

УДК 553.31:549.08

МОРФОСТРУКТУРНЫЕ И КОНСТИТУЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТИТАНОМАГНЕТИТА ЖЕЛЕЗНЫХ РУД ПУДОЖГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ¹

© 2015 г. И. Г. Быстров, Б. И. Пирогов, О. А. Якушина

ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского”
119015, Москва, Старомонетный пер., д. 31

Поступила в редакцию 16.03.2014 г.

Комплексом современных лабораторных минералого-аналитических методов детально исследованы титаносодержащие железные руды Пудожгорского месторождения. Определены морфоструктурные и конституционные особенности титаномагнетита. Выявлена генетическая природа сростаний рудных и нерудных минералов. Установлены типоморфные признаки титаномагнетита трех разновидностей (по степени неоднородности), характер структур распада с образованием ильменита, определяющие поведение руд в технологических процессах. Показана возможность комплексного освоения этих руд. Проведено сравнение титаномагнетита основных минеральных ассоциаций титан-ванадий-содержащих железных руд месторождений различных формационных типов.

DOI: 10.7868/S0016777015060076

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мировая экономика вплотную подошла к необходимости освоения комплексных месторождений. Истощение запасов легкообогатимых крупнозернистых руд в целом и, в частности, магнетитовых руд открытого способа добычи, незначительные запасы рутиловых и ильменитовых руд как сырьевой базы титана и отсутствие промышленных месторождений богатых ванадиевых руд приводят к дефициту данных видов металлургического сырья. В связи с этим в России и мире значительно возрастает роль титаносодержащих железных руд (титаномагнетитовых руд) как источника сырья для качественной металлургии, производства ферросплавов, пигментного диоксида титана, некоторых рассеянных элементов, цветных и благородных металлов. Их доля в структуре общих подтвержденных запасов железа, титана и ванадия составляет соответственно в России и в мире (без России): железные руды (Fe) – 13 и 6.50%, TiO_2 – 48 и 60%, V_2O_5 – 92 и 90% (Пахомов и др., 2010).

Актуальность исследования морфоструктурных и конституционных особенностей титаномагнетита и вещественного состава руды в целом определяется задачей промышленного освоения Пудожгорского месторождения титаномагнетитовых руд, прогнозом видов и качества получаемых продуктов и создания экономически оправданных (инвестиционно привлекательных) технологических схем их переработки.

На территории России на Урале, в Карелии и Сибири выявлено, разведано и в различной степени оценено более 40 месторождений титаномагнетитовых руд, относящихся к рудогенерирующей по отношению к процессам оруденения формации (Старостин, Игнатов, 2004), но при этом различным формациям по составу пород (Кузнецов, 1989; Цейслер, 1992; Борисенко и др., 1997). Во многом с этим связано ограниченное их вовлечение в промышленное освоение, сегодня на территории РФ разрабатывается только два титаномагнетитовых месторождения – Гусевогорское и Первоуральское. Хотя комплексное изучение титаносодержащих железных руд в СССР началось еще в 1928 г., но по-прежнему актуальна фраза И.И. Малышева, одного из первых исследователей титаномагнетитов Урала: “Месторождения титаномагнетитовых руд требуют дальнейшего углубленного изучения, геолого-экономической оценки и вовлечения в промышленное использование” (Малышев, 1957). Геолого-генетические типы коренных магматических титаномагнетитовых месторождений приведены в табл. 1. Горно-геологические особенности месторождений – широкое распространение, крупные запасы, сравнительно простое геологическое строение для открытой (карьерной) отработки, высокая комплексность титаномагнетитовых руд и возможность использования их отходов (щебень и др.) – актуализируют задачу нахождения технологических, экономически благоприятных решений освоения месторождений титаномагнетитовых руд, в том числе Пудожгорского, как комплексных.

¹ Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Третьей молодежной школе ИГЕМ РАН 02–06.12.2013 г. Адрес для переписки: И.Г. Быстров. E-mail: bysigv@gmail.com

Таблица 1. Геолого-генетические типы коренных магматических титаномagnetитовых месторождений (классификация Борисенко и др., 1997) с дополнениями авторов

| Магматическая формация | Особенности рудоносных массивов | Рудоносные породы | Форма тел и характер оруденения | Минеральные типы руд | Примеры типичных месторождений |
|----------------------------|---|---|---|--|--|
| Дунит-пироксенит-габбровая | Межформационные интрузии, вытянутые в виде поясов | Пироксениты, верлит, горнблендиты, габбро | Столбо- и лентообразная форма, руды вкрапленные, редко шширообразные и мелкопрожилковые | Титаномagnetитовые с ильменитом до 1 об. %; (с золотом и платиноидами) | Гусевогорское, Собственно-Качканарское |
| Расслоенных габброидов | Расслоенный плутон | Габбро-нориты, габбро | Линзо- и пластообразные тела вкрапленных и сплошных руд | Титаномagnetитовые с ильменитом | Чинейское (участок “Магнитный”) |
| Габбро-диабазовая | Вытянутые дайкообразные тела пологого залегания | Габбро-диабазы | Пластообразная форма, руды вкрапленные | Титаномagnetитовые с сульфидами; (с золотом, платиноидами) | Пудожгорское |

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

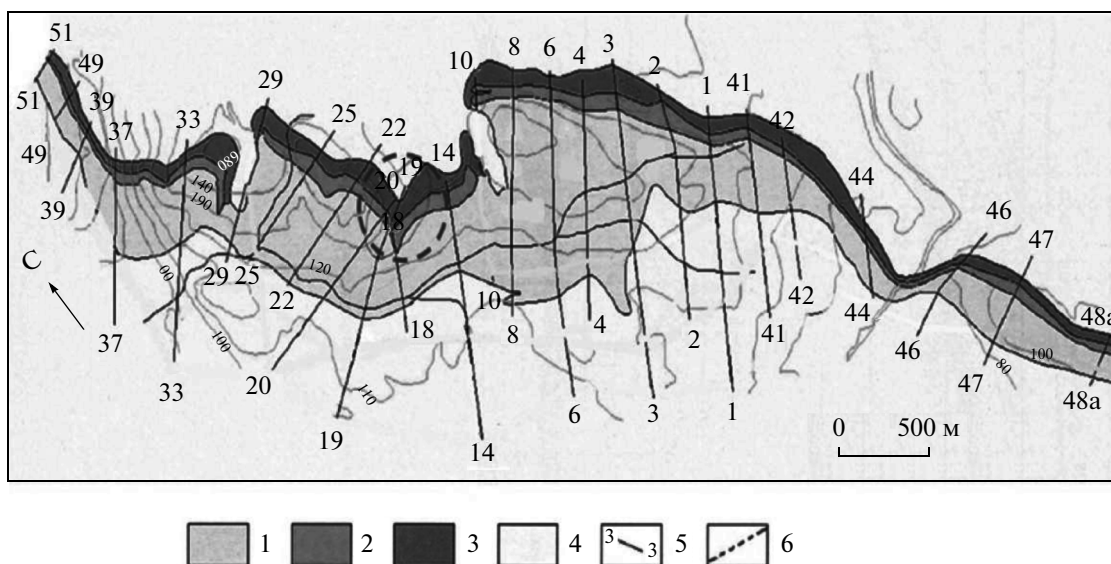
Пудожгорское месторождение титаносодержащих железных руд расположено на восточном берегу Онежского озера непосредственно у п. Пудожгорский и д. Римское Пудожского района Республики Карелия, его протяженность 7.1 км, координаты центральной части: 62°17'30" с.ш. и 35°54' в.д. Открыто в 1859 г. горным мастером Аносовым. Разведочные работы начаты в 1932 г. и проводились с перерывами до 1952 г.; после обнаружения благороднометалльной (Au–Pt–Pd) минерализации с середины 1980-х гг. Институт геологии КарНЦ РАН возобновил работы по исследованию руд месторождения.

В раннем протерозое на площади Карело-Кольского региона в условиях растяжения земной коры в связи с процессом рифтогенеза происходило одновременное и массовое внедрение расслоенных интрузивов. На границе Балтийского щита и Русской плиты, в области, наиболее благоприятной для разрыва сплошности земной коры, закладывается Беломорско-Лапландская рифтовая структура. С формированием Водлозерско-Сегозерского сводового поднятия связано внедрение крупнейшего на Балтийском щите Бураковского расслоенного плутона. В людиковийский этап активизации рифта произошло образование сводового поднятия более мелкого ранга — Бураковского блока Бураковского плутона, вызвавшего внедрение Пудожгорского интрузива и процессы минерации. Структура Пудожгорского рудного узла обусловлена характером тектонических деформаций, сопровождающихся развитием радиальной системы трещин, по наиболее крупной из которых шло внедрение Пудожгорского интрузива (Трофимов и др., 2005).

Пудожгорское месторождение комплексных Ti–V–Fe-руд с совмещенной Au–Pt–Pd-минерализацией относится к новому рудоформационному благороднометалльно-титаномagnetитовому типу, связанному с трапповой толеит-базальтовой магматической формацией. Приурочено к дифференцированному пологопадающему пластовому интрузиву кварцевых долеритов — субформация габбро-титаномagnetит-диоритовая (Кузнецов, 1989). U–Pb-возраст интрузива по циркону составляет 1984 ± 8 млн лет (Amelin *et al.*, 1995).

Вмещающие интрузив породы, по данным работы (Трофимов, Голубев, 2008), сложены нерасчлененным комплексом гранитов и гранитогнейсов архей-верхнепротерозойского возраста. Граниты представляют собой неравномерно-зернистые, нередко порфировидные массивные лейкократовые породы розового, светло-розового цвета, состоящие из плагиоклаза, микроклина, кварца, хлорита и биотита, magnetита (до 1%). Содержание темноцветных минералов незначительное — от 2–5 до 15%. В плане интрузив кварцевых долеритов имеет неправильную форму, меняющиеся горизонтальную и вертикальную мощности, непрямолинейные и извилистые контакты, которые повторяют контуры плоскостей трещин отрыва вмещающих пород. В областях смыкания кулис в тело интрузива глубоко вдаются гранитные блоки — линзы. При небольшой 100–140 м мощности интрузив контрастно дифференцирован от долеритов до диоритов и монцогранитов.

В разрезе интрузива (фиг. 1) выделено и подробно охарактеризовано в работе (Трофимов, Голубев, 2008) несколько горизонтов и слоев, переходы между которыми постепенные, без резких границ: эндоконтактные слои с зоной закалки, переходный слой верхних долеритов, обогащенный щелочами (альбит, анортит) и кремнеземом (свободным кварцем и гранофиром); и пять гори-



Фиг. 1. Геологическая карта Пудожгорского месторождения (Шипцов В.В. и др., 2012).

1 — подрудный горизонт; 2 — рудный горизонт; 3 — надрудная зона; 4 — граниты и гранитогнеисы; 5 — разведочная линия и ее номер; 6 — область отбора проб.

зонтов с постепенными переходами: подрудный, рудный (собственно титаномагнетитовый), надрудный горизонты долеритов с титаномагнетитом; гранофировый и такситовый. По данным отчета о предварительной разведке (Еселев и др., 1952ф) и работы (Трофимов, Голубев, 2008), подразделения и наименования последнего выделены полужирным шрифтом. Разрез Пудожгорского пластового интрузива подразделяется снизу вверх на следующие разновидности пород:

1. **Нижний эндоконтакт.** Метадиабазы тонкозернистые и афанитовые (1.8–5.2 м).

2. **Подрудный горизонт.** Диабазы (долериты) и габбро-диабазы (габбродолериты) мелкозернистые и среднезернистые, амфиболизированные (8–4 м, преимущественно 25–30 м).

3. **Рудный горизонт.** Общая мощность 20–25 м.

3.1. Диабазы и габбро-диабазы амфиболизированные, с густой и средней вкрапленностью титаномагнетита, представляющие собой промышленные титаномагнетитовые руды (**рудная залежь**) (7.4–23.2 м, средняя — 15 м).

3.2. Метадиабазы и метагаббро-диабазы среднезернистые и крупнозернистые с бедной вкрапленностью титаномагнетита (надрудный слой) (2–10 м, средняя — 4–5 м).

4. **Надрудный гранофировый и такситовый горизонты.**

4.1. Метадиабазы мелкозернистые (преимущественно 33–45 м, редко до 10 м).

4.2. Метадиабазы среднезернистые и крупнозернистые (уралитовый слой) (8–34 м, средняя — 15 м).

4.3. Кварцевые лейкократовые метадиабазы и лейкократовые метадиабазы с гранофиром (10–30%) (диабазовые пегматиты, 14–76 м).

5. Метадиабазы средне- и мелкозернистые (породы переходного слоя) (2–25 м).

6. **Верхний эндоконтакт** с постепенным переходом в слой 5. Метадиабазы тонкозернистые и афанитовые (1.6–3.4 м).

Степень раскристаллизованности пород в разрезе несколько раз изменяется от мелко- до средне- и крупнозернистых. Титаномагнетитовый горизонт составляет около 20% мощности интрузива, не имеет резких границ и плавно переходит в выше- и нижележащие горизонты. Титаномагнетит образует вкрапленные структуры по всему разрезу интрузива.

Руды Пудожгорского месторождения, как комплексное сырье, содержат следующие технологически доказанные, извлекаемые элементы в порядке их значимости: Ti, V, Fe, Pd, Pt, Au, Cu и Ag. Возможность использования вскрышных пород на строительный камень повышает технико-экономические показатели освоения месторождения. Запасы титаномагнетитовой руды, подсчитанные по промышленным категориям, составляют 316.7 млн т при содержании Fe — 28.9%, TiO₂ — 8.14%, V₂O₅ — 0.43%, меди в руде — 411.7 тыс. т. По содержанию основного элемента, титана, Пудожгорское уступает лишь двум месторождениям: Куранакскому, Амурская обл., с 14.2% TiO₂ и Гремяха-Вырмес, Мурманская обл., с 12.4% TiO₂ (Смирнов и др., 2004). Однако по качеству руд (низкому содержанию вредных примесей) превосходит все находящиеся на государственном балансе место-

рождения, характеризуясь самыми низкими содержаниями серы и фосфора (металлургическое производство) и красящих оксидов – Cr_2O_3 , MnO , P_2O_5 (лакокрасочное производство).

На месторождении ранее были выделены (Трофимов, Голубев, 2008) относительно богатые руды *рудного горизонта* с содержаниями $>25.0\%$ Fe, 8.45% TiO_2 и бедные руды *подрудного горизонта* с $20.0\text{--}25.0\%$ Fe и 6.4% TiO_2 .

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с тем, что сегодня Пудожгорское месторождение планируется к промышленной разработке, были проведены исследования вещественного состава титаномагнетитовых руд месторождения современным комплексом минералого-аналитических методов в рамках представлений технологической минералогии и учения об онтогении минералов (Григорьев, 1978, Пирогов и др., 1988), чтобы определить морфоструктурные особенности руды и получить дополнительные данные по оптимальной технологии ее переработки, поскольку целью и логическим завершением любых геолого-разведочных изысканий является именно промышленное освоение. Основное внимание в работе было уделено свойствам главного рудного минерала – титаномагнетита.

Материал для исследования взят из представительных технологических крупнокусковых штучных проб керна (150 мм) буровых скважин разведочных линий № 18, 19, 20 (фиг. 1) кернохранилища Карельской ГЭ. Пробы были отобраны главным геологом КУПРК “Карельская ГЭ” В.П. Михайловым и научным сотрудником ФГУП “ВИМС” В.М. Аликберовым. Проба Т1 – керн из надрудного и, в основном, рудного горизонтов был объединен в одну пробу, общий вес 608 кг, Проба Т2 – керн подрудного горизонта, вес 312 кг. Пробы представлены диабазами и габбро-диабазами с достаточно равномерной вкрапленностью титаномагнетита. Отбор образцов для оптико-минералогического, рентгеноспектрального, рентгенофазового (РФА), рентгеномографического ($\mu\text{РТ}$), ЯГРС исследований проведен с учетом макроскопически наблюдаемых изменений в их вещественном составе. Всего исследовано 27 прозрачно-полированных шлифов, 22 полированных шлифа (аншлифа), 3 монофракции ЯГРС, проведено 18 $\mu\text{РТ}$ -анализов, 45 РФА-анализов образцов и продуктов обогащения.

Полученные данные о вещественном составе сопоставлялись с фактическим материалом известных исследований (Фоминых и др. 1967, 1980; Пирогов и др. 1988, 2013) – по Качканарской группе; (Гонгальский, Криволицкая, 1993; Гонгальский, 2010) – по Чинейскому плутону, (Трофимов, Голубев, 2008) – по Пудожгорскому месторождению.

