

УДК 553.43

## ПОЛОСЧАТЫЕ СУЛЬФИДНО-МАГНЕТИТОВЫЕ РУДЫ МАУКСКОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ): СОСТАВ И ГЕНЕЗИС

© 2015 г. Н. П. Сафина<sup>\*,\*\*</sup>, В. В. Масленников<sup>\*,\*\*</sup>, С. П. Масленникова<sup>\*</sup>, В. А. Котляров<sup>\*</sup>,  
Л. В. Данюшевский<sup>\*\*\*</sup>, Р. Р. Ларж<sup>\*\*\*</sup>, И. А. Блинов<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт минералогии УрО РАН

456317, Челябинская обл., Миасс, Ильменский заповедник

<sup>\*\*</sup>Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе

456300, Миасс, ул. 8 Июля, 10

<sup>\*\*\*</sup>Университет Тасмании, Хобарт

Поступила в редакцию 07.04.2014 г.

В статье изложены результаты исследования метаморфизованных сульфидно-магнетитовых руд Маукского месторождения, расположенного в пределах Главного Уральского разлома на участке смыкания Тагильской и Магнитогорской вулканогенных колчеданосных зон. Рудовмещающая толща включает метаморфические породы, субстратом которых являлись базальты, углеродистые и углеродисто-кремнистые алевролиты, линзовидные тела серпентинизированных ультрамафитов. Руды месторождения представлены в основном полосчатыми и реже брекчиевыми разностями. В полосчатых рудах установлены признаки их обломочного происхождения. Об этом свидетельствуют знаки нагрузки в основании сульфидных прослоев, чередование сульфидных и нерудных слоев, срезание зональности роста кристаллов пирита. Главными минералами полосчатых руд являются пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит и магнетит. Внутреннее строение перечисленных минералов свидетельствует о глубокой перекристаллизации исходных гидротермально-осадочных руд в условиях метаморфизма, сопровождавшейся деформациями. Кубанит, пирротин, макинавит, грейгит и золото в виде включений присутствуют в метакристаллах пирита, магнетита и халькопирита. Впервые для Маукского месторождения установлены акцессорные минералы систем Pb–Bi–Te, Bi–Te и Ag–Te, а также уранинит. Магнетит образовался, главным образом, по пириту и в меньшей степени – по халькопириту, пирротину и нерудным минералам. Установлено, что основными минералами-носителями As и Co являются метаморфогенные кристаллы пирита. Основное количество Zn, Sn, Te, Pb, Bi и Ag сосредоточено в халькопирите. Для сфалерита характерны примеси Fe и Cu, для пирротина – Se и Ni. Магнетит накапливает Ti, V, Mn, Sb, As, Ba и U. Предполагается, что полосчатые руды Маукского месторождения претерпели несколько стадий преобразования: диагенез, катагенез и метагенез ( $t < 300^\circ\text{C}$ ) и метаморфизм амфиболитовой ступени ( $t > 500^\circ\text{C}$ ).

DOI: 10.7868/S0016777015030053

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема генезиса полосчатых руд, широко представленных на колчеданных месторождениях, до сих пор остается нерешенной. Некоторые исследователи рассматривают полосчатые руды как продукты литификации гидротермально-осадочных сульфидных илов (Скрипченко, 1972; Solomon, Groves, 1994). В последние годы применительно к колчеданным месторождениям Урала успешно развивается модель “черных курильщиков”, предусматривающая процессы придонного гидротермального роста холмообразной сульфидной постройки и подводного выветривания (галь-

миролиза) с разрушением и образованием шлейфа кластогенных сульфидных отложений (Зайков, Масленников, 1987; Масленников, 1999, 2006, 2012; Сафина, Масленников, 2009; Maslennikov *et al.*, 2012, 2013). На флангах слабометаморфизованных месторождений залегают сульфидные брекчии, которые переходят в сульфидные песчаники и сульфидные алевролиты, переслаивающиеся с фоновыми осадками. Как на неметаморфизованных, так и на метаморфизованных колчеданных месторождениях тонкополосчатые руды почти полностью утратили первичный облик кластогенных сульфидных осадков. Значительные преобразования обломочных сульфидных отложений могут иметь как диагенетическую, так и гидротермально-метасоматическую или динамометамор-

Адрес для переписки: Н.П. Сафина. E-mail: safina@ilmeny.ac.ru

фическую природу. Соответственно, разные исследователи относят полосчатые руды к разным по генезису продуктам преобразований: диагенитам (Зайков и др., 2001; Масленников, 2006), гидротермальным метасоматитам (Doyle, Allen, 2003) и милонитам (de Roo, van Stall, 2003).

Признаки диагенетических преобразований массивных колчеданных руд рассмотрены в работе П.Я. Яроша (1973). Позднее на примерах неметаморфизованных колчеданных месторождений показана доминирующая роль диагенеза при формировании полосчатых руд по обломочным сульфидным осадкам (Масленников, 2006; Сафина, Масленников, 2007, 2009). Минеральный состав полосчатых руд существенно отличается от состава массивных и брекчиевых руд, а преобразования тем интенсивнее, чем меньше размер рудокластов и, соответственно, мощность сульфидных слоев. Закономерное концентрирование аутигенных сульфидов в кровле слоев рассматривается как доказательство важной роли диагенеза в преобразовании обломочных сульфидных отложений (Сафина, Масленников, 2007).

Изучению продуктов гидротермального метасоматоза и метаморфизма посвящены работы (Шадлун, 1947; Бетехтин и др., 1958; Ярош, 1973; Ярош, Буслаев, 1985; Медноколчеданные..., 1988; 1992; Шадлун, Викентьев, 1992; Викентьев, 2004; Молошаг и др., 2004). Сторонники гидротермально-метасоматического направления считают, что сульфидные обособления в полосчатых рудах в основном являются псевдоморфозами по фауне и обломкам пород исходных слоистых вулканогенно-осадочных или рассланцованных пород. В последние годы на Сафьяновском колчеданном месторождении (Средний Урал), реконструированном как сильно разрушенный холм “черного курильщика”, в кровле постройки непосредственно над “рудным столбом” гидротермально преобразованных халькопиритовых руд обнаружены полосчатые пирит-халькопиритовые руды – продукты гидротермально-метасоматического преобразования ритмично-слоистых обломочных сульфидных отложений (Сафина, Масленников, 2009). Они представляют собой чередование прослоев мощностью до 1 см, сложенных массивным метасоматическим халькопиритом с многочисленными порфиридовидными кристаллами пирита.

