Молошаг и др., 2000; Золоев и др., 2001; Полтавец и др., 2006). Из теллуридов палладия отмечаются меренскиит (PdTe_2), реже – котульскит (PdTe) и кейтконнит (Pd_{3-x}Te), содержащие в переменных количествах (от долей до 1–2 мас. %) Pt, Au, Ag. Эти минералы находятся в виде включений размером 0.001–0.025 мм в сульфидах (борните, халькопирите), титаномагнетите, пироксене. Кроме того, в редких случаях встречаются Pd-содержащий гессит $[(\text{Ag}, \text{Pd})_2\text{Te}]$, а в халькопирите – свободное золото. Все выделения теллуридов Pd наблюдаются в виде отдельных ограненных зерен, их сростков не встречено. Судя по наблюдениям, они могли выкристаллизоваться и из субстрата ранних ликвационных форм борнита, который представлен реликтами расплавленных капель (фиг. 6в). Обычно теллуриды Pd находятся или в виде единичных включений в отдельных зернах борнита (фиг. 6е) или в виде рассеянных зерен среди псевдоморфоз борнита по титаномагнетиту (фиг. 5е). На срезе таких зерен размером 1–1.5 мм при 50-кратном увеличении можно видеть до 3–4 кристаллов теллуридов палладия. В целом можно отметить, что теллуриды Pd наблюдаются как во вкрапленном борните, который составляет основную долю запасов медно-титаномагнетитовых руд, так и в гнездо- и жилообразных сульфидных обособлениях.

Геохимический анализ безрудных габброидов, а также выделенных из них монофракций пироксена и акцессорного титаномагнетита показал постоянное присутствие в них БМ (табл. 2, 3) в количествах, заметно превышающих (за исключением Pt) средние их содержания (“кларки”) в мантии, в базитах и ультрабазитах (McDonough, Sun, 1995; Требования..., 1999). Это, по всей вероятности, может свидетельствовать об изначальной обогащенности ими флюидсодержащего габброидного расплава. Обед-

Таблица 3. Содержания благородных металлов (г/т) в безрудных габброидах Волковского месторождения и их “кларки” в мантии (McDonough, Sun, 1995) и ультрабазит-базитовых породах (Требования..., 1999)

Компоненты	Волковское месторождение		Среднее содержание (“кларки”)		
	габбро нормальные (8)	габбро-диорит (2)	мантия	ультрабазиты	базиты
Pt	$\frac{0.018}{0.00-0.03}$	$\frac{0.012}{0.01-0.014}$	0.0071	0.08	0.02
Pd	$\frac{0.03}{0.025-0.10}$	$\frac{0.10}{0.10-0.10}$	0.0039	0.02	0.02
Au	$\frac{0.06}{0.05-0.08}$	$\frac{0.12}{0.05-0.18}$	0.001	0.005	0.004
Ag	$\frac{1.38}{0.4-3.50}$	$\frac{2.0}{2.0-2.0}$	0.008	0.06	0.10

Таблица 4. Содержания благородных металлов (г/т) в минералах рудоносных габброидов, Волковское месторождение