Это позволило обеспечить высокий уровень представительности полученных материалов и достоверности выводов.

Сложность переработки титаномагнетитовых руд в значительной степени связана с минералого-технологическими особенностям магматогенных титаномагнетитов, обусловленными изменчивостью состава при падении температуры кристаллизации в системе $\text{FeO}\text{--}\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--}\text{TiO}_2$ с образованием многоступенчатых структур распада рядов твердых растворов как с ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Это проявляется в том, что тонкие сростки магнетита и слабомагнитного ильменита вариативно изменяют магнитные свойства рудных агрегатов, затрудняют проведение магнитной сепарации, достижение полного раскрытия минералов методами обогащения, что снижает извлечение магнетита, а также затрудняют получение чистого ильменитового концентрата (Резниченко В.А., Шабалин Л.И., 1986).

Влияние множества факторов (температура кристаллизации, степень фугитивности кислорода ($f\text{O}_2$), состав вмещающих пород и др.) на смещение равновесия указанной системы приводит к образованию уникальной минеральной ассоциации полезных ископаемых не только для каждого месторождения, но и нередко для каждого его горизонта. Сложность состава и внутреннего строения рудных индивидов (которые являются микроагрегатами, сформированными сложными микрорастаниями), в первую очередь, обусловленная широким развитием структур многостадийного распада твердых растворов (РТР), диктует необходимость комплексного изучения этих руд. Фазовая неоднородность магнетита (структуры распада твердых растворов, структуры окисления, замещения и др.), в частности, как показано в работе (Жиляева и др. 1973), приводит к значительному варьированию его вторичных магнитных характеристик. Однако спектр методов, позволяющих получить информацию, необходимую для оценки минералого-технологических особенностей титаномагнетита, ограничен (Пирогов и др., 1988). Продукты распада представлены тонкими выделениями изоморфных рядов минералов группы шпинелей, практически неразличимых методами оптической микроскопии. Диагностические линии минералов этой группы также недостаточно хорошо разрешимы на дифрактограммах рентгенографического фазового анализа. Вместе с тем, установление элементных составов представителей группы шпинелидов и их взаимоотношений необходимо ввиду существенного влияния их на минералого-технологические особенности руд. Кроме того, важно также учитывать влияние захваченных в процессе кристаллизации минералов вмещающих пород (матрицы), чаще всего алюмосиликатов, и продуктов эволюции

Fe–Ti-шпинелей с наложенными процессами лейкоксенизации, маггемитизации, титанитизации. Указанными выше методами, наряду с определением валового химического состава руд, устанавливают морфоструктурные особенности макростроения изучаемого вещества и определяют задачи исследований на прецизионном оборудовании, что в результате позволяет снизить стоимость дальнейших аналитических работ. Однако этих данных недостаточно даже для предварительного прогноза технологических характеристик этих руд, поскольку необходимо знать тонкие особенности минерального состава, в том числе и на микроуровне, степень проявления структур многостадийного РТР, условия протекания и онтогенезу процесса.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование фазового (минерального) состава и строения, изучение тонких текстурно-структурных особенностей руд и вещественного состава руд Пудожгорского месторождения проведено на материале проб по горизонтам (надрудный, рудный, подрудный) и технологических проб (Т1, Т2) в минералогическом отделе ФГУП «ВИМС» комплексом современных физических методов, химические анализы выполнены в АСИЦ «ВИМС». Все анализы проводились по нормативно-методическим документам отраслевого Научного совета по аналитическим (НСАМ), минералогическим (НСОММИ) и технологическим (НСОМТИ) методам исследования (Нормативно ..., 2013).

Оптико-микроскопические исследования включали описание шлифов, минераграфический, оптико-петрографический, оптико-геометрический анализы, в т.ч. количественное определение содержания минералов в рудах и горных породах, гранулярный состав титаномагнетита по горизонтам в классифицированном по крупности материале на световом оптическом микроскопе МСБ-9 и стереомикроскопе высшего класса Leica MZ 12.5 В.

Прецизионные исследования включали рентгенографический фазовый анализ на рентгеновском дифрактометре X Pert PRO (Голландия), сканирующую (СЭМ) и просвечивающую (ПЭМ) электронную микроскопию (ЭМ) на растровом электронном микроскопе Tesla-301В (Словакия) с рентгеноспектральной приставкой Link Pentafet (Oxford Inst., Великобритания) и просвечивающем электронном микроскопе Теспаи-12В (Голландия). Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы Jeol Ltd. (Япония), оснащенном тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионной приставкой Link Pentafet (Oxford Inst., Великобритания). Впервые для исследования вещественного состава и морфометрических характеристик руды был применен метод рентге-

новской (микро)томографии (μ СТ) на микротомографе ВТ-50-1 «Геотом» (Проминтро, РФ). Измерения ЯГР-спектров проводились на спектрометре MS-1104 Em (РФ) с источником Co^{57} в матрице родия с обработкой спектров по программе UnivemMS сотрудниками НИТУ «МИСиС» под руководством д.г.-м.н. В.В. Коровушкина. Изомерный сдвиг определялся относительно α -Fe. Основным измеряемым параметром являлось соотношение площадей от ионов Fe^{3+} тетраэдрических позиций (А) в структуре магнетита и октаэдрических (В) от ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} (S_A/S_B) (теоретическое ≈ 0.5).

Температура Кюри магнетита (для чистого магнетита – 575°C) измерялась термогравиметрически на приборе STA 449 С (Германия) с магнитной приставкой.

На основе факторного анализа проведена статистическая обработка аналитических данных: химических анализов (авторов и из опубликованных работ), а также состава титаномагнетита по 8–10 замерам в точке и 5 площадям методом РСМА на каждом из 10 характерных анатомических срезов в каждой технологической пробе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главными полезными компонентами титаномагнетитовых руд являются Fe, Ti, V, попутными – Pt, Pd, Au, Ag (табл. 2). Химический состав проб Т1 и Т2 показывает, что по содержанию Fe пробы Т1 богаче проб Т2 в среднем на 4.0–4.5%. Среднее содержание Fe (%) для Т1 – 31.8, для Т2 – 27.8 в пересчете на оксид соответственно равно FeO – 18.0 и 16.2, Fe_2O_3 – 25.4 и 21.9. Отличаются пробы и по содержанию TiO_2 и V_2O_5 , соответственно (%): Т1 – 8.3 и 0.55; Т2 – 7.44 и 0.49. Суммы благороднометаллических элементов в пробах близки и составляют ≈ 0.58 г/т. Коэффициент основности руд для технологических проб ($\text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) низкий и составляет в пробах Т1 рудного+надрудного горизонта (0.23), Т2 подрудного (0.19). Вредные примеси, фосфор и сера, присутствуют в небольших количествах. Присутствие примеси фосфора незначительно – на уровне 0.01–0.07%. Такие низкие концентрации вредной примеси не повлияют на качество концентрата, так как в процессе переработки руды фосфор и сера (<0.10%) в основном будут удалены в хвосты обогащения.

ОПТИКО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Железные руды представлены в основном равномерновкрапленными и гнездово-вкрапленными типами (фиг. 2). Их особенностью является присутствие сульфидных минералов в виде выделений мелко- и тонкорассеянной вкрапленности,

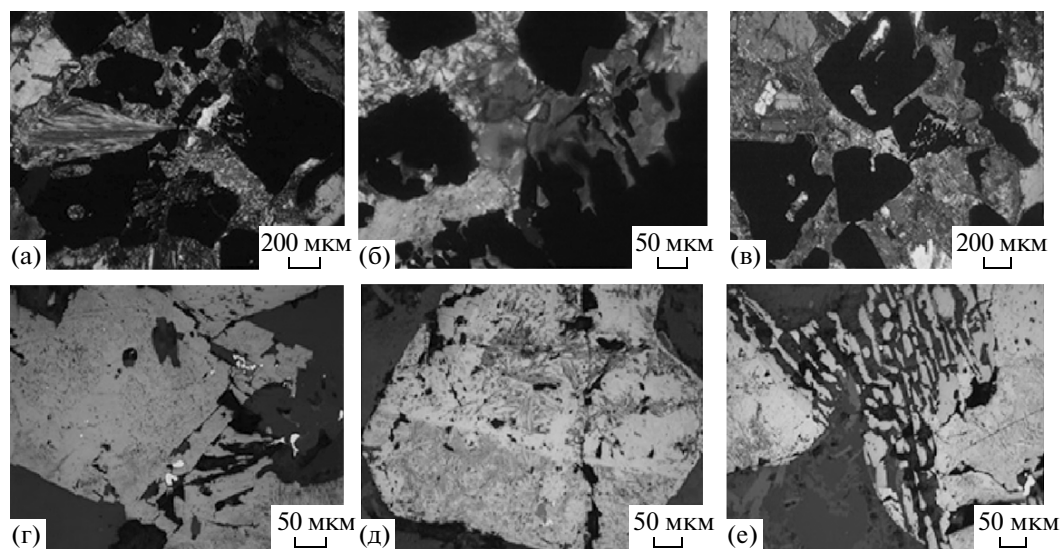
Таблица 2. Химический состав технологических проб руды Пудожгорского месторождения по технологическим горизонтам. (Методы анализа ICP-MS, фотометрический, гравиметрический, титриметрический, выполнены в АСИЦ “ВИМС”)

| Элемент | Горизонт | | Элемент | Горизонт | |
|--------------------------------|---------------|-------|---------|-----------------|--------|
| | T1 | T2 | | T1 | T2 |
| | содержание, % | | | содержание, г/т | |
| Fe _{общ.} | 31.80 | 27.90 | Be | 0.58 | 0.49 |
| FeO | 18.00 | 16.20 | Hf | 2.70 | 2.70 |
| Fe ₂ O ₃ | 25.40 | 21.90 | Se | 3.10 | 2.70 |
| TiO ₂ | 8.30 | 7.44 | Mo | 2.10 | 1.70 |
| V ₂ O ₅ | 0.55 | 0.49 | W | 1.20 | 2.60 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.01 | 0.01 | Sc | 26.00 | 20.00 |
| SiO ₂ | 27.40 | 31.50 | Y | 28.00 | 25.00 |
| MnO | 0.26 | 0.27 | Mo | 2.10 | 1.70 |
| CaO | 5.02 | 5.27 | Ba | 160.00 | 160.00 |
| K ₂ O | 0.72 | 0.77 | Cd | 0.25 | 0.32 |
| Al ₂ O ₃ | 9.50 | 11.00 | Sn | 3.70 | 5.00 |
| MgO | 3.08 | 3.00 | As | 2.50 | 2.00 |
| Na ₂ O | 1.40 | 1.75 | Pb | 8.50 | 12.00 |
| S _{общ.} | <0.10 | <0.10 | Bi | 0.03 | 0.02 |
| P ₂ O ₅ | 0.25 | 0.22 | Au | 0.10 | 0.10 |
| Ni | 0.03 | 0.03 | Ag | 0.30 | 0.30 |
| Co | 0.02 | 0.01 | Rh | 0.02 | 0.02 |
| Zn | 0.03 | 0.03 | Pd | 0.10 | 0.10 |
| Sr | 0.09 | 0.01 | Pt | 0.05 | 0.05 |
| Zr | 0.01 | 0.01 | Ir | 0.01 | 0.01 |

Ниже предела обнаружения: Te (<0.05), Re (<0.005), Li (<0.03).

как в рудных, так и в нерудных минералах. При микроскопическом изучении в рудах установлены структуры кристаллизации (гипидиоморфно-зернистая, ксеноморфнозернистая), замещения (периферийных оторочек и скелетная) и РТР. Главный рудный минерал – титаномагнетит, раз-

мер зерен всех его разновидностей варьирует от 0.2 до 6 мм, ильменит имеет подчиненное значение, его размеры, как правило, менее 100 мкм. Главные породообразующие минералы – плагиоклазы, пироксены и амфиболы, второстепенные – кварц, слюды, хлориты. Сульфиды и благород-



Фиг. 2. Морфоструктурные особенности и взаимоотношения зерен и агрегатов рудных и нерудных минералов рудного горизонта Пудожгорского месторождения. а, б, в – проходящий свет, николи скрещены, г, д, е – отраженный свет, николи параллельны.

Таблица 3. Морфоструктурные особенности титаномагнетита по данным оптико-геометрического и рентгено-томографического анализов

| Горизонты | Модальное содержание, об. % | Изрезанность | Размерность, мм | | | Удлинение |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------|--------|-------|-----------|
| | | | мин. | средн. | макс. | |
| Оптическая микроскопия | | | | | | |
| Надрудный | 15.1–34.0 (ср. 31.0) | 0.704 | 0.05 | 0.49 | 1.12 | 1.61 |
| Рудный | 21.3–42.1 (ср. 33.0) | 0.699 | 0.06 | 0.53 | 1.16 | 1.62 |
| Подрудный | 18.1–45.2 (ср. 29.2) | 0.681 | 0.06 | 0.52 | 1.14 | 1.58 |
| Рентгеновская (микро)томография | | | | | | |
| Надрудный | 13.01 | 0.791 | 0.03 | 0.189 | 0.834 | 1.49 |
| Рудный | 28.34 | 0.722 | 0.03 | 0.312 | 1.069 | 1.57 |
| Подрудный | 10.25 | 0.812 | 0.02 | 0.115 | 1.251 | 1.49 |

нометалльная минерализация содержатся в небольшом количестве, образуя мелкие скопления агрегатов в титаномагнетите, а также выполняя интерстиции среди породообразующих минералов.

Морфология зерен минералов (фиг. 2) характеризуется структурами дробления, приводящими к образованию вторичных микроблоковых зерен (частиц) различной формы с проявлением симплектитовых структур на основе силикатной, титаномагнетитовой и ильменитовой составляющих. Четко просматривается блочность агрегатов, блоки формируются как по структурам распада, так и по зонам двойникования в титаномагнетите (что особенно четко проявляется на электронно-микроскопических изображениях, см. ниже на фиг. 5–8). С целью определения оптимальной крупности дробления был выполнен расчет морфоструктурных параметров и гранулярного состава титаномагнетита двумя методами — оптико-геометрическим (аналитик Н.Н. Кривошеков) и рентгено-томографическим.

Было установлено, что титаномагнетит представлен зернами различной крупности и разной степени идиоморфизма (табл. 3), которые содержат включения разнообразных силикатов, распределенных в зерне нередко в виде округлых выделений размером 0.04–0.12 мм. Индивидуализированные зерна ильменита, образующего тонкие структуры распада, методами оптической микроскопии не диагностируются.

В руде присутствуют идиоморфные выделения плагиоклазов и пироксенов (средний размер зерен 0.17–1.9 мм), в том числе амфиболитизированных, в различных взаимоотношениях с титаномагнетитами. Пироксен нередко заполняет пространство между титаномагнетитом и плагиоклазом, а также сростается с титаномагнетитом. Из вторичных минералов проявлен биотит, тяготеющий к контакту с титаномагнетитом и нередко замещающий амфиболы совместно с хлоритом. Плагиоклаз неравномерно замещается эпидот-цоизитовым агрегатом, сосюритом, серицитом. Кварц встречается в виде мелких зерен в небольшом количестве (до 0.1 мм).

За счет различного характера замещений рудного и нерудного минералов на контакте зерен с образованием тонкодисперсных вторичных минералов возникает “ложный” тип сростаний, ослабляющий прочность границы на контакте и способствующий повышению степени раскрытия зерен при измельчении с образованием большого количества тонкодисперсного материала, осложняющего процессы сепарации.

РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЙ ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

Проведен полуколичественный рентгенофазовый анализ усредненных технологических проб Т1 и Т2 по Инструкции НСАМ № 21 “Рентгенографический количественный фазовый анализ (с использованием метода внутреннего стандарта)” (Нормативно ..., 2013). По данным РФА, с учетом общего химического состава (табл. 2), сделан расчет среднего минерального состава проб (табл. 4), показавший значимые различия в количестве рудных и нерудных минералов по пробам Т1 и Т2 — соответственно, титаномагнетита 36.5 и 30.0%, ильменита 2.5 и 4.0%. Кроме того, одновременно отмечается существенное увеличение содержания минералов групп амфиболов, слюд и гидрослюд, хлоритов, а также эпидот-цоизита. Вероятно, это указывает на то, что кроме характерного для рудных минералов аутометасоматоза, описанного в работе (Трофимов, Голубев, 2008), могли иметь место собственно метасоматические процессы с образованием пород амфибол-роговиковой фации, протекавшие при внедрении Пудожгорского плутона на контакте с вмещающими породами (принимая во внимание место отбора на границе рудного тела проб по разведочным линиям № 18–20, см. фиг. 1). Вопрос требует дополнительного изучения на специально отобранных пробах в зоне контакта. Геохимическая направленность в изменении поведения отдельных элементов позволяет увязывать соотношение кларков с формированием определенных минеральных ассоциаций руд на месторождениях и дополняет выдвинутые А.А. Маракушевым (Мара-

Таблица 4. Минеральный состав руды Пудожгорского месторождения, рентгенофазовый количественный анализ

| Проба | T1 | T2 |
|--|------------------|-------------|
| Минералы | Массовая доля, % | |
| Рудные минералы | 40.0 | 35.5 |
| Оксиды: | | |
| “Титаномагнетит” с учетом продуктов распада твердого раствора (магнетит-ульвошпинель, гематит-ильменит) и лейкоксенизации (рутил, анатаз, титанит) | 36.5 | 30.0 |
| Ильменит | 2.5 | 4.0 |
| Сульфиды: | | |
| Халькопирит, пирит, реже борнит, сфалерит, галенит | 1.0 | 1.5 |
| Нерудные минералы: | 60.0 | 64.5 |
| Силикаты: | | |
| Плагиоклазы (лабрадор, реже альбит, битовнит) | 24.0 | 30.0 |
| Амфиболы (роговая обманка, актинолит и др.) | 13.0 | 12.0 |
| Пироксены (авгит, диопсид-геденбергит) | 5.0 | 4.0 |
| Слюды (биотит, флогопит, серицит) и гидрослюды | 6.0 | 8.0 |
| Эпидот-цоизит | 5.0 | 4.0 |
| Хлориты и серпентин (гриналит) | 3.0 | 2.0 |
| Кварц | 2.0 | 2.0 |
| Прочие (апатит, титанит, шпинель, монацит, циркон, бадделеит, и др.) | 2.0 | 2.5 |

кушев, 1979) соображения об их генетической природе. Расплав, в значительной степени обогащенный Fe, Ti и летучими, является нестабильным и расщепляется при охлаждении на кислую и основную составляющие (Маракушев, 1988). Эти материалы также позволили нам более четко интерпретировать приведенные ниже данные, полученные методами математической статистики.

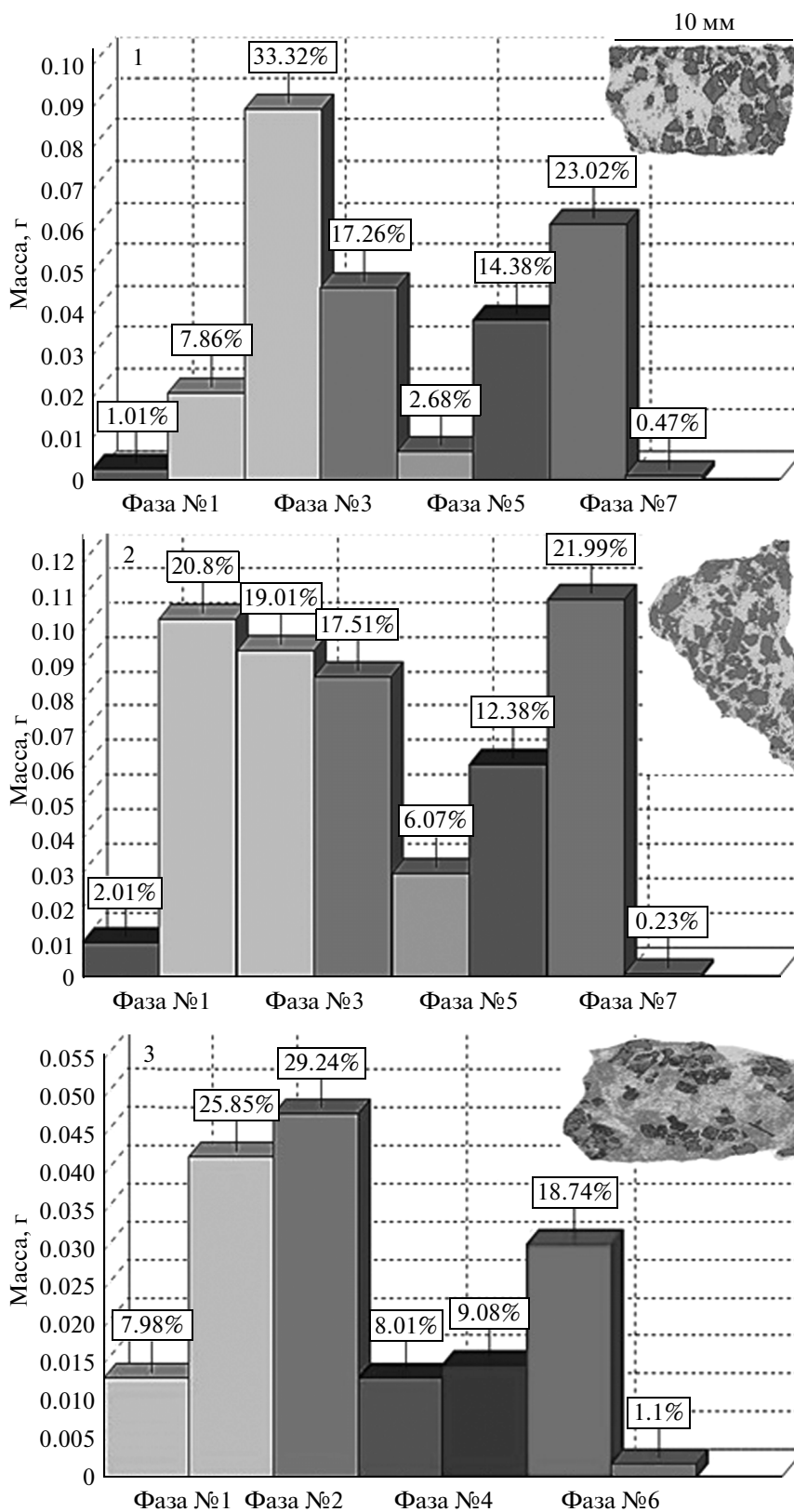
РЕНТГЕНОВСКАЯ (МИКРО)ТОМОГРАФИЯ

Для оперативного исследования характера раскрытия рудных минералов, неоднородности их зерен, сростков, агрегатов, в комплексе лабораторных физических методов исследования, опережая остальные исследования, нами был использован метод рентгеновской микротомографии (μ РТ). Анализ проводится без пробоподготовки, при естественном взаимоотношении минералов. Близость физических свойств или оптических характеристик рудообразующих минералов, тонкодисперсных, “рентгеноаморфных” фаз не является ограничением РТ-анализа. Идентификацию элементов неоднородности, морфоструктурное исследование (морфология, гранулярный состав, содержание выделенных фаз) проводят путем линейного и площадного анализов изображений томограмм на основе построения гистограмм частотного распределения амплитуды линейного коэффициента ослабления рентгеновских лучей (ЛКО) по оригинальной методике, описанной в (Якушина и др., 2003): при измерениях ЛКО используется образец сравнения, и диагностика элементов неоднородности (минеральных фаз)

проводится путем сопоставления отношений амплитуд ЛКО (αz) на томограмме (в эксперименте 64000 градаций величин ЛКО) для фазы и образца сравнения (как правило, алюминия, плотность которого наиболее близка к плотности породообразующих силикатов и алюмосиликатов) — с теоретически рассчитанными для них же отношениями эффективных величин ЛКО. Именно этот методический прием отличает использованную методику от других известных в томографии, когда изображения томограмм интерпретируют по шкале Хаунсфилда и/или в 256 градациях “оттенков серого”.

Методом μ СТ исследовано 18 образцов руд Пудожгорского месторождения из 3-х горизонтов (6 в каждом). Установлено, что руда сформирована сложными тонковкрапленными агрегатами (размером 30–150 мкм, в среднем ~50 мкм), равномерно распределенными в алюмосиликатной матрице (фиг. 3). В руде всех горизонтов присутствует не менее 3–4 рудных и 5–8 породообразующих минеральных фаз, выделяющихся по ЛКО. Томограммы демонстрируют, что титаномагнетит — это сложные магнетит-ильменитовые-ульвошпинелевые сростания, что свидетельствует в пользу определения титаномагнетита как минерального микроагрегата (Рамдор, 1962), с включениями 3–4 фаз нерудных минералов. Содержание рудных и породообразующих минеральных фаз в каждом горизонте, по данным μ СТ, соответствовало определенному методом РФА.

В результате исследования было установлено следующее:



Фиг. 3. Рентгенотомография титаномagnetитовых руд Пудожгорского месторождения. 1 – надрудный, 2 – рудный, 3 – подрудный горизонт. Обработка по “TomAnalysis”.

– прослеживается весьма противоречивая картина изменчивости гранулярного состава титаномагнетита различных горизонтов снизу вверх (гистограмма с переходом от подрудного к рудному и надрудному горизонтам) (фиг. 4а, б);

– по данным массовых значений величин зерен на гистограммах, выявляются следующие закономерности: зерна 3-х классов крупностью 0–0.125 мм по массе весьма незначимы (соответственно составляют 0.62, 0.31 и 0.37%); распределение зерен крупностью 0.125–0.25 мм подчиняется закону нормального распределения с центром значений по рудному горизонту, затем резко возрастает; массовый выход классов крупности 0.25–0.5 и 0.5–1 мм с изменением по параболе, причем изменения первого класса крупности соответствуют ее левому крылу с уменьшением выхода массового % от подрудного к рудному и надрудному горизонту, а по правому крылу параболы – наоборот. Более крупные зерна практически не наблюдаются;

– несколько иначе прослеживаются кажущиеся изменения в объемном гранулярном составе зерен: здесь значительное количество тонких зерен минерала фиксируется в классе крупности 0–0.044 мм, далее небольшие количества зерен без видимых закономерностей изменчивости характерны для 2-х классов крупности 0.044–0.125 мм, затем несколько увеличивается количество зерен минерала крупности 0.125–0.25 мм и 0.25–0.5 мм с довольно плавным незначительным подъемом кривой изменчивости, и, наконец, существенно уменьшается количество зерен крупностью 0.5 мм;

– более четко изменчивость выделений титаномагнетита проявляется по массовому гранулярному составу, отражая сложную генетическую природу минерала. Из гистограммы видно, что основная масса титаномагнетита по всем трем горизонтам приурочена к крупности $-1 + 0.25$ мм. Поэтому в процессе измельчения руд в каждой отдельной крупности продуктов степень раскрытия рудной фазы будет нарастать, но постоянно отставать от раскрытия нерудной фазы. Это связано с тем, что большая часть нерудных минералов, особенно первичных, крупнее рудных выделений, и за счет спайности, двойникования, трещиноватости, повышенной хрупкости раскрытие их должно опережать рудную фазу (как более пластичную);

– средний размер выделений минерала в целом по горизонтам рудного тела достаточно близок: 0.49 мм (надрудный), 0.53 мм (рудный), 0.52 мм (подрудный), соответственно, при незначительном увеличении изрезанности зерен: 0.704 – 0.699 – 0.681 мм и уменьшении удлинения: 1.61 – 1.62 – 0.158 мм, что было отражено выше (табл. 3) в сравнении с данными оптико-геометрического анализа;

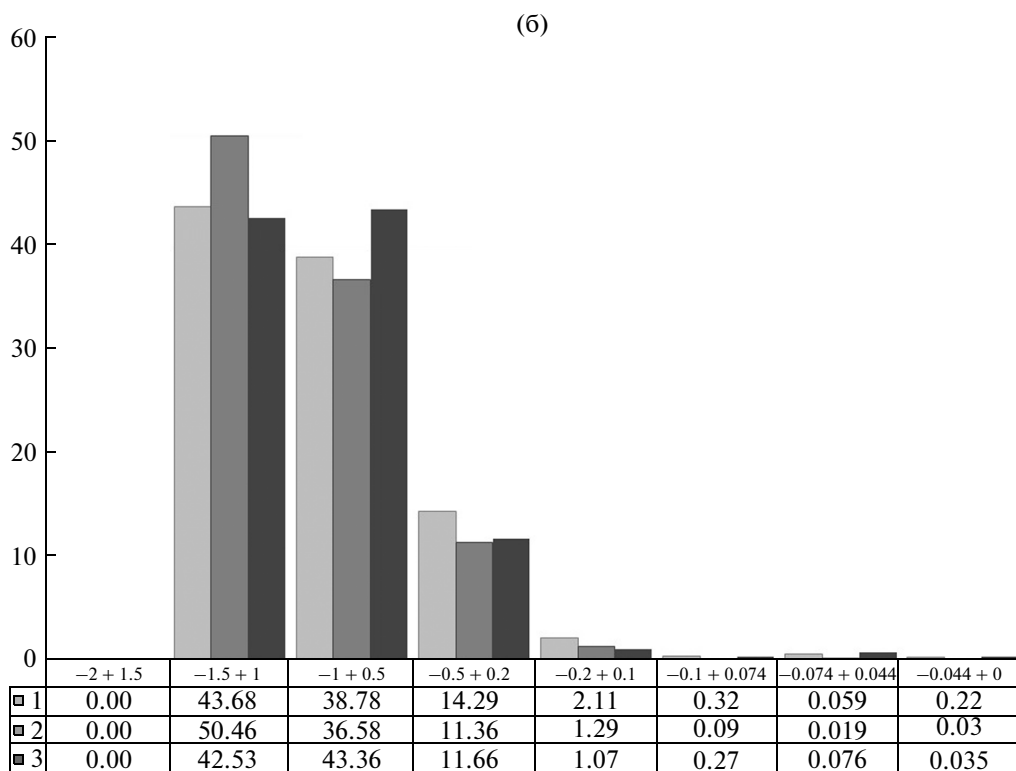
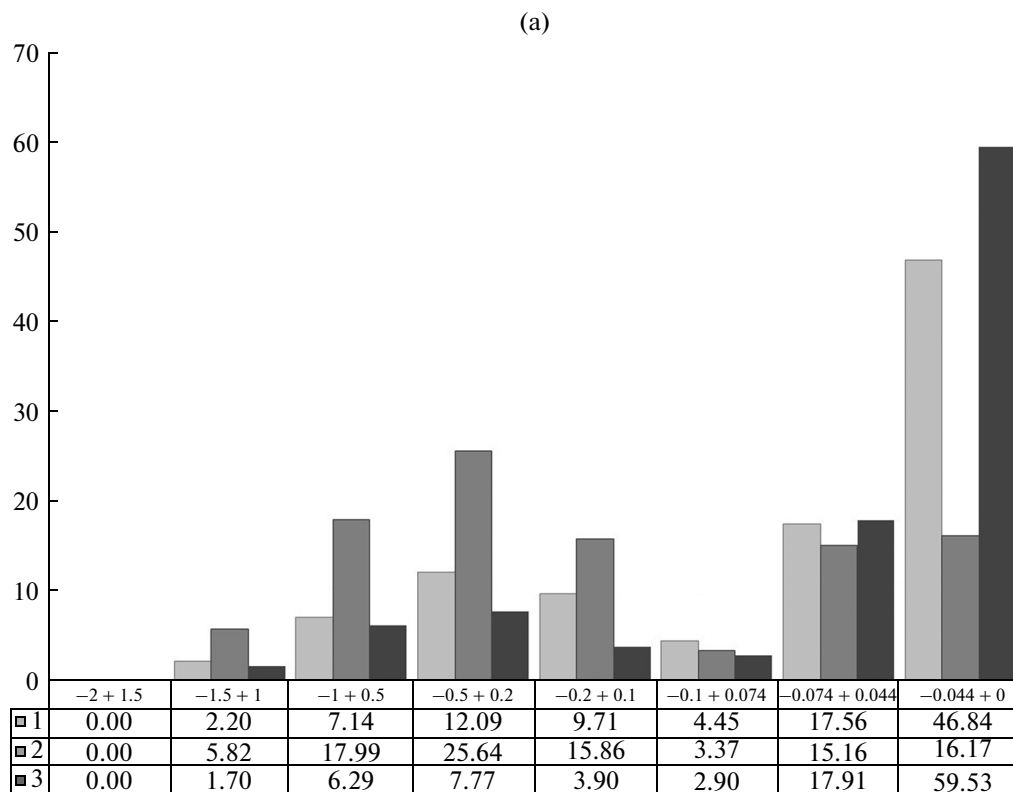
– изучение изменчивости модальных значений содержаний титаномагнетита в шлифах с учетом средних величин существенно не отличается для отдельных горизонтов, как это отражено соответственно в ряду изменений: 31 – 33 – 29.2%. Однако разброс в отклонениях содержаний весьма заметен и составляет: в надрудном горизонте – 19%, рудном – 21% и подрудном – 27%, что свидетельствует в целом о возрастании уровня неоднородности по мере углубления рудного тела.

ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ. РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫЙ МИКРОАНАЛИЗ

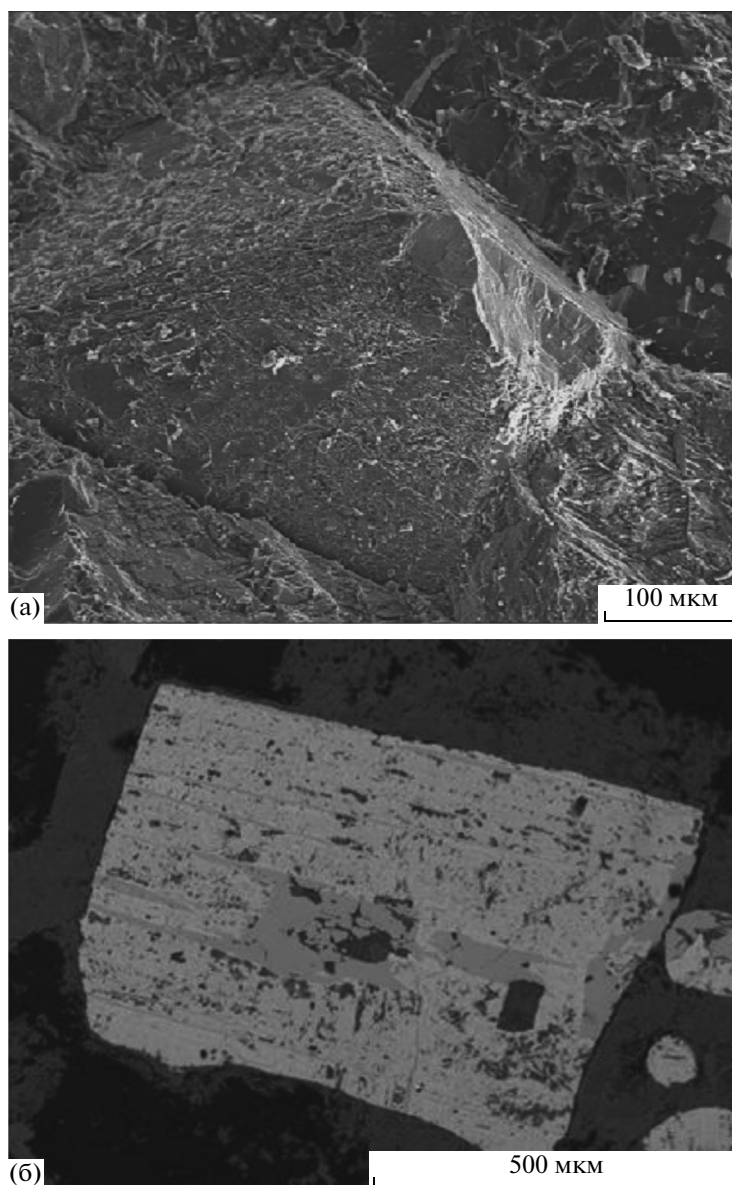
Титаномагнетит в руде представляет собой минеральный микроагрегат, который, по данным ЭМ и РСМА, характеризуется повышенной степенью идиоморфизма зерен (фиг. 5), при одновременном проявлении скелетных форм и зерен, разбитых на блоки, и с участками значительного разрушения за счет трещин и растяжений при замещении (вклинивании) и обрастании нерудными минералами (фиг. 6). Это обуславливает появление сложных типов сростаний. На поверхности минерала наблюдаются интенсивно коррозированные и частично выполненные нерудными минералами микротрещины (фиг. 7).

При изучении титаномагнетитовых руд чрезвычайно важна возможность проведения с высокой точностью (до 0.01%) не только анализа точечных содержаний химических элементов (Гаранин, Кудрявцева, 1983), но и корректного растрового микроразнообразного анализа. В работе (Пирогов и др., 2013) показано, что для учета реального состава титаномагнетита в связи с оценкой обогатимости руд, а также сложностью и многообразием выделений (фиг. 8) необходимо проводить исследования и оценку неоднородности минерала не только в точке, но и в пределах площади индивидуальных микроагрегатов. Это позволяет получить дополнительную информацию о генетических особенностях рудообразования (диагностика минеральных фаз, включений микро- и нано-микрометровой размерности, стадийности образования, генерации минералов, онтогенеза процесса минералообразования) и, что немаловажно, учитывать особенности изменчивости состава минерала в связи с поведением его зерен и обломочных малых частиц, давать прогноз эффективности раскрытия минералов при различной крупности измельчения и последующей магнитной сепарации, что в соответствии с работой (Павлишин и др., 1988) и должно быть одной из основных целей минералогических и онтогенетических исследований.

Для оценки уровня неоднородности титаномагнетита руд различными месторождениями, наряду с абсолютными значениями содержаний наиболее значимых элементов (Fe, Ti, V), использовались разработанные ранее (Пирогов и др., 2013) коэф-



Фиг. 4. Гранулярный состав (а – объемный, б – массовый) титаномагнетита Пудожгорского месторождения (сводные на пробу) по данным мРГ. 1 – надрудный, 2 – рудный, 3 – подрудный горизонт. Ось абсцисс – класс крупности, мм; ось ординат – выход класса, отн. %.



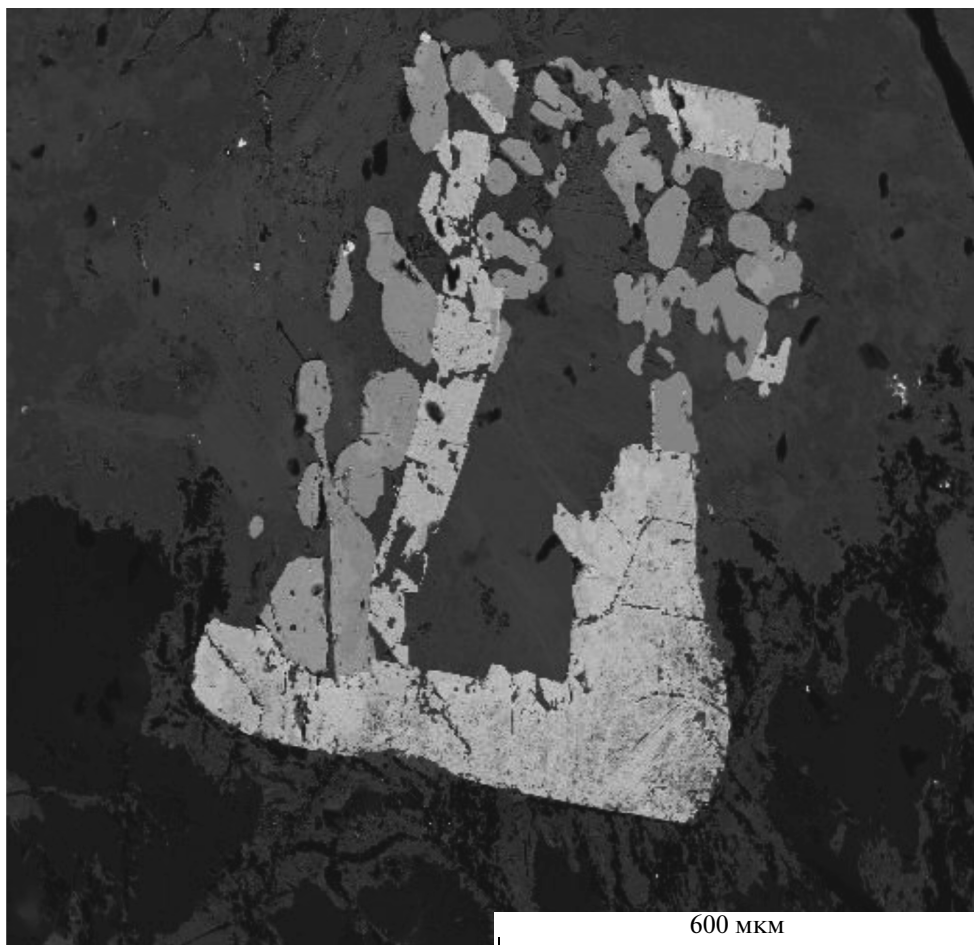
Фиг. 5. Морфология выделений титаномагнетита. а – октаэдрический кристалл (РЭМ). б – панидиоморфный микроагрегат (РСМА, изображение в обратно-рассеянных электронах).

фициенты титанистости (K_{Ti}) $[(TiO_2/Fe) \times 10^2]$ и ванадистости (K_V) $[(V_2O_3/Fe) \times 10^2]$, которые, по мнению авторов, позволяют более корректно оценивать степень изменчивости состава титаномагнетита в связи с оценкой обогатимости руд в целом.

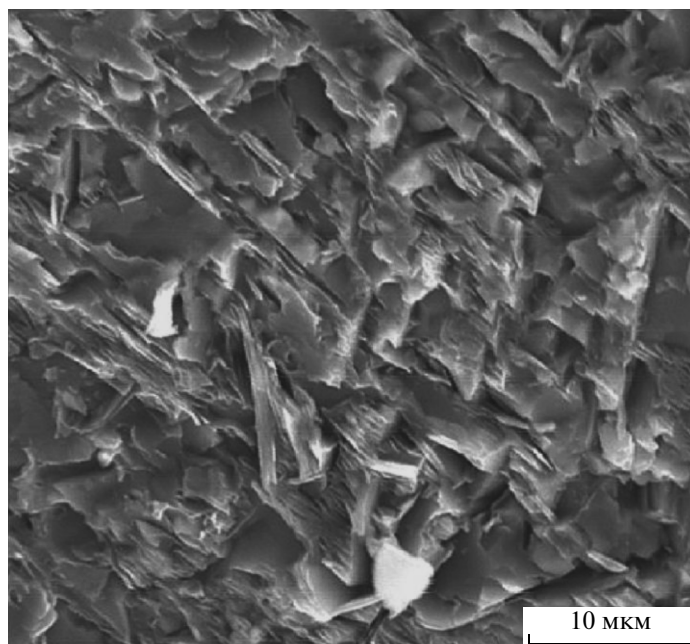
Средний элементный состав титаномагнетита рассматриваемых горизонтов, полученный методом РСМА (по 80 замерам в каждой площади), довольно близок, хотя и не отвечает чистому магнетиту (табл. 5), а является именно тонким агрегатом шпинелей и продуктов их эволюции в магнетитовой матрице. Элементный состав отдельных зерен титаномагнетита, установленный как в

точке, так и площадным сканированием, приведен в табл. 6. Растровым сканированием методом РСМА (табл. 7) установлено, что выделенные методом μ РТ преобладающие классы крупности титаномагнетита отвечают наиболее богатым ценными компонентами участкам (площадь $S = 0.001 \text{ мм}^2$ не учитывается в связи с высокой флокуляцией ПИ и нерудной минерализации при сильном измельчении), т.е. использование μ РТ упрощает определение оптимальной крупности дробления.

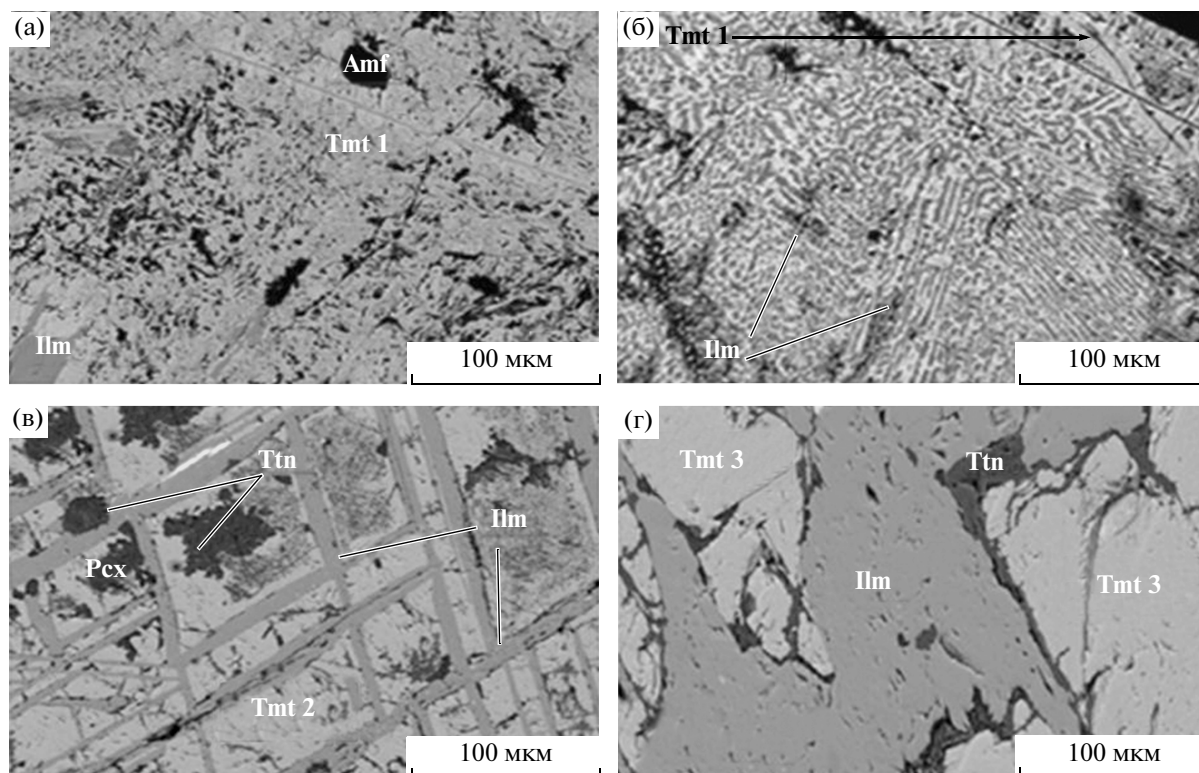
Сопоставление данных РСМА о составе титаномагнетита с результатами Мессбауэровской спектроскопии и термического анализа, выполненного для образцов из проб Т1 и Т2, позволяет сделать вы-



Фиг. 6. Скелетные формы титаномагнетита (белое) и перекристаллизовавшегося ильменита (светло-серое) в амфибол-пироксеновой матрице. (РСМА, изображение в обратно-рассеянных электронах).



Фиг. 7. Поверхности грани титаномагнетита интенсивно корродированы и частично замещены агрегатом пироксена и биотита (РЭМ).



Фиг. 8. Сложное тонкое строение агрегатов титаномагнетита, РСМА: а, б – подрудный горизонт, в, г – рудный горизонт. Принятые обозначения: Tmt 3 – низкотитанистый титаномагнетит, Tmt 2 – среднетитанистый титаномагнетит, Tmt 1 – высокотитанистый титаномагнетит, Ilm – ильменит, Ttn – титанит, Amf – амфибол, Pcx – пироксен.

вод, что содержание титана в монофракциях образцов не превышает 1–3%, т.к. для рудного и подрудного горизонтов получены близкие значения $S_A/S_B = 0.56$ и 0.57 ; $T_c = 555$ и 557°C соответственно. Основная часть титана связана с мелкокрапленными продуктами РТР, прежде всего, с ильменитом и ульвешпинелью. В то же время, даже детальное исследование матрицы магнетита методами РСМА и ЭМ не позволяет обнаружить все фазы развивающихся по ней компонентов, однако дает возможность проследить изменения в содержании основных компонентов (фиг. 9).