Сторонники третьего направления считают, что полосчатые текстуры с линейными структурами являются результатом пластических деформаций исходных обломочных руд, возникающих при тектонических подвижках в условиях метаморфизма (de Roo, van Stall, 2003). В более ранних работах исследователи считают полосчатые текстуры результатом замещения рудой слоистых пород или пород с флюидалной полосчатостью (Ярош, 1973). При

метаморфизме в рудах почти полностью исчезли первичные текстуры и структуры, изменился минеральный состав, размеры минералов. Отдельные прослои обогащались магнетитом, пиритом, сфалеритом или халькопиритом.

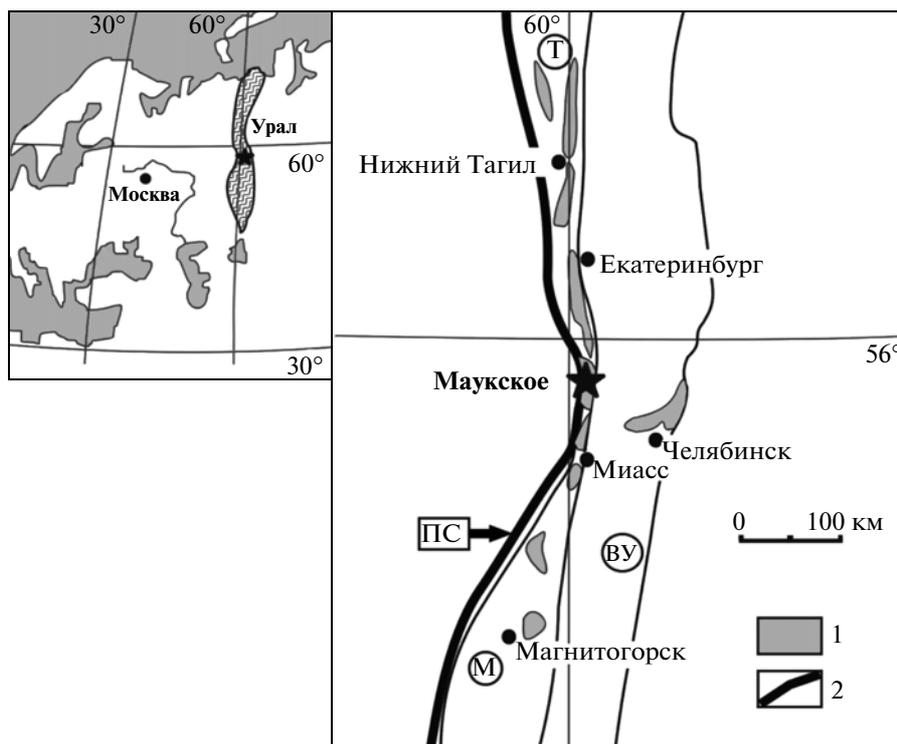
Появление магнетита в полосчатых рудах колчеданных месторождений Урала считается результатом метаморфизма (Ярош, 1973). Однако последующие работы показали, что полосчатые руды, скорее всего, являются сульфидными турбидитами, испытавшими субмаринное окисление в кровле слоев, а затем и метаморфические преобразования (Масленников, 1999). Значительная часть магнетита могла образоваться по гидроксидным железистым продуктам гальмиролиза сульфидных отложений (Злотник-Хоткевич, 1989; Масленников, 1999; Maslennikov *et al.*, 2012). В большинстве случаев окисдно-железистые прослои утратили первичные генетические признаки за счет интенсивного преобразования.

Настоящая работа направлена на определение генезиса полосчатых сульфидно-магнетитовых руд Маукского месторождения. Изучены текстуры, структуры и минеральный состав руд с выделением парагенетических минеральных ассоциаций, соответствующих различным стадиям преобразования исходных обломочных руд. Привлечение геохимических данных позволило выявить особенности состава минералов преобразованных руд.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на материале, отобранном в ходе полевых работ на Маукском руднике. Макро- и микроскопическое изучение руд выполнено в лаборатории минералогии рудогенеза (ИМин УрО РАН, г. Миасс) текстурно-структурным и минералогическим анализом с использованием оптических микроскопов Axiolab (CarlZeiss) и Olympus BX-51. Травление рудных минералов проводилось по стандартным методикам (Бетехтин и др., 1958). Магнитные свойства пирротина изучены с помощью методики магнитной порошковой графии (Грабовский, Жерденко, 1963).

Химический состав минералов определен на растровом электронном микроскопе РЭММА-202 М с энергодисперсионной приставкой (ИМин УрО РАН, аналитик В.А. Котляров) и сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (ИМин УрО РАН, аналитик И.А. Блинов). Элементы-примеси в сульфидах и магнетите определены на масс-спектрометре HP-4500 (Hewlett Packard) с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотборником (ЛА-ИСП-МС) в Тасманийском университете (г. Хобарт, Австралия, аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова). Методика ЛА-ИСП-МС-



**Фиг. 1.** Положение Маукского месторождения на схеме размещения колчедановых зон Урала. По [Масленников, 1999] с упрощениями.

1 – колчедановые районы, 2 – Главный Уральский разлом. Колчедановые зоны: ВУ – Восточно-Уральская, Т – Тагильская, М – Магнитогорская; ПС – Присакмарская зона.

анализа подробно изложена в публикации (Danu-shovsky *et al.*, 2011).