Минерал	Pd	Pt	Au	Ag
Пироксен породообразующий из оруденелого габбро (1)	0.23	0.011	0.33	7.3
Титаномагнетит вкрапленный из рудного габбро (3)	$\frac{1.01}{0.01-1.88}$	$\frac{0.01}{0.010-0.011}$	$\frac{0.77}{0.27-1.63}$	$\frac{2.7}{2.6-3.0}$
Титаномагнетит сплошной, средне- и крупнозернистый из сульфидно-титаномагнетитовых шпиров и жил (7)	$\frac{1.84}{0.06-4.83}$	$\frac{0.025}{0.010-0.062}$	$\frac{0.22}{0.09-0.33}$	$\frac{3.5}{0.8-7.6}$
Борнит вкрапленный из рудного габбро (3)	$\frac{8.55}{6.40-9.87}$	$\frac{0.075}{0.020-0.130}$	$\frac{2.56}{0.70-4.09}$	$\frac{91.4}{14.0-168.8}$
Борнит сплошной из сульфидно-титаномагнетитовых шпиров и жил (9)	$\frac{9.64}{2.97-22.65}$	$\frac{0.32}{0.04-0.740}$	$\frac{1.61}{0.05-8.0}$	$\frac{80.4}{9.0-127.2}$
Халькопирит вкрапленный из рудного габбро (1)	8.50	—	1.00	—
Халькопирит сплошной средне- и крупнозернистый из сульфидно-титаномагнетитовых гнезд и жил (14)	$\frac{7.46}{0.04-25.20}$	$\frac{0.42}{0.010-1.556}$	$\frac{1.15}{<0.05-4.39}$	$\frac{65.4}{4.0-142.6}$
Пирит из прожилков в диоритах Черновского массива (11)	$\frac{0.20}{0.07-0.58}$	$\frac{0.03}{0.015-0.083}$	$\frac{0.08}{<0.05-0.15}$	$\frac{39.8}{0.7-124.5}$

ненность же габброидов Pt по сравнению с кларками ультрабазитов и базитов можно объяснить тем, что габброиды являлись расплавами, образовавшимися в результате фракционной кристаллизации базитовой магмы за счет отделения хромита (хроммагнетита) и пироксена. Эти минералы при параметрах магматического процесса ($P = 5$ кбар, $T = 1300-1100^\circ\text{C}$) характеризуются относительно высокими коэффициентами распределения: для Pt $K_p \geq 1.0$, тогда как для Pd $K_p \leq 1.0$ (Горбачев, 1989). В данном случае в результате фракционирования этих минералов могло произойти существенное обеднение базитового расплава Pt с образованием остаточного расплава, в котором концентрация Pd превышала содержание Pt. Судя по экспериментам (Борисов, 2007), наиболее вероятное объяснение может быть связано с весьма низкой растворимо-

стью Pt в Fe-содержащих расплавах в сильно восстановительных условиях.

Предполагается, что в процессе флюидно-магматической дифференциации происходило накопление БМ в образующихся минералах с преимущественным обогащением ими сульфидных фаз при проявлении следующих закономерностей (табл. 2, 4): 1) породообразующий пироксен безрудного “фонового” габбро беднее БМ, чем пироксен габбро с кумулятивным титаномагнетитом; 2) содержание БМ в титаномагнетите из массивных титаномагнетитовых руд выше, чем из бедновкрапленных титаномагнетитовых руд; 3) максимальное же насыщение БМ наблюдается в борните, особенно в рудных гнездах; 4) халькопириты также характеризуются высокими концентрациями БМ, вероятно, наследуемыми от замещенного борнита. Пирит, как было отмечено выше, генетически связанный со станов-

лением кварцсодержащей диоритовой интрузии (Черновский массив) характеризуется низкими содержаниями БМ, за исключением Ag.

При изучении благороднометаллической минерализации в медносульфидных и титаномагнетитовых рудах Волковского месторождения и сопоставлении ее с таковой в сульфидных рудах других, близких по генезису месторождений (Солт-Чак, Джорджи Лейк, Номгон), обращает на себя внимание тот факт, что на Волковском месторождении МПП пока не обнаружены ни в виде простых сульфидов (PdS, PtS и др.), ни в виде сульфопинелей (CuPt_2S_4 и др.). Такая закономерность является характерной чертой многих месторождений платиновой группы. Полагаем, что причина широкого развития на Волковском месторождении теллуридов БМ, а не их сульфидов, заключается в том, что палладий характеризуется наибольшим химическим сродством к теллуру, а не к сере, на что ранее нами уже обращалось внимание (Полтавец и др., 2006).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время существует две основные точки зрения на генезис Волковского месторождения: магматическая (Кашин, 1948; Тимохов, 1963; Николайченков, 1981; Фоминых, Клевцов, 1984) и метасоматическая (Штейнберг, Еремина, 1963; Ефимов и др., 2002).