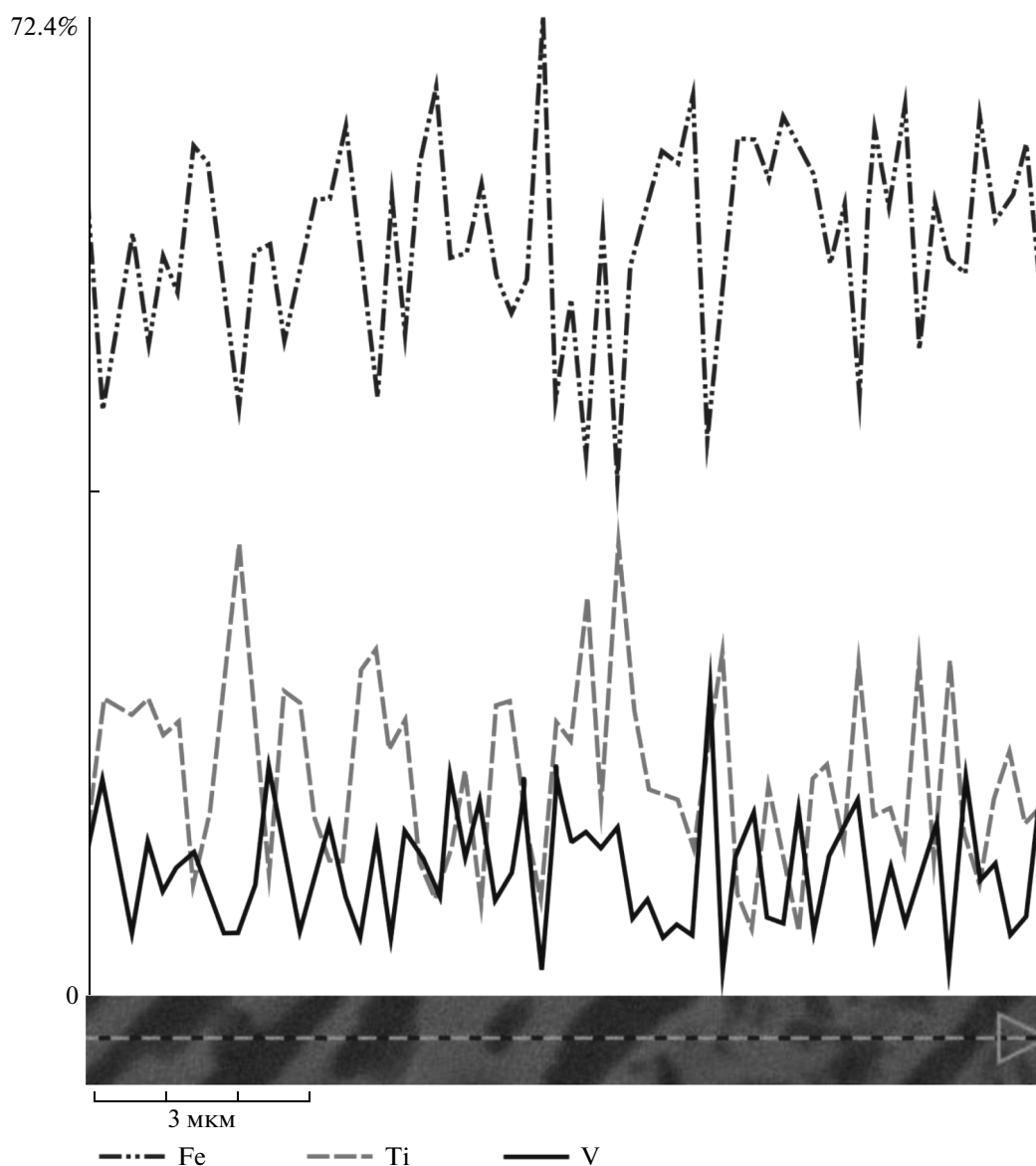
Таким образом, определение минералого-технологических особенностей титаномагнетита должно исходить из понятий титаномагнетит – индивид-микроагрегат (т.е. наличие двух и более микро/нано фаз, допускающее механическое выделение отдельных компонентов его слагающих) и титаномагнетит – индивид (механически неде-

лимое целое). Это важно для выбора технологии переработки руд, т.к. будет определять, возможно ли в принципе и до какого размера надо измельчать руду для селективного выделения, определять количество потери в хвостах обогащения. Провести разделение индивидов и микроагрегатов титаномагнетита можно только методом РСМА, и эти данные дают модель, понимание явления и могут быть экстраполированы на всю рудную залежь.

Ильменит присутствует в виде 4-х морфоструктурных разновидностей. Во-первых, микровыделения собственно ильменита в межзерновом пространстве. По данным РФА и пересчетов химического состава на минеральный, от 2/3 до 3/4 от общего содержания ильменита входит в состав матрицы собственно титаномагнетита (в виде продуктов РТР, выделений по трещинам отдельности титаномагнетита). Эта разновидность представлена ламелями, в т.ч. весьма тонкими иглками ильме-

Таблица 5. Средний состав титаномагнетита. Рентгеноспектральный микроанализ в точке (по 80 замеров на горизонт)

| Элемент | Na | Mg | Al | Si | Ca | Ti | V | Mn | Fe |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Горизонт | | | | | | | | | |
| Рудный | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 1.6 | 0.9 | 0.0 | 70.1 |
| Подрудный | 0.1 | 0.2 | 1.0 | 1.2 | 0.2 | 2.8 | 0.7 | 0.4 | 68.9 |



Фиг. 9. Изменение содержания основных компонентов при линейном сканировании участка титаномагнетита по выбранному сечению, изображенному под графиками содержаний, мас. %. РСМА.

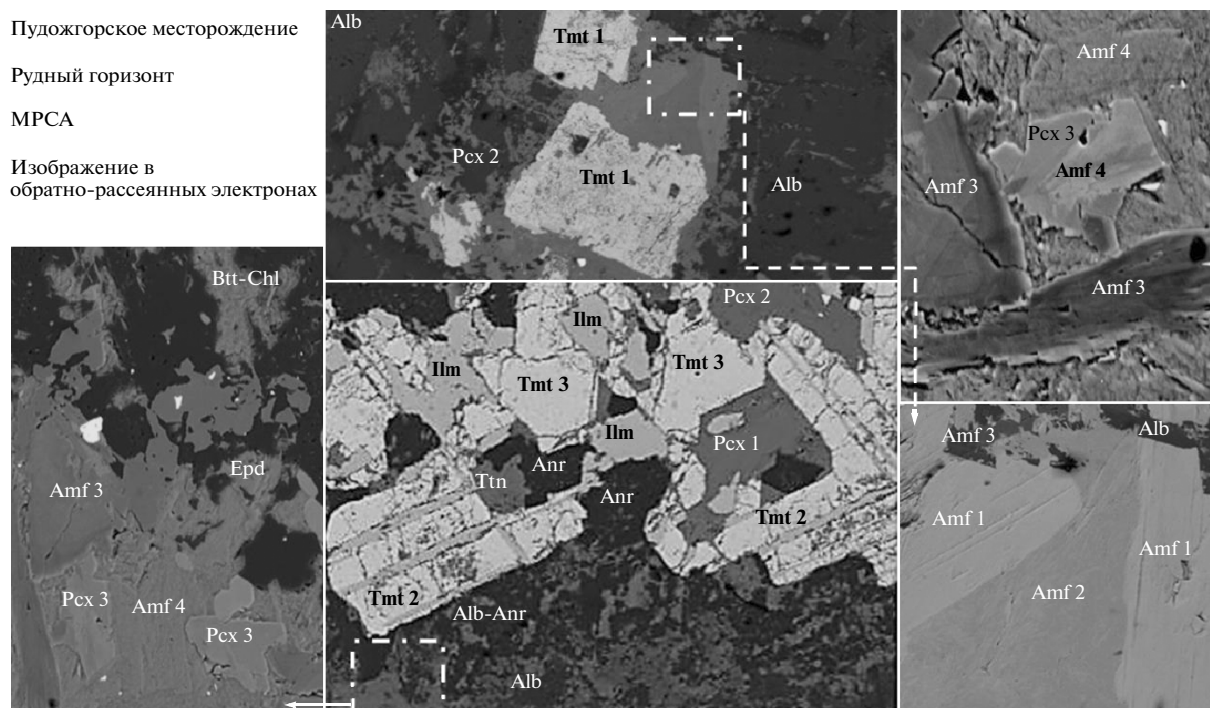
нита. Детальное ее исследование методом РСМА показывает, что среднее значение $K_{Ti} = 175.6$, в то время как для ильменита теоретического состава он равен 150.8 (при содержаниях $Fe = 36.9\%$ и $TiO_2 = 55.66\%$). Это позволяет высказать соображение о том, что в составе ламелей присутствует также и ульвит, который удалось наблюдать при большом увеличении (20 мкм) частиц на микрозонде. Третья, пластинчатая, разновидность ильменита характеризуется средними величинами $TiO_2 = 50.6\%$ и $Fe = 36.6\%$ при $K_{Ti} = 138.0$, что несколько ниже теоретических значений. Это обусловлено изоморфизмом Mn. Четвертый, блоковый ильменит по составу относится к слабомагнитному гемоильмениту (представляет собой твердый раствор ильменита и гематита).

Установлена минеральная фаза Fe-V изоморфного ряда шпинели – кульсонит $Fe^{2+}V_2^{3+}O_4$ и единичные микронные выделения самородного Ag и теллурида Ag в форме минерала гессита Ag_2Te .

Определение среднего содержания элементов в пределах площадей (табл. 6, 7) позволяет предложить решение вопросов, касающихся как генетических, так и минералого-технологических особенностей руд месторождения. В зависимости от содержания титаносодержащих минералов в матрице микроагрегата, титаномагнетиты могут быть подразделены на три категории по степени неоднородности: высокотитанистые (B-Tmt, Tmt 1) при содержании $Ti > 10.0\%$, среднетитанистые (C-Tmt,

Таблица 6. Элементный состав отдельных зерен титаномагнетита. Рентгеноспектральный микроанализ в точке и сканирование по площади (s)

| Индивид | Вид анализа | Fe _{общ} | Fe ^(II) , % | Fe ^(III) , % | Ti, % | V, % | FeO, % | Fe ₂ O ₃ , % | Fe ₃ O ₄ , % | TiO ₂ , % | V ₂ O ₃ , % | K _{Ti} | K _V |
|---------------------------|----------------|-------------------|------------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|
| Тит 1 | s1(300 μm) | 60.20 | 25.15 | 35.05 | 9.48 | 0.94 | 32.37 | 50.14 | 83.19 | 15.81 | 2.46 | 26.26 | 2.77 |
| | s2(200 μm) | 58.44 | 25.63 | 32.82 | 12.03 | 0.00 | 32.98 | 46.95 | 80.77 | 20.07 | 0.00 | 34.34 | 0.00 |
| | s3(100 μm) | 58.42 | 25.71 | 32.71 | 12.06 | 0.00 | 33.09 | 46.79 | 80.73 | 20.12 | 0.00 | 34.44 | 0.00 |
| | s4(50 μm) | 57.86 | 25.94 | 31.92 | 12.55 | 0.00 | 33.38 | 45.67 | 79.96 | 20.94 | 0.00 | 36.19 | 0.00 |
| | Точка | 56.09 | 25.00 | 31.10 | 13.99 | 0.00 | 32.17 | 44.49 | 77.52 | 23.33 | 0.00 | 41.59 | 0.00 |
| | Точка | 58.72 | 24.86 | 33.86 | 11.73 | 0.00 | 31.99 | 48.44 | 81.14 | 19.57 | 0.00 | 33.33 | 0.00 |
| | Точка | 62.24 | 24.80 | 37.44 | 8.70 | 0.00 | 31.92 | 53.56 | 86.01 | 14.52 | 0.00 | 23.33 | 0.00 |
| | Точка | 61.70 | 25.17 | 36.54 | 9.20 | 0.00 | 32.39 | 52.27 | 85.27 | 15.35 | 0.00 | 24.88 | 0.00 |
| | Среднее | 59.21 | 25.28 | 33.93 | 11.22 | 0.12 | 32.54 | 48.54 | 81.83 | 18.71 | 0.31 | 31.80 | 0.35 |
| | s1(300 μm) | 53.14 | 23.67 | 29.47 | 15.54 | 0.82 | 30.46 | 42.16 | 73.43 | 25.92 | 2.15 | 48.78 | 2.75 |
| Тит 2 | s2(100 μm) | 57.31 | 25.09 | 32.22 | 11.89 | 1.00 | 32.29 | 46.09 | 79.20 | 19.84 | 2.63 | 34.62 | 3.12 |
| | s3(100 μm) | 58.82 | 25.14 | 33.68 | 10.52 | 1.08 | 32.35 | 48.19 | 81.29 | 17.54 | 2.82 | 29.82 | 3.26 |
| | s4(50 μm) | 58.61 | 24.95 | 33.66 | 10.80 | 0.96 | 32.11 | 48.16 | 81.00 | 18.01 | 2.53 | 30.73 | 2.93 |
| | s5(50 μm) | 59.87 | 24.91 | 34.96 | 9.69 | 0.99 | 32.06 | 50.01 | 82.74 | 16.16 | 2.59 | 26.99 | 2.94 |
| | s6(50 μm) | 60.20 | 25.15 | 35.05 | 9.48 | 0.94 | 32.37 | 50.14 | 83.19 | 15.81 | 2.46 | 26.26 | 2.77 |
| | Точка | 59.46 | 26.62 | 32.84 | 10.09 | 1.08 | 34.26 | 46.98 | 82.17 | 16.83 | 2.84 | 28.31 | 3.25 |
| | Точка | 63.59 | 24.05 | 39.54 | 6.31 | 1.09 | 30.95 | 56.57 | 87.88 | 10.52 | 2.87 | 16.54 | 3.07 |
| | Точка | 61.17 | 24.76 | 36.41 | 8.60 | 0.96 | 31.86 | 52.09 | 84.53 | 14.34 | 2.53 | 23.44 | 2.81 |
| | Точка | 65.63 | 25.82 | 39.82 | 4.56 | 1.23 | 33.23 | 56.96 | 90.71 | 7.61 | 3.24 | 11.59 | 3.35 |
| | Точка | 60.32 | 24.59 | 35.73 | 9.32 | 0.95 | 31.65 | 51.11 | 83.36 | 15.54 | 2.50 | 25.76 | 2.82 |
| Среднее | 59.83 | 24.98 | 34.85 | 9.71 | 1.01 | 32.14 | 49.86 | 82.68 | 16.19 | 2.65 | 27.53 | 3.01 | |
| Тит 3 | s1(100 μm) | 60.98 | 24.55 | 36.44 | 8.65 | 1.04 | 31.59 | 52.13 | 84.28 | 14.43 | 2.72 | 23.66 | 3.03 |
| | Точка | 60.94 | 23.76 | 37.18 | 8.60 | 1.06 | 30.58 | 53.19 | 84.22 | 14.34 | 2.78 | 23.53 | 3.10 |
| | Точка | 59.31 | 23.84 | 35.47 | 10.13 | 0.94 | 30.68 | 50.74 | 81.96 | 16.9 | 2.47 | 28.50 | 2.83 |
| | Точка | 62.27 | 24.05 | 38.22 | 7.43 | 1.10 | 30.95 | 54.68 | 86.06 | 12.4 | 2.88 | 19.91 | 3.15 |
| | Среднее | 60.87 | 24.05 | 36.83 | 8.70 | 1.03 | 30.95 | 52.69 | 84.13 | 14.52 | 2.72 | 23.90 | 3.03 |
| Среднее по А, Б, В | | 59.97 | 24.77 | 35.20 | 9.88 | 0.72 | 31.88 | 50.36 | 82.88 | 16.47 | 1.90 | 27.74 | 2.13 |



Фиг. 10. Характер взаимоотношения силикатов с титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах.

Принятые обозначения: Tmt 3 – низкотитанистый титаномагнетит, Tmt 2 – среднетитанистый титаномагнетит, Tmt 1 – высокотитанистый титаномагнетит, Ilm – ильменит, Ttn – титанит, Alb – альбит, Anr – анортит, Pcx – пироксен, Amf – амфибол, Epd – эпидот, Btt – биотит, Chl – хлорит.

Tmt 2) с 6.0–10.0% Ti и низкотитанистые (Н-Tmt, Tmt 3) с Ti < 6.0%.

Изучение нерудной минерализации методами РСМА и ЭМ позволило получить информацию как о составе различных силикатов, так и характере их взаимоотношений с другими минералами и в целом о некоторых особенностях условий их формирования (фиг. 10). Нерудные минералы представлены различными типами силикатов и продуктами

их изменений – пироксенами, амфиболами, вероятно, захваченными в процессе кристаллизации из вмещающей матрицы, хлоритом, развивающимся по амфиболу, и титанитом. В данном случае титанит необходимо рассматривать как продукт окисления ильменита и (или) ульвешпинели. В большей степени подвержены процессам метасоматоза минералы руд подрудного горизонта. Они претерпели изменения в связи с проявлением на-

Таблица 7. Результаты растрового* рентгеноспектрального микроанализа образцов руд Пудожгорского месторождения, мас. %

| Площадь, мм ² | Na | Mg | Al | Si | Ca | Ti | V | Mn | Fe | Горизонт |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----------|
| 0.001 | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 1.5 | 0.9 | 0.0 | 70.2 | Рудный |
| | 0.2 | 0.9 | 1.7 | 1.9 | 0.2 | 9.1 | 0.7 | 0.5 | 53.9 | Подрудный |
| 0.003 | 0.3 | 0.6 | 1.0 | 1.3 | 0.1 | 9.7 | 0.7 | 0.3 | 56.7 | Рудный |
| | 0.3 | 0.5 | 1.0 | 2.7 | 2.2 | 12.3 | 0.7 | 0.4 | 49.1 | Подрудный |
| 0.02 | 0.2 | 0.6 | 1.2 | 1.1 | 0.1 | 10.9 | 0.7 | 0.4 | 55.3 | Рудный |
| | 0.2 | 1.3 | 2.6 | 4.2 | 2.1 | 10.7 | 0.7 | 0.3 | 47.9 | Подрудный |
| 0.05 | 0.2 | 0.7 | 1.5 | 0.7 | 1.5 | 2.3 | 0.6 | 0.4 | 65.8 | Рудный |
| | 0.1 | 0.2 | 1.2 | 0.8 | 0.0 | 10.6 | 0.9 | 0.3 | 62.5 | Подрудный |
| 0.40 | 0.0 | 0.6 | 1.2 | 2.5 | 1.8 | 11.4 | 0.8 | 0.4 | 52.4 | Рудный |
| | 0.2 | 0.5 | 1.4 | 1.6 | 0.6 | 11.2 | 0.8 | 0.5 | 52.3 | Подрудный |

Примечание. * Площадь анализа выбрана в соответствии с принятыми классами крупности измельчения. Площадь $S = 0.001 \text{ мм}^2$ не учитывается при обсуждении ввиду высокой флокуляции ПИ и нерудных минералов при переизмельчении.