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

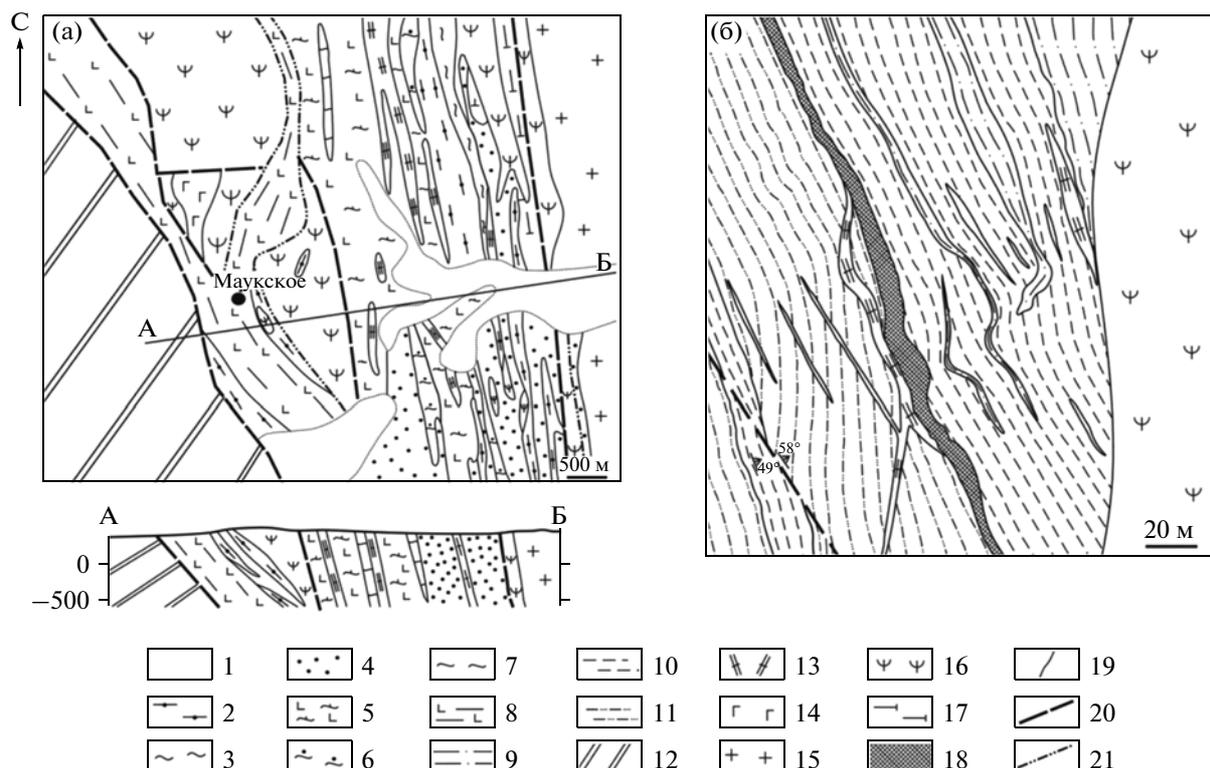
Маукское месторождение, расположенное вблизи станции Маук Челябинской обл., находится в зоне Главного Уральского разлома на самом узком участке смыкания Тагильской и Магнитогорской вулканогенных колчедановых зон (фиг. 1) в Присакмарской металлогенической зоне (Медноколчеданные..., 1988). Месторождение приурочено к полосе зеленокаменных пород вблизи южного окончания Уфалейского массива гипербазитов (Медноколчеданные..., 1988). Формирование рудовмещающего комплекса происходило в обстановке океанического спрединга в ордовике или раннем силуре (Коротеев, Сазонов, 2005). Согласно палеотектоническим реконструкциям, месторождение относится к колчеданному оруденению кипрского типа (Контарь, Либарова, 1997; Еремин и др., 2000) или подтипу бесси (Масленников, 2012).

В основании геологического разреза района Маукского месторождения залегают метаморфические породы: кристаллические сланцы, гнейсы, гранито-гнейсы и амфиболиты (фиг. 2а). Пе-

рекрывающие рудовмещающие породы ордовикско-нижнесилурийского возраста представлены кварцитами с прослоями филлитов, амфиболитов и мраморов. Завершает разрез вулканогенно-осадочная толща силурийского возраста, сложенная базальтами с прослоями уралитовых и плагиоклазовых порфиринов, маломощными прослоями риолитов и углеродисто-кремнистых сланцев, кварцитами и мраморами.

Интрузивные породы района месторождения представлены гипербазитами, превращенными в серпентиниты и тальковые породы, пироксенитами, а также габбро-амфиболитами и амфиболитовыми сланцами. Наиболее поздними являются дайки кислых пород, также преобразованные в условиях метаморфизма (Медноколчеданные..., 1988).

В геологическом строении месторождения участвуют базальты, углеродистые и углеродисто-кремнистые алевриты, линзовидные тела ультрамафитов (фиг. 2б). Эти породы преобразованы в альбит-эпидот-биотит-хлоритовые, альбит-эпидот-цоизит-актинолитовые, альбит-карбонат-актинолит-хлоритовые, графит-кварцевые сланцы и серпентиниты (Медноколчеданные..., 1988). Подрудные гидротермальные метасоматиты развиты слабо. Лишь участками выделяются слои слюдяно-кварцевых, кварц-хлоритовых и хло-



**Фиг. 2.** Геологическая карта и разрез района Маукского месторождения (а), геологическая карта Маукского месторождения (б) (по материалам Маукской геолого-разведочной партии).

1 – аллювиальные отложения: глины, пески, галечники; 2 – сланцы кремнистые, углеродисто-кремнистые, кварциты; 3 – филлитовидные сланцы, филлиты, прослои глинистых песчаников; 4 – вулканокластические породы основного и смешанного составов; 5 – вулканиды основного состава метаморфизованные; 6 – сланцы кварц-серицитовые, кварц-серицит-хлоритовые, кварц-серицитовые; 7 – сланцы кварц-эпидот-хлоритовые, серицит-кварц-хлоритовые; 8 – кварциты, филлиты, амфиболиты; 9 – надрудные хлорит-кварц-полевошпатовые сланцы; 10 – надрудные амфибол-хлоритовые апобазальтовые сланцы; 11 – подрудные карбонат-кварц-хлоритовые сланцы апорпорфиритовые; 12 – кристаллические сланцы, гнейсы, гранито-гнейсы, амфиболиты; 13 – плагиограниты; 14 – габбро; 15 – граниты; 16 – серпентиниты; 17 – гнейсированные вулканокластические породы смешанного состава; 18 – рудное тело; 19 – границы пород; 20 – разломы; 21 – тектонические границы.

ритовых пород с редкой послойной вкрапленностью сульфидов.