В приведенных материалах авторами отстаивается позднемагматическая природа титаномагнетитовых и медносульфидных руд в габброидах Волковского массива.

Формирование оруденения происходило в основном в конечные этапы кристаллизации габбровой интрузии из остаточного флюидсодержащего (S, Cl, F и CO_2), обогащенного рудными компонентами расплава. Образование благороднометаллической минерализации имело место на протяжении всего рудообразующего процесса. На ранней стадии магматической дифференциации габброидного расплава в процессе кристаллизации породообразующих минералов концентрирование БМ происходило, вероятнее всего, в виде тончайших включений БМ-содержащих минералов в пироксене, титаномагнетите, а также, возможно, в роговой обманке и биотите. В ходе эволюции рудно-магматической системы в расплаве шло накопление Cu, S, Te и БМ, и на более поздних этапах магматической дифференциации в конечные этапы кристаллизации габбровой интрузии в участках формирования вкрапленных титаномагнетитовых и медносульфидных руд происходило массовое выделение БМ в виде самостоятельных минералов (теллуридов Pd), а также самородного золота. Максимальное же накопление (высокие концентрации) БМ связано с образованием шпиро- и жилоподобных обособлений из остаточных флюидов, обогащенных рудными и летучи-

ми компонентами. По мере снижения температуры кристаллизации габброидов процесс рудообразования переходил в гидротермальную стадию, масштабы проявления которого на месторождении весьма незначительны.

При формировании комплексных титаномагнетитовых и медносульфидных руд с сопутствующей благороднометаллической минерализацией имели место как процессы кристаллизационной (образование меланократовых габброидов с вкрапленностью титаномагнетита и сульфидов меди), так и флюидно-магматической дифференциации (образование “капельных” и шпировых форм оксидов и сульфидов Cu).

Формирование главных рудных минералов и БМ происходило в широком интервале температур (800–570°C). По расчетным данным, фугитивность серы находилась приблизительно в пределах: $\lg f_{\text{S}_2} \approx -6.0 \dots -16.0$ и $\lg f_{\text{Te}_2} \approx -1.0 \dots +6.0$ в интервале температур 800–570°C соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – “Урал” (проект 07–05–96057).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аникина Е.В., Мурзин В.В., Пушкарев Е.В. и др. Золото-палладиевое оруденение в Волковском габбровом массиве на Среднем Урале // Особенности формирования докембрийских базитовых комплексов Кодаро-Удоканской зоны. Иркутск, 2007. С. 342–347.
- Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2000.
- Борисов А.А. Форма нахождения благородных металлов в магматических расплавах: взгляд экспериментатора // Особенности формирования докембрийских базитовых комплексов Кодаро-Удоканской зоны. Иркутск, 2007. С. 352–356.
- Геология СССР. М.: Недра, 1972, Т. XII. Кн.2.
- Годлевский М.Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных рудных месторождений. М.: Недра, 1968.
- Горбачев Н.С. Флюидно-магматическое взаимодействие в сульфидно-силикатных системах. М.: Наука, 1989.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П., Волченко Ю.А. О платиноносности медносульфидных руд Серебрянского камня (Платиноносный пояс Урала) // Ежегодник-2001. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. С. 219–222.
- Золов К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А. и др. Платинородное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург: Департамент природных ресурсов по Уральскому региону, 2001.
- Кашин С.А. Медно-титаномагнетитовое оруденение в основных интрузивных породах Урала // Тр. ГИН АН СССР. 1948. № 9.
- Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро М. Цирконы из магматитов Тагильской и Магнитогор-