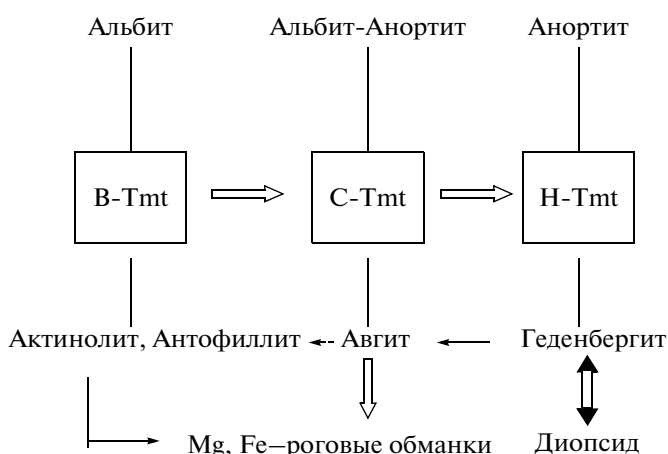
ложенных процессов метасоматоза в связи с трещиноватостью и образованием сложных форм прорастаний одних минералов другими. Кроме моноклинной разновидности пироксена – авгита (Трофимов, Голубев, 2008) нами установлены пироксены диопсид-геденбергитового ряда и подтверждена видовая принадлежность амфиболов, широко распространенных в рудах месторождения (табл. 8). Номенклатура пироксенов приведена по классификации (Morimoto, 1989), амфиболов по (Hawthorne et al., 2012).

В результате проведенного комплекса исследований выявлена четкая взаимосвязь, предвиденная А.А. Маракушевым (Маракушев, 1979, 1988), в рудах месторождения между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости. Согласно работам А.А. Маракушева (Маракушев, 1979, 1988), охлаждение нестабильного расплава, обогащенного Fe, Ti, летучими и др., вызывает мобилизацию этих элементов в габброидную (основную) фазу. При этом по мере остывания подвижность элементов постепенно снижается. Таким образом, для низкотитанистого титаномагнетита характерны ассоциации с более высокотемпературными нерудными минералами, в случае Пудожгорского месторождения – с анортитом и геденбергитом. Для среднетитанистого минерала характерна ассоциация лабрадор–авгит, для низкотитанистого – альбит–актинолит–антофилит. Характерные ассоциации нерудных минералов, их связь с уровнем титанистости титаномагнетита и влияние на них вторичных процессов минералообразования отражены на фигурах 10, 11.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для принципиального решения вопросов, касающихся как генетических, так и минералогических особенностей титаномагнетита руд месторождения, надо установить взаимосвязи между отдельными компонентами, в первую очередь химическими элементами, слагающими минеральные индивиды, агрегаты и руды в целом. Для выявления этих связей нами проведена обработка данных об элементном составе Пудожгорского интрузива методами математической статистики с использованием программного пакета Statistica.

Информацию о неоднородности титаномагнетита и взаимосвязях слагающих минерал элементов дает корреляционный анализ. Близость и направленность связей между парами признаков определяется величиной и знаком корреляции r (табл. 9). Взаимосвязь пары признаков считается установленной (при уровне значимости 0.05), если абсолютное значение коэффициента корреляции превышает величину 0.20, с помощью критерия t (Fisher, Frank, 1963) с учетом числа проб, в нашем случае 98.



Фиг. 11. Взаимосвязь между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах месторождения.

Так, оценка корреляционной матрицы элементного состава титаномагнетита рудного тела в целом (данные РСМА) по критерию Фишера позволила нам выявить обратные связи между Ti–Fe ($r = -0.97$), Ti – V ($r = -0.63$) и прямую связь между V–Fe ($r = 0.69$), а также средние связи Ti–Si ($r = 0.38$), Ti–Ca ($r = 0.35$) и сильную прямую связь Mn–Ti ($r = 0.92$), при этом между элементами, отнесенными в разные группы, наблюдается сильная обратная связь. Вероятнее всего, это связано с понижением общего содержания Fe в минерале вследствие выделения как продукта РТР ильменита с его последующим переходом в титанит. Прямая корреляционная связь Fe–V явно указывает на вхождение V в виде изоморфной примеси в магнетит, а также на наличие собственной минеральной Fe–V-фазы – кульсонита (диагностирован РСМА в единичных наблюдениях). Интересна также слабая обратная связь K с Fe–Ti–V ($r \approx -0.30$) при такой же прямой с Si и чуть меньшей с Al ($r = 0.25$), которая указывает на потерю ценных компонентов титаномагнетитом при образовании слюд.

Наиболее принципиально (Вистелиус, 1980) особенности химического состава руд и минералов можно охарактеризовать, используя факторный анализ. Факторный анализ, проведенный по данным о химическом составе образцов титаномагнетита, отобранных с разных глубин рудной залежи (данные авторов и работы (Трофимов, Голубев, 2008), позволил выделить изменения, происходившие с рудным минералом по всей глубине интрузива. Веса факторов (фиг. 12, табл. 10) показали, что в процессе формирования элементного состава титаномагнетита участвуют 3 фактора, несущих более 82% общей дисперсии.

Величины собственных значений и веса факторов указывают, что значения исследуемых характеристик титаномагнетита определяются на

Таблица 8. Элементный состав и кристаллохимические формулы нерудных минералов Пудожгорского месторождения. Рентгеноспектральный микроанализ

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | TiO ₂ | V ₂ O ₅ | MnO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | Минерал |
|--|--------------------------------|-------|-------|------------------|-------------------------------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| 45.62 | 35.02 | 0.03 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 18.24 | 1.15 | 0.00 | Анортит |
| $\text{Na}_{0.10}\text{Ca}_{0.90}\text{Al}_{1.90}\text{Si}_{2.10}\text{O}_8$ | | | | | | | | | | |
| 69.68 | 29.44 | 0.23 | 1.12 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 11.97 | 4.70 | 0.20 | Альбит – Анортит |
| $\text{Ca}_{0.58}\text{Na}_{0.42}\text{Al}_{1.58}\text{Si}_{2.4}\text{O}_8$ | | | | | | | | | | |
| 69.68 | 21.52 | 0.10 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.38 | 12.72 | 0.00 | Альбит |
| $\text{Na}_{1.00}\text{Al}_{1.05}\text{Si}_{2.95}\text{O}_8$ | | | | | | | | | | |
| 54.02 | 0.81 | 16.62 | 2.90 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 24.46 | 0.57 | 0.00 | Геденбергит – Диопсид |
| $(\text{Ca}_{0.96}\text{Na}_{0.04})(\text{Mg}_{0.90}\text{Fe}_{0.09}\text{Mn}_{0.02})_{1.01}(\text{Si}_{1.98}\text{Al}_{0.04})_{2.02}\text{O}_6$ | | | | | | | | | | |
| 51.26 | 1.91 | 7.23 | 16.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 22.34 | 1.09 | 0.00 | Диопсид – Геденбергит |
| $(\text{Ca}_{0.92}\text{Na}_{0.08})(\text{Mg}_{0.41}\text{Fe}_{0.52}\text{Al}_{0.07})_{1.00}(\text{Si}_{1.98}\text{Al}_{0.02})_{2.00}\text{O}_6$ | | | | | | | | | | |
| 49.31 | 5.02 | 7.42 | 16.20 | 0.26 | 0.05 | 0.00 | 16.90 | 3.90 | 0.01 | Авгит |
| $(\text{Ca}_{0.70}\text{Na}_{0.28}\text{K}_{0.01})_{0.99}(\text{Mg}_{0.48}\text{Fe}_{0.51}\text{Mn}_{0.005}\text{Al}_{0.095})(\text{Si}_{1.86}\text{Al}_{0.13}\text{Ti}_{0.01})\text{O}_6$ | | | | | | | | | | |
| 36.18 | 11.69 | 9.29 | 38.01 | 0.32 | 0.02 | 0.26 | 0.03 | 0.42 | 0.01 | Актинолит |
| $(\text{Fe})_2(\text{Mg}_{2.15}\text{Fe}_{0.81}\text{Mn}_{0.04})(\text{Fe}^{3+}_{1.96}\text{Ti}_{0.04})(\text{Si}_{5.7}\text{Al}_{2.2}\text{Fe}^{3+}_{0.1})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | | | | | | | | | | |
| 49.70 | 2.53 | 6.68 | 28.70 | 0.08 | 0.02 | 0.12 | 11.98 | 0.32 | 0.00 | Антофиллит |
| $(\text{Ca}_{1.9}\text{Na}_{0.1})(\text{Mg}_{1.50}\text{Fe}_{3.48}\text{Mn}_{0.015})(\text{Si}_{7.5}\text{Al}_{0.50})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | | | | | | | | | | |
| 45.97 | 5.88 | 6.73 | 25.69 | 0.00 | 0.01 | 0.25 | 11.45 | 1.04 | 0.00 | Железистая роговая обманка |
| $(\text{Ca}_{1.88}\text{Na}_{0.12})(\text{Mg}_{1.54}\text{Fe}_{2.43}\text{Mn}_{0.03})(\text{Fe}^{3+}_{0.87}\text{Ti}_{0.13})(\text{Si}_{7.0}\text{Al}_{1.0})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | | | | | | | | | | |
| 39.34 | 11.83 | 3.12 | 29.56 | 0.15 | 0.00 | 0.19 | 10.50 | 0.59 | 0.34 | Магнезиальная роговая обманка |
| $(\text{Ca}_{1.70}\text{Na}_{0.24}\text{K}_{0.06})(\text{Mg}_{0.73}\text{Fe}_{2.24}\text{Mn}_{0.03})(\text{Fe}^{3+}_{1.98}\text{Ti}_{0.02})(\text{Si}_{6.16}\text{Al}_{1.84})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | | | | | | | | | | |
| 38.07 | 24.89 | 0.03 | 11.31 | 0.30 | 0.00 | 0.06 | 23.72 | 0.13 | 0.00 | Эпидот |
| $(\text{Ca}_{1.98}\text{Na}_{0.02})(\text{Al}_{2.26}\text{Fe}^{3+}_{0.74}\text{Ti}_{0.02})_{\Sigma 3.02}(\text{Si}_{2.00}\text{O}_{7.00})(\text{Si}_{0.97}\text{Al}_{0.03})_{1.00}\text{O}_4(\text{OH})$ | | | | | | | | | | |
| 33.15 | 15.87 | 8.29 | 29.60 | 3.34 | 0.00 | 0.09 | 0.07 | 0.26 | 9.18 | Биотит – Хлорит |

40.1% действием одного фактора F1. Анализ признаковой структуры фактора F1 показал, что нагрузка этого фактора заключается в значительном понижении содержания Fe и V в минерале под влиянием Mn и Ti и в меньшей степени – Ca и Si. Такой набор признаков и характер их действия позволяет предполагать, что фактор F1 отражает процесс выделения собственных фаз из прототитаномагнетита, содержащего магнетит с примесями ильменита, титанита, ульвешпинели и др.

Фактор F2 несет в себе 28.6% информации о титаномагнетите. Анализ признаковых нагрузок показал, что F2 имеет значимую положительную связь с Si, Al и Mg и слабые отрицательные связи с Fe и V. Такая признаковая структура фактора F2 позволяет предполагать, что он отражает влияние на состав титаномагнетита включений первичного магнезиевого алюмосиликата, захваченного магмой в процессе кристаллизации, а также влияние на минерал более позднего магнезиевого алюмосиликата, с частичным замещением железа на маг-

ний в процессе аутометасоматоза и, вероятно, диффузионной миграцией железа.

Фактор F3 несет в себе небольшую долю информации (13.6%). Можно предположить, что F3 отражает взаимный метасоматический процесс изменения состава титаномагнетита и сопутствующих Ca- и Na-плагиоклазов вмещающих пород и, в меньшей степени, влияние K, входящего в состав развивающихся по захваченным амфиболам и алюмосиликатам слюд.

Факторный анализ, проведенный отдельно для образцов подрудного и рудного горизонтов по данным химических анализов и растрового измерения содержаний элементов методом РСМА, показал, что ранее установленные факторы влияния соответственно как на весь рудный пласт, так и на его отдельные горизонты. При этом удалось разделить F3 на 2 фактора – натриевый и кальциевый, имеющие примерно равное значение (вес фактора ≈ 10%). В рудном горизонте также подтвердилась слабая связь элементов K и Si.

Таблица 9. Корреляционная матрица химического состава титаномагнетита по рудному телу Пудожгорского интрузива (по данным химических анализов авторов и из работы (Трофимов, Голубев, 2008))

| Элемент | K | Na | Mg | Al | Si | Ca | Ti | V | Mn | Fe |
|---------|-------|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| K | | 0.00 | -0.09 | 0.25 | 0.31 | -0.26 | -0.28 | -0.30 | 0.17 | -0.30 |
| Na | 0.00 | | 0.12 | 0.10 | -0.02 | -0.19 | 0.02 | -0.06 | 0.02 | -0.06 |
| Mg | -0.09 | 0.12 | | 0.82 | 0.73 | -0.03 | 0.20 | -0.15 | 0.18 | -0.27 |
| Al | 0.25 | 0.1 | 0.82 | | 0.78 | -0.03 | 0.18 | -0.11 | 0.20 | -0.27 |
| Si | 0.31 | -0.02 | 0.73 | 0.78 | | 0.39 | 0.38 | -0.2 | 0.37 | -0.47 |
| Ca | -0.26 | -0.19 | -0.03 | -0.03 | 0.39 | | 0.35 | -0.36 | 0.33 | -0.42 |
| Ti | -0.28 | 0.02 | 0.20 | 0.18 | 0.38 | 0.35 | | -0.63 | 0.92 | -0.97 |
| V | -0.30 | -0.06 | -0.15 | -0.11 | -0.20 | -0.36 | -0.63 | | -0.68 | 0.69 |
| Mn | -0.17 | 0.02 | 0.18 | 0.20 | 0.37 | 0.33 | 0.92 | -0.68 | | -0.90 |
| Fe | -0.30 | -0.06 | -0.27 | -0.27 | -0.47 | -0.42 | -0.97 | 0.69 | -0.90 | |

Примечание. Курсивом выделена значимая корреляционная связь, полужирным курсивом – сильная корреляционная связь для рассмотренной выборки.

Для оценки генетических особенностей руд большое значение имеет взаимовлияние титаномагнетита и нерудных минералов, в первую очередь плагиоклазов, а также постепенное и еще слабо проявленное разубоживание руд при образовании K-содержащих алюмосиликатов.

Установленные с помощью статистической обработки механизмы перераспределения рудообразующих компонентов, с учетом данных РСМА, позволяют сделать следующие выводы. В рудах месторождения между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости имеется четкая взаимосвязь. На перераспределение основных компонентов руд (Fe, Ti, V), совместно поступивших во вмещающую породу в результате магматогенной стадии, влияют также и вторичные процессы минералообразования. В результате метасоматических изменений происходит выделение титана в виде собственных минералов на базе титаномагнетитовой матрицы. При этом из минерала-хозяина также выносятся элементы-примеси магний и марганец, а ванадий и железо сохраняют прямую взаимосвязь.

Закономерности появления различных ассоциаций силикатов в связи с эволюцией состава титаномагнетита видны на фиг. 10. Они подтверждаются характером взаимоотношений силикатов и ильменита с титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах, предопределяя в целом изменчивость качества рудных и нерудных минералов.