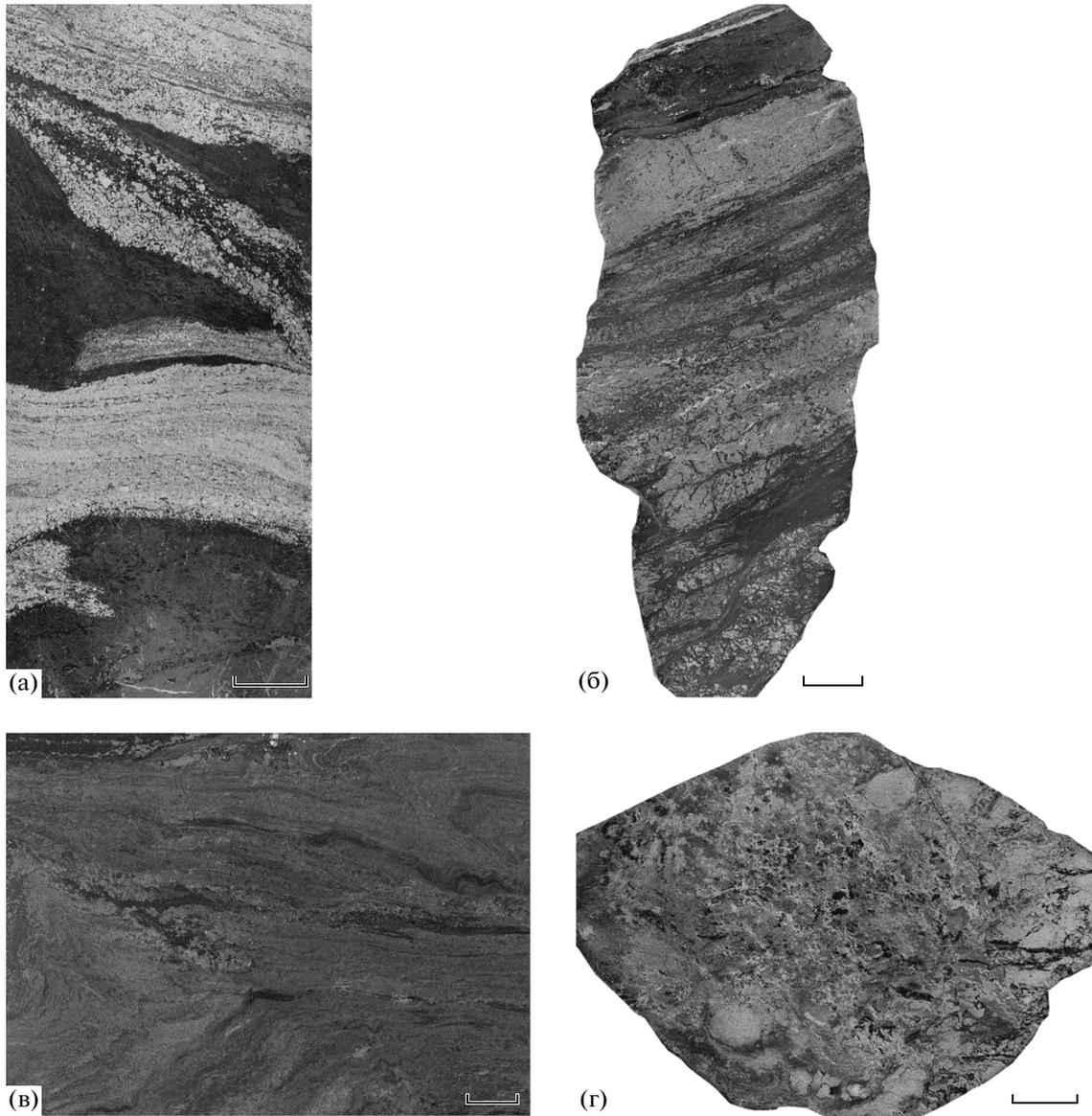
Рудные тела на Маукском месторождении представляют собой пластообразные залежи, ограниченные резкими ровными контактами без раздувов и пережимов. Они залегают согласно с общей слоистостью и вытянуты по простиранию рудоносной зоны в субмеридиональном направлении. Наиболее значительным по масштабу является Центральное рудное тело, длина которого по простиранию составляет 1500 м при мощности в центральной части 12 м (в среднем 5 м). В настоящее время отработка месторождения ведется штольной. В забое отмечается ритмичное чередование рудных пластов мощностью 5–30 см, сложенных крупнозернистым пиритом, с амфибол-хлоритовыми сланцами.

Неоднократная и интенсивная тектоно-метаморфическая трансформация Маукского месторождения предопределила глубокие изменения руд

и вмещающих пород вплоть до почти полного уничтожения признаков их первичного происхождения. Однако приуроченность рудных тел к вулканогенно-осадочной базальт-терригенной толще, резкие и ровные контакты с вмещающими породами и наличие минералогической и геохимической зональности позволили предположить вулканогенно-осадочный генезис месторождения (Медноколчеданные..., 1988).

### ТЕКСТУРЫ, СТРУКТУРЫ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

Считается, что расположение месторождения в зоне проявления глубинного метаморфизма в условиях амфиболитовой фации (Медноколчеданные..., 1988) отразилось на текстурно-структурных особенностях руд. Преобладающими являются “метаморфогенные” текстуры (полосчатая, линзовидно-полосчатая, плейчатая) и структуры (порфи-



**Фиг. 3.** Текстуры руд Маукского месторождения.

а–б – полосчатые руды: а – чередование пиритовых прослоев с нерудным материалом (черное); б – чередование пирротиновых прослоев (серое) с включениями халькопирита (светло-серое) и нерудного материала (темно-серое); в – неяснополосчатые сфалерит-магнетит-халькопирит-пиритовые руды с гнездами нерудных минералов (черное) и микроскладчатостью; г – брекчиевая руда: изометричные обломки пирита (светло-серое) в пирротин-магнетит-халькопиритовом матриксе.

ровидная и кристаллические) (Ярош, 1973; Медноколчеданные..., 1988).

В результате полевых работ на Маукском руднике установлены полосчатые и брекчиевые руды (фиг. 3). **Полосчатые руды**, широко распространенные на месторождении, подразделяются на магнетит-пиритовые, магнетит-халькопирит-пирит-пирротиновые и сфалерит-магнетит-халькопирит-пиритовые разновидности.