- ской зон как основа их возрастных и корреляционных соотношений // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 276–283.
- Маегов В.И.* К петрологии Волковского месторождения медносульфидных и апатит-титаномагнетитовых руд (Средний Урал) // Уральский геологический журн. 1999. № 5 (11). С. 57–73.
- Молошаг В.П., Коробейников А.Ф.* Новые данные о платиноидной минерализации медно-железо-ванадиевых руд // Магматические и метаморфические образования Урала и их металлогения. Екатеринбург: УрО РАН. 2000. С. 90–101.
- Мурзин В.В., Молошаг В.П., Волченко Ю.А.* Парагенезис минералов благородных металлов в медно-железо-ванадиевых рудах волковского типа на Урале // Докл. АН СССР. 1988. Т. 300. № 5. С. 1200–1202.
- Мурзин В.В., Аникина Е.В., Пушкарев Е.В., Викентьев И.В.* Изотопный состав флюида при формировании золото-палладиевого оруденения Волковского массива в Платиноносном поясе Урала // Ежегодник-2006. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 239–244.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеев В.А.* Магматические летучие и их участие в формировании рудообразующих флюидов // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 6. С. 520–529.
- Нечкин Г.С., Полтавец З.И.* Некоторые генетические особенности медных руд с благороднометальной минерализацией на Волковском месторождении (Средний Урал) // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 286–290.
- Нечкин Г.С., Шагалов Е.С.* Позиция и состав теллуридов Pd в медных рудах Волковского месторождения (Средний Урал) // Ежегодник-2003. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 316–319.
- Николайченков Ю.С.* Условия размещения природных типов руд на Волковском месторождении: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин.наук. Свердловск: СГИ, 1981. 21 с.
- Полтавец Ю.А.* Возможные физико-химические параметры формирования габброидов Волковского массива (Средний Урал) // Ежегодник-2003. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 187–189.
- Полтавец Ю.А., Молошаг В.П., Полтавец З.И.* О соотношении железа и магния в ильменит-магнетит-пироксеновой ассоциации и температурах их образования в габброида Волковского месторождения // Ежегодник-1995. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1996. С. 158–161.
- Полтавец Ю.А., Полтавец З.И., Нечкин Г.С.* Закономерности распределения и условия концентрирования рудообразующих (Fe, Cu) и сопутствующих (благородных металлов и др.) элементов на магматическом и постмагматическом этапах развития железосодержащих базальтоидных рудно-магматических систем Среднего Урала // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 406–426.
- Полтавец Ю.А., Сазонов В.Н., Полтавец З.И., Нечкин Г.С.* Закономерности распределения благородных металлов в рудных парагенезисах Волковского габбрового массива (Средний Урал) // Геохимия. 2006. № 2. С. 167–190.
- Структурно-текстурные особенности эндогенных руд. М.: Недра, 1964.
- Тимохов К.Д.* Связь медносульфидного и титаномагнетитового оруденения с вмещающими породами на Волковском месторождении // Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала. Свердловск, 1963. Т. 1. С. 439–443.
- Тимохов К.Д.* Закономерности локализации медносульфидного, титаномагнетитового и апатитового оруденения на Волковском месторождении (Средний Урал): Автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. М. 1967. 19 с.
- Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:100000. М.: ИМГРЭ, 1999.
- Уэйджер Л., Браун Г.* Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970.
- Фоминых В.Г., Клевцов Е.И.* Волковское месторождение // Формации титаномагнетитовых руд и железистых кварцитов: железорудные месторождения Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 72–91.
- Штейнберг Д.С., Еремина М.В.* Новые данные по петрологии Волковского месторождения // Магматизм метаморфизм, металлогения Урала. Свердловск, 1963. С. 431–439.
- Штейнберг Д.С., Фоминых В.Г., Еремина М.В. и др.* Состав титаномагнетитов в базитах и ультрабазитах Урала. Свердловск: УФАН СССР, 1965. Вып. 78.
- McDonough W.F., Sun S-s.* The composition of the Earth // Chem.Geology.1995. V. 120. P. 223–253.