Полученные статистической обработкой материалы в сочетании с данными по элементному составу не только дополняют генетическую картину процессов рудообразования, но и позволяют судить об особенностях поведения минералов в связи с рудообогащением. В первую очередь, это определяет существенные потери (по сравнению с валовым содержанием) Fe и в меньшей степени Ti и V в минералах магматической стадии, перешедших в результате метаморфизма и автосоматоза в представителей более поздней нерудной минерализации (титанит, амфиболы и др.). Явный антагонизм Fe–V с Ti позволяет предположить возможность попутного выделения ильменита из обогащенного титаном концентрата; наличие кульсонита должно снизить затраты на получение ванадия из железного концентрата.

Таким образом, проведенная обработка и анализ данных показывает, что аппарат математической статистики применим, в том числе, и для таких сложных и труднообогащаемых руд, как магматогенные титаномагнетиты.

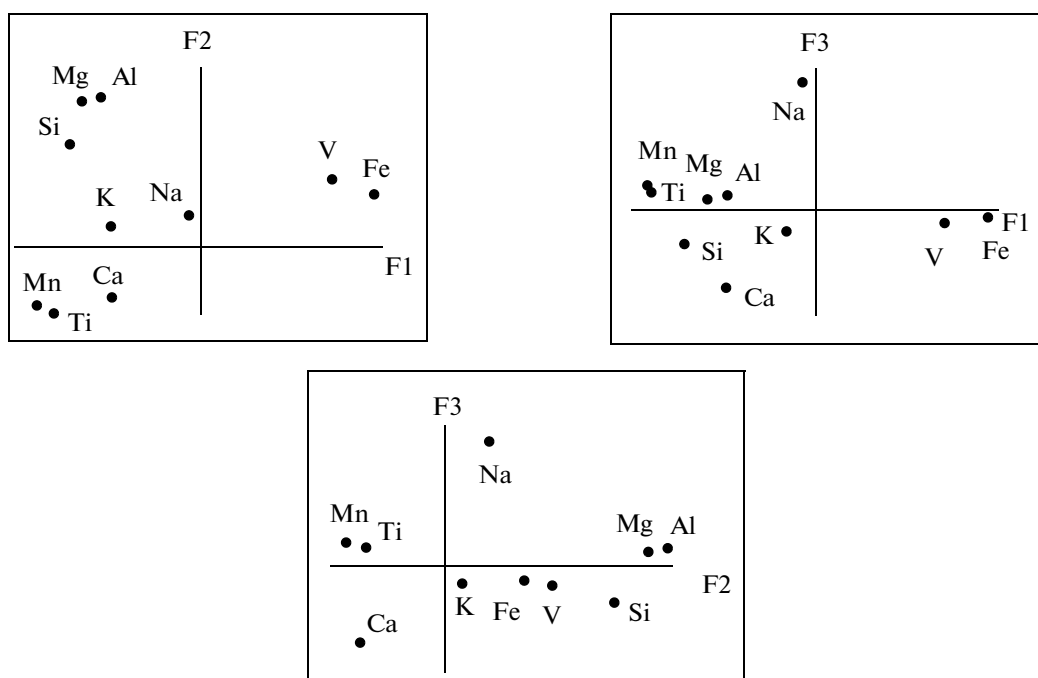
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате комплекса исследований минерального состава руд Пудожгорского месторождения, особенностей морфологии и микроструктуры

Таблица 10. Факторные нагрузки, собственные значения и веса факторов

| Признаки | Факторные нагрузки | | |
|----------------------|--------------------|--------------|---------------|
| | F1 | F2 | F3 |
| K | 0.189 | -0.095 | -0.234 |
| Na | 0.119 | 0.062 | -0.839 |
| Mg | 0.086 | 0.919 | -0.122 |
| Al | 0.072 | 0.942 | -0.097 |
| Si | 0.286 | 0.872 | -0.241 |
| Ca | 0.440 | 0.041 | 0.658 |
| Ti | 0.940 | 0.131 | 0.035 |
| V | -0.807 | -0.022 | -0.008 |
| Mn | 0.936 | 0.123 | 0.017 |
| Fe | -0.947 | -0.218 | -0.051 |
| Собственные значения | 3.609 | 2.577 | 1.223 |
| Вес фактора, % | 40.099 | 28.638 | 13.587 |

Примечание. Курсивом выделена значимая корреляционная связь, полужирным курсивом – сильная корреляционная связь для рассмотренной выборки.



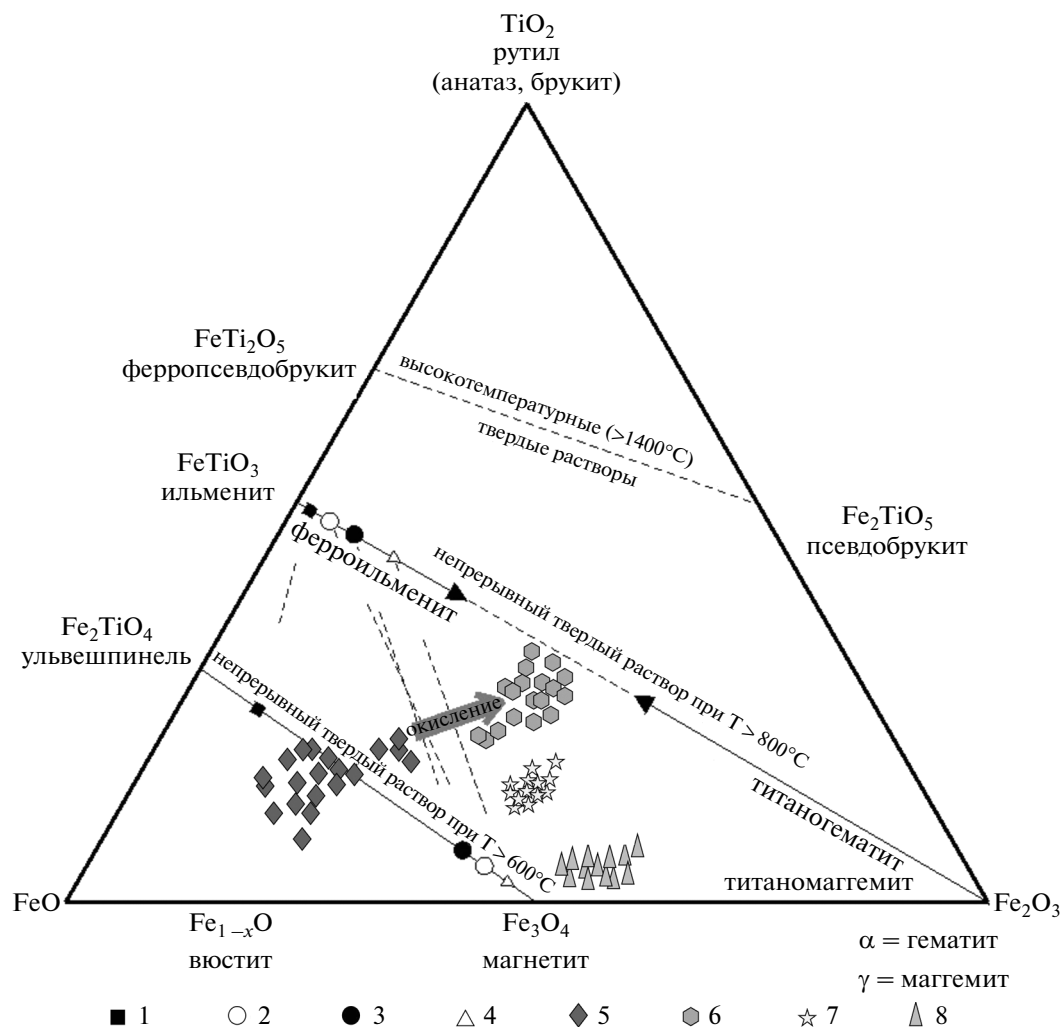
Фиг. 12. Диаграммы распределения по факторам факторных нагрузок содержаний основных компонентов в рудах и породах Пудожгорского месторождения.

ний в индивидах титаномагнетита, главного рудного минерала, по выделенным продуктивным горизонтам выявлена четкая взаимосвязь в рудах месторождения между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости (фиг. 10, 11). Подтвердилось сложное строение индивидов-микроагрегатов титаномагнетита, особенности морфологии и морфогенетической природы которого определяют возможность, состав, качество и технологии извлечения полезных компонентов из руды месторождения. Установлена удовлетворительная сходимость данных оптической микроскопии и экспрессного метода μ РТ о гранулярном составе по всем продуктивным горизонтам, выделен преобладающий класс микроагрегатов титаномагнетита в относительно крупной фракции – $1.5 + 0.5$ мм (47.63% ОМ и 43.39 мас. % μ РТ). Проведенное методом РСМА площадное сканирование позволило установить, что преобладающие классы гранулярного спектра отвечают наиболее богатым ценными компонентами, что существенно упрощает решение вопроса об оптимальной крупности дробления и позволяет предполагать отсутствие существенных потерь рудных минералов в тонких классах.

Существенные различия в титаномагнетитах как индивидах (микроагрегатах) удастся проследить, если вынести на тройную диаграмму нормированные содержания основных компонентов для руд рассматриваемых горизонтов, полученные авторами растровой съемкой методом РСМА (фиг. 13).

Распределение точек на диаграмме демонстрирует существенные различия в условиях кристаллизации титаномагнетита горизонтов месторождения и, соответственно, в образовавшихся продуктах. Так, вероятно, титаномагнетиты подрудного горизонта относительно рудного кристаллизовались при более высокой температуре ($\approx 800^\circ\text{C}$) и $f\text{O}_2$, что приводило к окислению с изменением стехиометрии твердого раствора и выделением из него в качестве продукта распада ильменита (Хисина, 1987). В рудном горизонте серия магнетит-ульвешпинель, стабильная в более восстановительной обстановке и при пониженной температуре, успевает “самоорганизоваться” с “отгонкой” ульвешпинели к границам и “дефектам” зерен магнетита, где впоследствии происходит ее окисление с образованием крупных пластин и блоков ильменита.

Диаграмма (фиг. 11) показывает закономерности появления различных ассоциаций силикатов в связи с эволюцией состава титаномагнетита. Эти же представления подтверждаются характером взаимоотношений силикатов и ильменита с титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах, определяя в целом изменчивость качества рудных и нерудных минералов. Полученные материалы в сочетании с данными по элементному составу с расчетом кристаллохимических формул силикатов не только дополняют генетическую картину процессов рудообразования, в том числе с учетом глубины метаморфических преобразований, но позволяют также судить об особенностях поведения минералов в



Фиг. 13. Экспериментально установленные значения содержаний рудообразующих элементов на тройной фазовой диаграмме системы FeO–Fe₂O₃–TiO₂ (Frost, Lindsley, 1991).

- 1 – сосуществующие пары при 800°C;
- 2 – сосуществующие пары при 600°C и окислительных условиях, как при 1;
- 3 – сосуществующие пары при 800°C и более окислительных условиях по сравнению с 1;
- 4 – сосуществующие пары при 600°C и более окислительных условиях по сравнению с 2;
- 5–8 – титаномангнетиты:
- 5 – подрудный горизонт Пудожгорского месторождения;
- 6 – рудный горизонт Пудожгорского месторождения;
- 7 – Чинейское месторождение;
- 8 – Собственно-Качканарское месторождение.

связи с обогащением руд. В первую очередь, это определяет существенные потери (по сравнению с валовым содержанием) Fe и в меньшей степени Ti и V в минералах магматической стадии, перешедших в результате метаморфизма и автосоматоза в представителей более поздней нерудной минерализации (титанит, амфиболы и др.).

Проведено сравнение составов титаномангнетита основных минеральных ассоциаций титанованадий-содержащих железных руд различных формационных типов (табл. 1) на образцах титаномангнетита, изученных в ФГУП “ВИМС”, и ли-

тературных данных (Фоминых и др. 1967, 1980; Пирогов и др. 1988, 2013; Гонгальский и др. 1993, Гонгальский, 2010; Трофимов, Голубев, 2008) по рудам Собственно-Качканарского (Урал) и Чинейского (участок “Магнитный”, Забайкальский край) месторождений относящихся, соответственно, к низко- и среднетитанистому геолого-промышленным типам. Содержания основных и промышленно-ценных компонентов представительных проб руд месторождений и их отношение к кларку (Виноградов, 1962) приведены в табл. 11 (по данным авторов и литературе); в табличной форме

Таблица 11. Содержание основных и промышленно-ценных компонентов и их отношение к кларку (Виноградов, 1962) представительных проб руд месторождений (составлена по данным авторов и литературным данным)

| Месторождение | | Содержание компонента, мас. % | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|------|--------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|------|-----|-----|----------------------|------|------|----------------------|----------------------|-----|----------------------|----------------------|--|
| | | Отношение содержания компонента к кларку (для рудных элементов (Fe _{общ} , Ti, V), мас. % | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Fe _{общ} | FeO | Fe ₂ O ₃ | Ti | TiO ₂ | V | V ₂ O ₃ | Si | Al | Na | K | Ca | Mg | P | S _{общ} | Mn | Pt | Au | |
| Пудожгорское (богатые руды) | | 31.8 | 18.0 | 25.4 | 5 | 8.3 | 0.3 | 0.6 | 15.4 | 5.0 | 1.0 | 0.6 | 3.6 | 1.9 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 5 × 10 ⁻⁶ | 1 × 10 ⁻⁵ | |
| | | 3.7 | | | 5.5 | | 15.5 | | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.8 | 3.3 | 1.0 | 5.0 | 250.0 | |
| Пудожгорское (бедные руды) | | 27.9 | 16.2 | 21.9 | 4.5 | 7.4 | 0.3 | 0.5 | 15.9 | 0.4 | 2.2 | 4.4 | 0.2 | 6.6 | 0.1 | 1.8 | 0.2 | 5 × 10 ⁻⁶ | 1 × 10 ⁻⁵ | |
| | | 3.3 | | | 5.0 | | 14.0 | | 0.7 | 0.1 | 1.1 | 5.3 | 0.1 | 1.5 | 0.7 | 58.3 | 1.0 | 5.0 | 250.0 | |
| Чинейское (рядовые руды) | | 20.7 | 9.3 | 19.3 | 2.4 | 4 | 0.2 | | 16.6 | 7.1 | 1.6 | 0.3 | 6.8 | 2.6 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 4 × 10 ⁻⁷ | 1 × 10 ⁻⁷ | |
| | | 2.4 | | | 2.7 | | 10.0 | | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.4 | 1.0 | 0.6 | 0.0 | 6.7 | 0.7 | 0.4 | 2.5 | |
| Собственно- Качканарское (рядовые руды) | | 17.3 | 7.8 | 16.1 | 0.8 | 1.3 | 0.1 | 0.2 | 18 | 3.2 | 0.1 | 0.1 | 11.6 | 7.9 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 8 × 10 ⁻⁷ | 1 × 10 ⁻⁶ | |
| | | 2.0 | | | 0.9 | | 5.0 | | 0.7 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 1.7 | 1.8 | 0.2 | 1.7 | 0.9 | 0.8 | 25.0 | |
| Кларк элемента | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ультраоснов- ные | | 9.9 | | | 3 × 10 ⁻² | | 4 × 10 ⁻³ | | 19.0 | 0.5 | 0.6 | 3 × 10 ⁻² | 0.7 | 25.9 | 2 × 10 ⁻² | 1 × 10 ⁻² | 0.2 | 2 × 10 ⁻⁵ | 5 × 10 ⁻⁷ | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Основные | | 8.6 | | | 0.9 | | 2 × 10 ⁻² | | 24.0 | 8.8 | 1.9 | 0.8 | 6.7 | 4.5 | 0.1 | 3 × 10 ⁻² | 0.2 | 1 × 10 ⁻⁵ | 4 × 10 ⁻⁷ | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Примечание. Содержание элемента в рудах в таблице отобразено в числителе, отношение к кларку — в знаменателе.