В *магнетит-пиритовых* рудах пиритовые и магнетитовые прослои мощностью до 3 см чередуются с нерудными прослоями (фиг. 3а). В подошве нередко наблюдаются механоглифы, фиксирующие асимметричное продавливание рудного материала в подстилающий прослой. *Магнетит-халькопирит-пирит-пирротиновые* руды характеризуются чередованием полос массивного пирротина и нерудных минералов с линзовидными участками магнетита и халькопирита (фиг. 3б).

Содержание пирротина в них достигает 60%. В *сфалерит-магнетит-халькопирит-пиритовых* рудах полосчатость улавливается благодаря линейному расположению отдельных минеральных агрегатов, представленных пиритом, магнетитом или халькопиритом. Полосчатость прерывистая, извилистая, завихряющаяся. В этом типе руд встречены оползневые деформации и микроскладчатость (фиг. 3в). Интересными находками являются брекчиевые руды *пирротин-магнетит-халькопирит-пиритового состава* (фиг. 3г). Обломочный облик им придает присутствие округлых и изометричных обособлений пирита размером 0.5–2 см в магнетит-пирротин-халькопиритовой матрице.

Главными минералами в полосчатых и брекчиевых рудах являются *пирит, пирротин, магнетит, халькопирит и сфалерит*. Второстепенные минералы — *гематит, марказит, кубанит, макинавит, грейгит, раклиджит, теллурувисмутит и самородное золото* — характерны для полосчатых руд; гессит, штюцит, уранинит, молибденит были обнаружены исключительно в брекчиевых рудах. Из нерудных минералов в обоих типах руд наиболее распространены клиноферросилит и авгит; реже встречаются ферросилит, энстантит, сидерит, биотит.

**Пирит.** В центре субгедральных кристаллов пирита-II структурным травлением концентрированной  $\text{HNO}_3$  выявлены обломки кристаллического пирита-I со срезанием зональности роста и угловатыми очертаниями (фиг. 4а). В более крупных кристаллах пирита травлением выявляются участки с осцилляторной зональностью, которая ранее была названа “зональность I рода” (фиг. 4б) (Иванов, 1950; Ярош, 1973). Кайма, окружающая зональный центр (пирит-III), не поддается травлению и содержит включения халькопирита, кубанита, макинавита, пирротина, магнетита и нерудных минералов (фиг. 4в). Пластинчатые псевдоморфозы пирита-III по пирротину, частично изогнутые и деформированные мелкими поперечными смещениями, цементируют кристаллические агрегаты пирита-II (фиг. 4г). Наиболее часто встречаются близкие к гексаэдрам, но округленные зерна пирита-IV с включениями магнетита и нерудного материала, редко — халькопирита. В таких метакристаллах пирита выявлены изометричные, реже угловатые “ядра”, окруженные плотной каймой (фиг. 4д). Травлением в концентрированной азотной кислоте в них проявляются реликты зонального строения в виде неровно-извилистых прерывающихся зон в более поздней разновидности пирита (зональность II рода).

В брекчиевых рудах, в отличие от полосчатых руд, в кристаллах пирита-III сохранились участки с тонкодисперсным строением, окруженные азональной метаморфогенной каймой. В кристаллах пирита размером менее 100 мкм с помощью трав-

ления устанавливается последовательная смена морфологических форм: “в ядрах” — участки с тонкодисперсным строением, в каймах — агрегаты зонального пирита сменяются азональными метакристаллами пирита, содержащими включения сульфидов, магнетита и нерудных минералов. Исключительно в магнетит-халькопирит-пирит-пирротиновых полосчатых рудах наблюдаются овальные наиболее поздние тонкозернистые пирит-марказитовые агрегаты (пирит-V) (фиг. 4е).

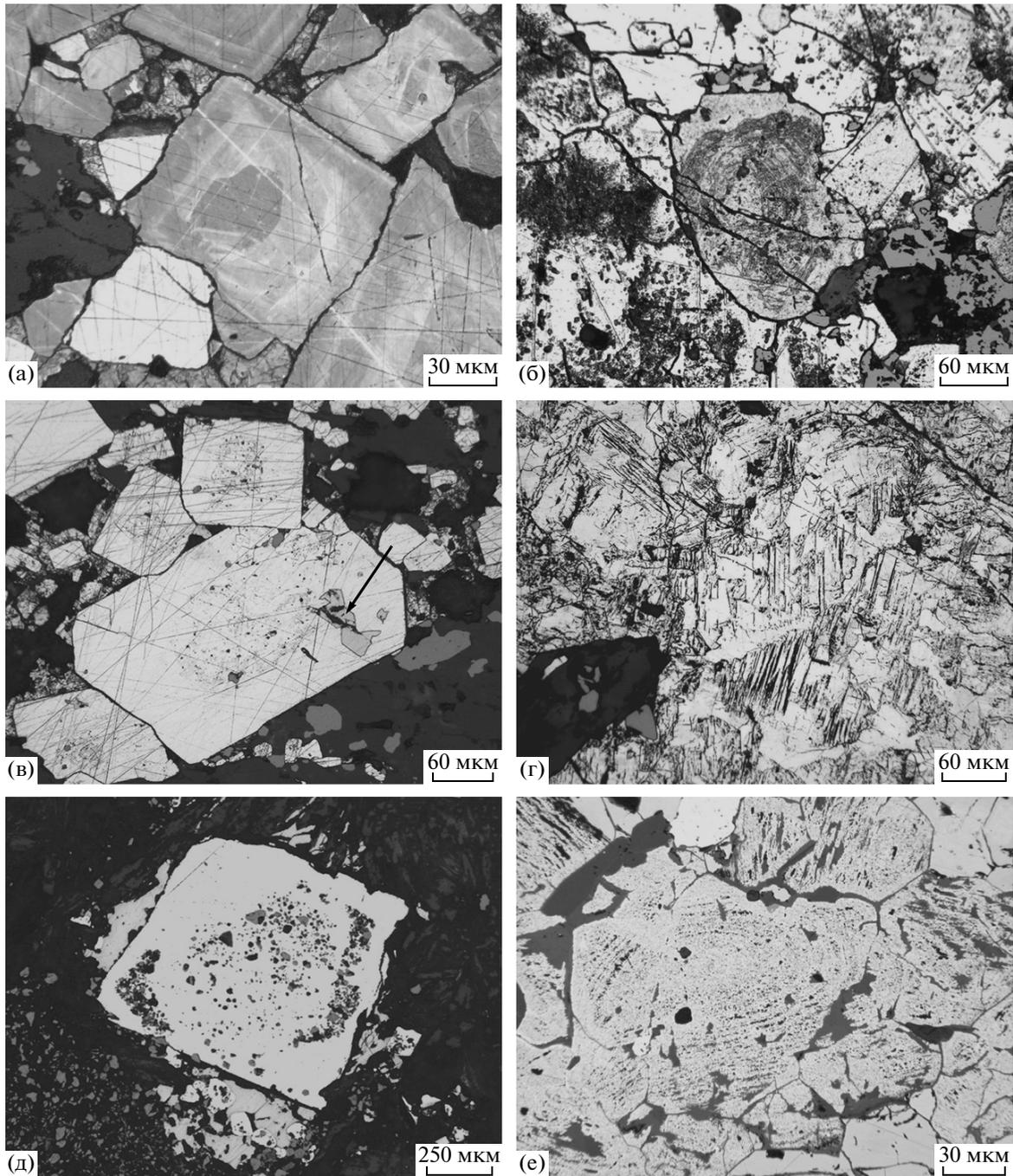
**Магнетит** в полосчатых рудах Маукского месторождения развивается по кристаллам пирита-I, II, III вплоть до образования полных псевдоморфоз с зональным, радиально-лучистым или пластинчатым строением (магнетит-1) (фиг. 5а). Доминируют в рудах субгедральные кристаллы магнетита-2 с округлыми или угловатыми включениями халькопирита с пирротинном и кубанитом, макинавита, теллурувисмутита, галенита, штюцита. Кристаллы магнетита образовались позднее пирита, халькопирита и пластинчатых агрегатов клиноферросилита (фиг. 5б). На поверхности кристаллов магнетита с помощью травления обнаруживаются два типа сростков: тонкие пластинки, хаотично располагающиеся в пределах зерна, и мельчайшие “звездочки” и “бугорки”, равномерно распределенные.

**Халькопирит** встречается в виде гнездообразных скоплений как в сульфидных, так и в нерудных прослоях. Травление крупных агрегатов халькопирита в парах царской водки выявляет его зернистое строение: в зернах выявляются полисинтетические двойники. Такие двойники, вероятно, образовались на стадиях катагенеза или метагенеза исходного халькопирита. В халькопирите присутствуют включения кубанита, пирротина, грейгита и сфалерита.

В тонких прослоях мощностью 3–5 мм сглаженно-угловатые и угловатые включения халькопирита в сростании с кубанитом, пирротинном, макинавитом заключены в кристаллах пирита-III.

По халькопириту в рудных прослоях развивается магнетит, а в кровле и на участках смятия — клиноферросилит (см. фиг. 5б), вплоть до образования скелетных форм. С халькопиритом, заполняющим трещины в метакристаллах пирита-III, связано концентрирование самородного золота.

**Пирротин.** Субгедральные и эвгедральные кристаллы пирротина характеризуются выдержанными размерами (70–100 мкм) с границами зерен под углом  $120^\circ$  и неоднородным внутренним строением (фиг. 5в). Использование магнитной суспензии выявляет немагнитные участки в центре зерен (пирротин-I) и магнитной каймы (пирротин-II) с полосчатым осаждением магнитного порошка. Мелкие зерна (менее 50 мкм) полностью магнитны. Отмечается коррозия агрегатов пирротина копьевидными кристаллами авгита (фиг. 5г).



**Фиг. 4.** Микроструктурные особенности минералов в полосчатых рудах Маукского месторождения.

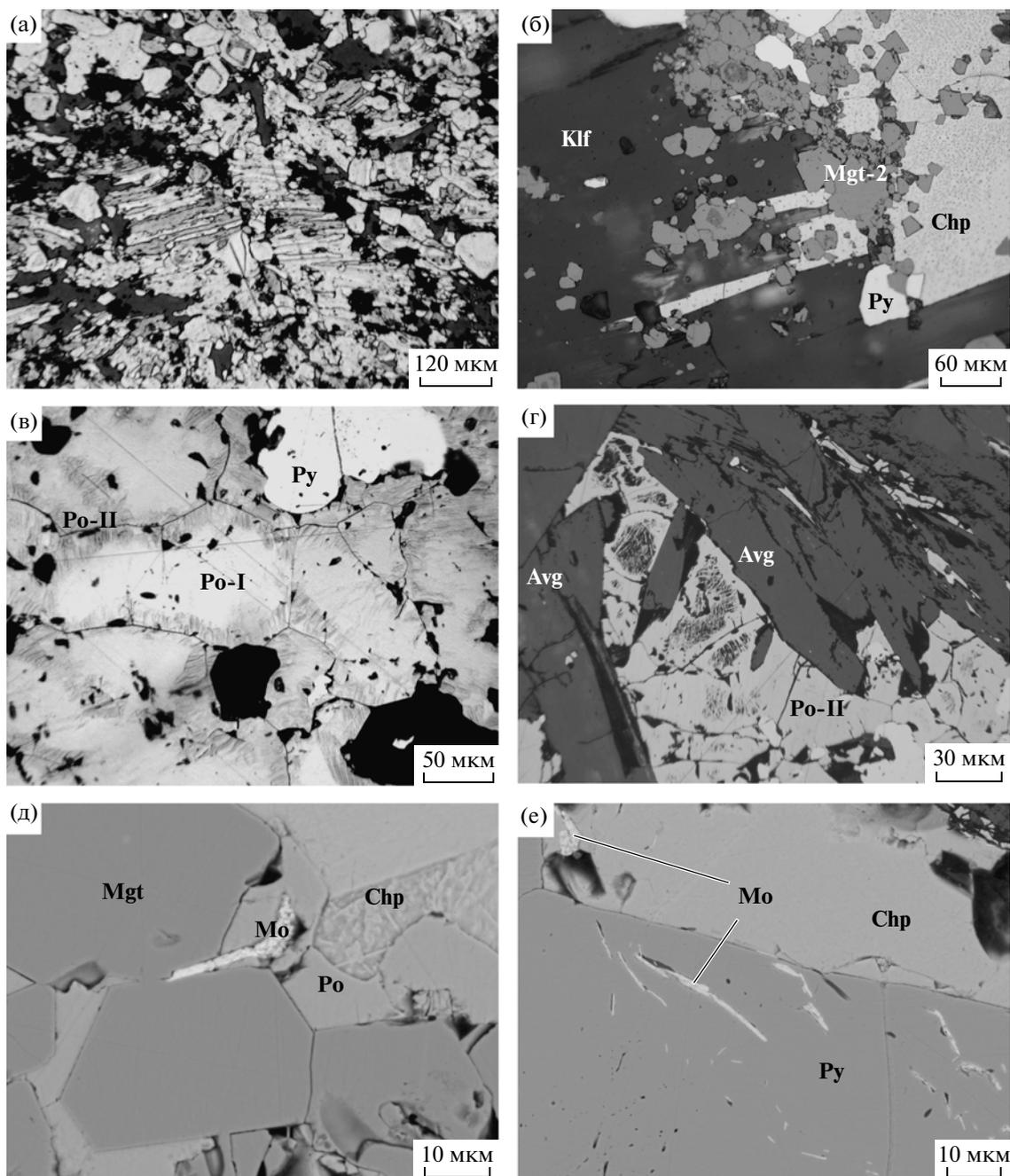
а – обломок пирита-I в зональном пирите-II; б – кристаллы пирита-II-III с зональностью I рода; в – включение халькопирит-кубанитового состава (показано стрелкой) в незональной кайме пирита-III; г – пластинчатые кристаллы пирита-III; д – включения магнетита-2 в центральной части кристаллического пирита-IV, окруженного каймой нерудного материала; е – пирит-V со структурой “птичьего глаза”.