Таблица 12. Минеральный состав представительных проб руды титаномагнетитовых месторождений

| Месторождение | Собственно-Качканарское | Чинейское | Пндожгорское | |
|---------------------------|-------------------------|-------------|--------------|-------------|
| тип руд | рядовые | рядовые | богатые | бедные |
| минерал | массовая доля, % | | | |
| Рудные минералы: | 17.4 | 25.5 | 40.0 | 35.5 |
| Титаномагнетит | 16.9 | 23.0 | 36.5 | 30.0 |
| Ильменит | 0.5 | 2.5 | 2.5 | 4.0 |
| Нерудные минералы: | 82.1 | 74.5 | 60.0 | 64.5 |
| Пироксены | 66.0 | 12.0 | 5.0 | 4.0 |
| Амфиболы | 4.1 | 6.5 | 13.0 | 12.0 |
| Плагиоклазы | 0.5 | 35.0 | 24.0 | 30.0 |
| Хлориты и серпентины | 7.9 | 13.8 | 3.0 | 2.0 |
| Слюды и гидрослюды | Н.о. | Следы | 6.0 | 8.0 |
| Эпидот-цоизит | Н.о. | 3.5 | 5.0 | 4.0 |
| Кварц | Следы | Следы | 2.0 | 2.0 |
| Оливины | 2.6 | Н.о. | Н.о. | Н.о. |
| Гранаты | 0.4 | Н.о. | Н.о. | Н.о. |
| Сульфиды | Следы | 0.4 | 1.0 | 1.5 |
| Прочие | 1.1 | 1.1 | 2.0 | 2.5 |

Таблица 13. Средний состав титаномагнетита месторождений. Рентгеноспектральный микроанализ в точке, мас. %

| Элемент | Mg | Al | Si | Ca | Ti | V | Cr | Mn | Fe |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| месторождение | | | | | | | | | |
| Собственно-Качканарское | 0.89 | 1.12 | 0.10 | 0.02 | 1.51 | 0.35 | 0.06 | 0.26 | 69.90 |
| Чинейское | 0.40 | 0.31 | 0.10 | 0.04 | 1.87 | 0.65 | 0.04 | 0.35 | 68.52 |
| Пудожгорское | 0.03 | 0.11 | 0.09 | 0.04 | 2.54 | 0.89 | 0.05 | 0.06 | 67.16 |

приводятся минеральный состав руд (табл. 12), содержания основных элементов (табл. 13), основные элементы в составе и коэффициенты неоднородности титаномагнетита (табл. 14), типоморфные особенности титаномагнетита (табл. 15). Изменения содержания рудообразующих элементов нанесено на фиг. 13.

Весьма значимо прослеживается изменчивость состава и внутреннего строения выделений титаномагнетита соответственно в ряду низко-, средне и высокотитанистых категорий за счет различной природы магматического этапа минералообразования и более поздних метасоматических изменений. Титаномагнетиты низкотитанистой категории характеризуются весьма тонкими проявлениями продуктов РТР зонального и секториального, частично блокового строения в анатомии зерен. Рудный минерал в среднетитанистой категории отличается более четким зональным, блоковым и скелетным строением. В высокотитанистых агрегатах анатомия слагающих его зерен

преобразуется весьма существенно в связи с формированием сложных блоковых и скелетных структур при существенной роли нерудных включений. Резко усложняется анатомия зерен на фоне интенсивного влияния наложенных процессов с участием микротектонических преобразований, инициирующих процесс самоорганизации системы “минерал-среда”.

Приуроченные к пироксенитовому массиву титаномагнетитовые руды Собственно-Качканарского месторождения характеризуются низкой титанистостью, а тонкие прорастания ульвешпинели в титаномагнетите этих руд обнаруживаются только при больших увеличениях на ЭМ. Руды Пудожгорского месторождения, приуроченные к пластовому интрузиву кварцевых долеритов, напротив, высокотитанистые в обоих технологических горизонтах. В них четко прослеживается влияние нераскристаллизовавшихся в крупные агрегаты ильменита для подрудного горизонта и ульвешпинели – для рудного. По степени неод-

Таблица 14. Вариации состава титаномагнетита месторождений. Рентгеноспектральный микроанализ

| Месторождение | Fe, % | TiO ₂ , % | V ₂ O ₅ , % | Коэффициенты неоднородности титаномагнетита | |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---|-------------------|
| | | | | Титанистости | Ванадистости |
| Низкотитанистые руды | | | | | |
| Собственно-Качканарское | Среднее 66.0 (64.43–67.9) | Ср. 3.01 (2.65–3.90) | Ср. 0.8 (1.5–0.1) | 4.6 (4.1–5.7) | 1.1 (0.1–2.3) |
| Гусевогорское | Среднее 69.01 (68.5–71.90) | Ср. 1.03 | Ср. 0.52 | 1.50 | 0.75 |
| Среднетитанистые руды | | | | | |
| Чинейское “Магнитный” | Среднее 59.2 (57.4–60.8) | Ср. 11.7 (1.04–13.2) | Ср. 1.32 (0.73–1.83) | 20 (17.0–23.0) | 2.0 (1.1–3.0) |
| | Ср. 57.3 (56.4–58.8) | Ср. 10.3 (8.74–11.24) | Ср. 1.41 (1.35–1.48) | 18 (15.2–20.1) | 2.2 (2.0–2.5) |
| Высокотитанистые руды | | | | | |
| Пудожгорское | Среднее 57.34 (56.4–58.8) | Ср. 19.5 (16.6–22.69) | Ср. 1.45 (0.98–2.02) | 34.0 (26.4–43.9) | 3.0 (3.2–1.9) |
| | Среднее 51.9 (45.2–61.7) | Ср. 20.3 (16.1–22.18) | Ср. 1.47 (1.01–2.07) | 39.1 (26.1–49.0) | 2.83 (2.2–4.0) |

Таблица 15. Типоморфные признаки титаномагнетита титан-ванадийсодержащих железных руд магматического типа

| Признак | Месторождение | | | | | | |
|--|--|---|---|-----------|-------|-------|-------|
| | Собственно-Качканарское | Чинейское | Пудожгорское | | | | |
| Морфоструктурные особенности | титаномагнетит | | | | | | |
| | выполняет интерстиции между нерудными минералами | выполняет интерстиции между нерудными минералами, образует субидиоморфные кристаллы | образует субидиоморфные и идиоморфные кристаллы | | | | |
| Средний размер выделений, мм | 0.163–0.284 | 0.325–0.412 | 0.522–0.531 | | | | |
| Микротвердость, кгс/мм ² | 695 | 588 | 563 | | | | |
| Содержание Fe, мас. % | 64.4–71.9 | 56.4–63.8 | 49.1–61.7 | | | | |
| Содержание основных элементов – примесей, мас. % | | | | | | | |
| Ti | Изоморфный | <1.0 | 1.0–1.5 | <2.0 | | | |
| | Продукты РТР | 1.0–2.0 | 5.0–7.0 | 10.0–12.0 | | | |
| | K _{Ti} | 7.8 | 18.6 | 28.2 | | | |
| V | | 0.0–1.0 | 0.5–1.5 | 0.5–2.0 | | | |
| Mg | | 0.5–2.5 | 0.1–1.5 | 0.0–0.5 | | | |
| Mn | | 0.0–0.3 | 0.0–0.5 | 0.0–0.5 | | | |
| Al | | 0.0–3.7 | 0.0–2.2 | 0.0–1.1 | | | |
| ЯГРС и температура Кюри (T _c)* | | | | | | | |
| S _A /S _B | 0.53 | 0.54 | 0.56 | 0.52 | 0.56 | 0.58 | 0.57 |
| T _c , °C | 556.1 | 556.4 | 565.0 | 568.0 | 555.0 | 555.0 | 557.0 |

* Для измерения выделялись по две фракции руды (бедной и богатой) месторождений, обогащенных титаномагнетитом. Для Пудожгорского месторождения проводилось измерение трех фракций в соответствии с технологическим разделением (Трофимов, Голубев, 2008).

нородности титаномагнетиты участка “Магнитный” Чинейского месторождения, связанного с габброидным массивом, занимают промежуточное положение.

Неоднородность титаномагнетита снижается от высокотитанистых руд к низкотитанистым (фиг. 9), следовательно, титаномагнетиты Собственно-Качканарского месторождения — это природно-легированное железорудное сырье, содержание титана в котором не будет оказывать негативного воздействия при обогащении, что подтверждается примером эксплуатации руд Гусевгорского месторождения КГОКом. Введение же средне- и высокотитанистых руд Чинейского и Пудожгорского месторождений в промышленное освоение без глубокого изучения и оценки степени их неоднородности существенно затруднено. При этом геолого-технологическое картирование месторождений с проведением экспрессных растворовых анализов методом РСМА позволит получать не только низкотитанистый титаномагнетитовый и ванадиевый концентраты, но и кондиционный ильменитовый.

Несомненно, использование различных минералого-аналитических методов исследования, с привлечением аппарата математической геологии, на разных уровнях исследования помогает составить более полную картину условий образования и эволюции вещества, дать прогнозную оценку минералого-технологических особенностей руд, тем самым минимизировав затраты при их отработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вовлечение титаномагнетитовых месторождений в промышленную переработку позволило обеспечить рудным сырьем несколько крупных металлургических предприятий, в том числе и в России. Комплексная переработка качканарских титаномагнетитовых руд дала возможность не только решить проблему нехватки ванадия в стране, но и вывести Россию на позиции одного из ведущих мировых экспортеров этого металла.

В то же время, несмотря на значительные запасы титаномагнетитовых руд, промышленного значения в настоящее время они не имеют, поэтому Россия испытывает острый дефицит в титановом сырье.

Комплексные минералого-технологические исследования, проведенные с участием сотрудников ФГУП “ВИМС” (Смирнов и др., 2004) уже позволили ввести в эксплуатацию Куранахское ильменит-титаномагнетитовое месторождение. В настоящей работе приведена комплексная минералого-технологическая оценка руд первоочередных к освоению титаномагнетитовых с ильменитом месторождений — Собственно-Качканарского, Чинейского (участок “Магнитный”) и Пудожгорского.

Результаты проведенных исследований позволяют сформулировать следующие выводы:

— установлено, что неоднородность титаномагнетита, связанная с многостадийным распадом твердого раствора и последующей эволюцией его продуктов, а также проявлением вторичных наложенных процессов, является для руд каждого месторождения индивидуальной, несмотря на наличие определенных закономерностей;

— доказано, что определяющее влияние на минералого-технологические особенности титаномагнетитовых руд оказывают взаимоотношения титаномагнетита и нерудных минералов в различных ассоциациях;

— установлено уменьшение содержания титана в титаномагнетите в ряду руд месторождений: Пудожгорское — Чинейское — Собственно-Качканарское. При этом наличие титаномагнетита различного уровня титанистости характерно для руд всех рассмотренных месторождений, что необходимо учитывать при их обогащении;

— выявленные взаимосвязи между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах месторождения с выделением богатых ильменитом типов, позволяющих при обогащении получать ильменитовые концентраты, должны служить основой для минералого-технологического картирования, проведение которого позволяет повысить экономические показатели обогащения.

Для получения всей информации о технологических свойствах и возможности извлечения полезных компонентов необходимы комплексные исследования минерального состава руд на микроуровне (причем с исследованиями по площади), классические методы анализа ОМ, РФА должны быть дополнены прецизионными (РЭМ, РСМА, μ РТ и др.).

Минералогические особенности титаномагнетита в частности и титаномагнетитовых руд в целом, выявленные комплексом минералого-аналитических методов, позволили получить информацию об их технологических свойствах и прогнозировать поведение руд в процессах обогащения.

И совершенно справедливо высказывание В.И. Ревнивецова (Пирогов и др., 1988, с. 6 слово от ред.) “Переход от описательной методологии к методологии генетического анализа позволил минералогии дать научное толкование многих проблем, связанных с технологией переработки руд”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативно-методическая документация по аналитическим, минералогическим и технологическим исследованиям. Справочник. 3-е изд. М.: ФНМЦ “ВИМС”, 2008. 152 с. Дополнения к справочнику. М.: ФНМЦ “ВИМС”, 2013. 12 с.

- Борисенко Л.Ф., Делицын Л.М., Полубабкин В.А., Усков Е.Д.* Комплексное использование титаномагнетитовых руд. Обзор. Сер. Лабораторные и технологические исследования минерального сырья. М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1997. Вып. 2. 66 с.
- Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.
- Вистелиус А.Б.* Основы математической геологии (определение предмета, наложение аппарата). Л.: Наука, 1980. 389 с.
- Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П.* Применение электронно-зондовых приборов для изучения минерального вещества. М.: Недра, 1983. 216 с.
- Гонгальский Б.И.* Особенности основного магматизма Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье) // *Литосфера*. 2010. № 3. С. 87–94.
- Гонгальский Б.И., Криволицкая Н.А.* Чинейский расщепленный плутон. Новосибирск: ВО Наука, 1993. 184 с.
- Григорьев Д.П.* Позиции онтогении минералов // *Зап.ВМО*. 1978. Ч. 107. № 4. С. 407–415.
- Еселев Я.Х., Солодкая Р.И., Егорова Н.А.* Отчет о геологоразведочных работах на Пудожгорском месторождении титаномагнетитов и геолого-поисковых работах на восточном побережье Онежского озера в Медвежьегорском и Пудожском районах Карело-Финской ССР за 1950–1951 гг. 1952ф. Фонды КПСЭ. № 451.
- Жилыева В. и др.* Влияние микроструктурных особенностей и состава феррошпинелидов Ковдорского массива на их магнитные свойства // *Изв. АН СССР. Серия "Геология"*. 1973. № 10. С. 107–121.
- Кузнецов Ю.А.* Главные типы магматических формаций. Новосибирск, 1989. 394 с.
- Мальшев И.И.* Закономерности образования и размещения титановых руд. М.: Гостеолтехиздат, 1957. 276 с.
- Маракушев А.А.* Петрогенезис и рудообразование. М., 1979. 263 с.
- Маракушев А.А.* Петрогенезис. М., 1988. 294 с.
- Павлишин В.И., Юшкин Н.П., Попов В.А.* Онтогенетический метод в минералогии. Киев: Наук. думка, 1988. 120 с.
- Пахомов Ф.П., Тигунов Л.П., Быховский Л.З.* Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования. М.: ВИМС, 2010. 138 с.
- Пирогов Б.И., Броницкая Е.С., Астахова Ю.М. и др.* Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогащенность // *Разведка и охрана недр*. 2013. № 2. С. 47–51.
- Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.* Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 304 с.
- Резниченко В.А., Шабалин Л.И.* Титаномагнетиты, месторождения, металлургия, химическая технология. М., 1986. 293 с.
- Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания / Под ред. А.Г. Бетехтина, пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962. 1132 с.
- Смирнов Л.А., Тигунов Л.П., Масловский П.А. и др.* Куранахское ильменит-титаномагнетитовое месторождение: геологическое строение, комплексная переработка руд. Екатеринбург: 2004. 310 с.
- Старостин В.И., Игнатов П.А.* Геология полезных ископаемых: Учебник для высшей школы. М.: Академический Проект, 2004. 512 с.
- Трофимов Н.Н., Голубев А.И.* Пудожгорское благородно-метальное титаномагнетитовое месторождение. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2008. 123 с.
- Трофимов Н.Н., Голубев А.И., Смирнова Н.К.* Особенности морфологии и перспективы рудоносности Пудожгорского интрузива // *Геология и полезные ископаемые Карелии*. Петрозаводск, 2005. Вып. 8. С. 75–81.
- Фоминых В.Г., Краева Ю.П., Ларина Н.В.* Особенности изменения сосуществующих оливинов и клинопироксенов платиноносного пояса Урала // *Сб. "Минералы горных пород и руд Урала"*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 3–7.
- Фоминых В.Г., Самойлов П.И., Максимов Г.С., Макаров В.А.* Пироксениты Качканара. Свердловск: ИГГ Ур. Филиала АН СССР, 1967. 84 с.
- Хисина Н.Р.* Субсолидусные превращения твердых растворов порообразующих минералов. М.: Наука, 1987. 208 с.
- Цейслер В.М.* Анализ геологических формаций. М., Недра. 1992. 138 с.
- Щипцов В. В., Голубев А. И., Иващенко В. И. и др.* Минералогия Онежского рудного района: основы прогнозирования месторождений стратегических видов минерального сырья и новых их типов в Карельском регионе // *Проблемы минералогии России*. М: Издание ГЦ РАН. 2012. С. 86–98.
- Якушина О.А., Ожогина Е.Г., Хозяинов М.С.* Рентгеновская вычислительная микротомография – неразрушающий метод структурного и фазового анализа // *Мир измерений*. 2003. № 10(32). С. 12–17.
- Amelin Y.V., Heaman L.M., Semenov V.S.* U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // *Precambrian Res.* 1995. Vol. 75. P. 31–46.
- Fisher R.A. Frank Y.* Statistical tables for biological, agricultural and medical research. 6th Ed London: London Group Ltd., 1963. P. 146.
- Frost B.R., Lindsley D.H.* Occurrence of iron-titanium oxides in igneous rocks. Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance // *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 1991. V. 25. P. 433–468.
- Hawthorne Frank C., Roberta Oberti, George E. Harlow etc.* IMA Report. Nomenclature of the amphibole supergroup // *Amer. Miner.*, 2012. 97. P. 2031–2048.
- Morimoto N.* Nomenclature of pyroxenes // *Can. Mineralog.* 1989. Vol. 27. P. 143–156.