Отраженный свет. Черное – нерудные минералы. Фото а–г – протравлено  $\text{HNO}_3$  конц.

**Сфалерит** присутствует в основном в виде ксеноморфных зерен в ассоциации с халькопиритом. Травление в парах царской водки выявляет его сдвойникованное строение. Сфалерит также встречается в виде мелких (до 10 мкм) зерен, при-

уроченных к включениям аксессуарных минералов в пирите.

**Молибденит** в виде изогнутых пластинчатых кристаллов и ксеноморфных зерен заполняет поры в кристаллах пирита-III и пирротина, интер-



**Фиг. 5.** Микроструктурные особенности минералов в рудах Маукского месторождения.

а – пластинчатый и зональный магнетит-1; б – замещение магнетитом-2 (Mgt) пластинчатого клиноферросилита (Klf), корродирующего халькопирит (Chp); в – субгедральные кристаллы пирротина с немагнитным центром (Po-I) и магнитной каймой (Po-II), корродированные кристаллами авгита (Avg) (г); д–е – молибденит (Mo) в магнетит-пирротиновой (Mgt-Po) и халькопирит-пиритовой (Chp-Py) ассоциациях.

а–г – изображения в отраженном свете, д–е – в обратно-рассеянных электронах. Черное – нерудные минералы. Фото а-б, г – протравлено в HCl; в – пирротин под магнитной суспензией.

стиции в агрегатах магнетита-2 (фиг. 5д–е). Размеры пластинок молибденита не превышают в длину 10–15 мкм при поперечнике до 5 мкм. Отметим, что в пирите пластинки молибденита приурочены к плотной кристаллической кайме и отсутствуют в пористых “ядрах”.

*Кубанит* представлен двумя морфологически различными разновидностями. Кубанит-1 образует полосы различной толщины и длины в халькопирите, ориентированные в разных направлениях (фиг. 6а). Такие структуры считаются результатом распада твердого раствора (Рамдор, 1962; Крейг, Воган,

1983). В метакристаллах пирита и магнетита встречаются многофазные округлые включения кубанита-1 с халькопиритом, макинавитом и сфалеритом. Кубанит-2 наблюдается в виде включений с зазубренными краями размерами 5–10 мкм в сростании с макинавитом, пирротинном и халькопиритом в незональных каймах пирита-II-III и в магнетите-2. В составе полос кубанита была обнаружена примесь Ni (1.32 мас. %), тогда как в кубаните, слагающем включения в пирите, никель не обнаружен.

*Грейгит* образует зерна вытянутой формы размером до 10 мкм исключительно в халькопирите, цементирующем метакристаллы пирита-III. В химическом составе грейгита содержание никеля достигает 2.47 мас. %.

*Макинавит* слагает тонкие полосы в ассоциации с кубанитом и пирротинном в халькопирите, цементирующем метакристаллы пирита (см. фиг. 6а). В химическом составе полос макинавита установлено присутствие примеси Ni (0.65 мас. %). Наиболее часто макинавит встречается в сростании с кубанитом и халькопиритом в виде округлых зерен, заключенных в пирите-III. Размер зерен макинавита не превышает 10 мкм в поперечнике. В магнетите минерал концентрируется по краям халькопиритовых включений с полосками кубанита.

*Самородное золото* обнаружено в виде субмикроскопического зерна ( $3 \times 7$  мкм) в ассоциации с халькопиритом, заполняющим микротрещины в пирите-III. По результатам микронзондовых анализов в составе золотины установлены примеси серебра (20.27–21.54 мас. %) и меди (0.29–1.37 мас. %).

*Раклиджит и теллуrowисмутит* – первые находки минералов систем Pb–Bi–Te и Bi–Te в рудах изучаемого месторождения. Ранее здесь указывалось на присутствие алтаита (Молошаг и др., 2002). Раклиджит в полосчатых рудах Маукского месторождения встречен в метакристаллах пирита-II-III в составе ксеноморфных включений размером до 30 мкм в сростании с халькопиритом и пирротинном (фиг. 6б). Теллуrowисмутит в виде угловатых выделений размером 3–7 мкм заполняет, наряду с нерудными минералами, поры в магнетите и агрегатах пирита-III (фиг. 6в). Состав раклиджита и теллуrowисмутита отличается от теоретического избытком металлов (Pb, Ag, Fe) и присутствием примеси серы и селена (табл. 1). Вариации в составе обнаруженных минералов и невозможность корректного пересчета полученных анализов на формулы раклиджита и теллуrowисмутита могут объясняться их принадлежностью к непрерывной серии твердых растворов  $n\text{PbTe} + m\text{Bi}_2\text{T}_3$  (Cook *et al.*, 2007<sub>1</sub>; Cook *et al.*, 2007<sub>2</sub>; Maslennikov *et al.*, 2013). Дополнительно в прослоях может присутствовать алтаит. Возможно, как и в случае с галенитом, в обнаруженных минералах систем Pb–Bi–Te и

Bi–Te имеет место гетеровалентный изоморфизм по схеме:  $\text{Pb}^{2+} = \text{Ag}^+ + \text{Bi}^{3+}$ .

*Гессит и штюцит* – первые находки в рудах Маукского месторождения. В брекчиевых рудах гессит в виде пластинчатого включения в метакристаллах пирита размером 3 мкм находится в сростании с селенсодержащим теллуrowисмутитом (фиг. 6г). Угловатое микровключение штюцита размером 2 мкм располагается на границе магнетита-2 с пиритом (фиг. 6д). Химический состав гессита и штюцита соответствует теоретическому (см. табл. 1).

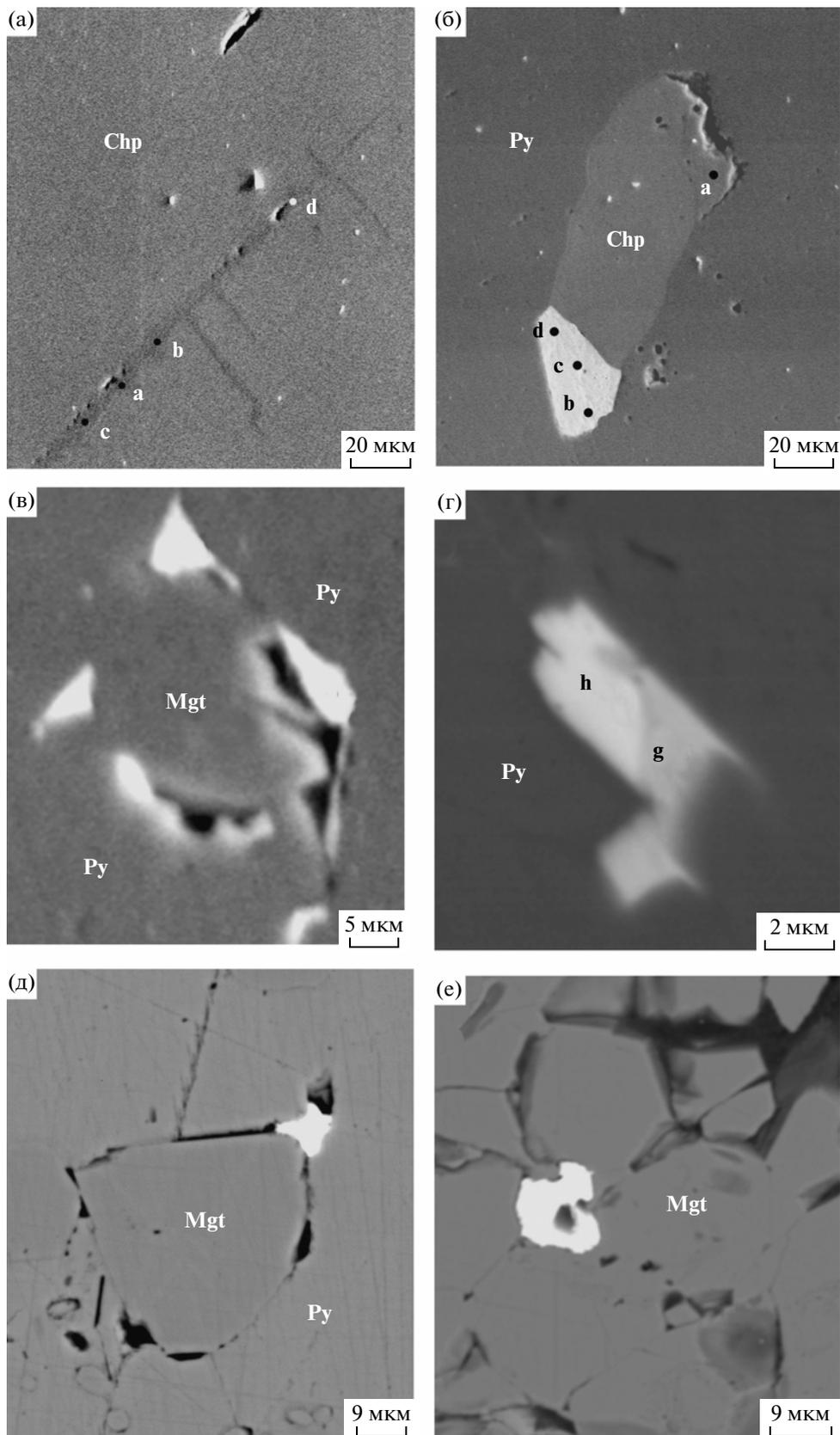
*Галенит*. Редкие выделения галенита размером до 5 мкм располагаются вдоль границ кристаллов пирита и магнетита-2. На энергодисперсионном спектре галенита помимо характерных линий свинца и серы присутствуют линии селена и теллура.

*Уранинит* также первая находка в рудах изучаемого месторождения. Присутствие уранинита ранее было установлено в медно-кобальтовых рудах Пышминско-Ключевского колчеданного месторождения (Средний Урал) (Мурзин и др., 2011). П.Я. Ярош (1973) на примере метаморфизованных колчеданных объектов объяснял привнос в руды радиоактивных элементов растворами, связанными с поздними гранитными интрузиями.

Уранинит в брекчиевых рудах Маукского месторождения в виде ксеноморфного включения с пористой поверхностью размером до 10 мкм встречен в магнетите-2 (фиг. 6е). По данным микронзондового анализа, в составе уранинита наблюдаются примеси свинца и железа. Согласно данным ИСП-МС, содержания урана и тория в изученных рудах Маукского месторождения не превышают 0.1–0.3 г/т и 0.12 г/т соответственно.

*Нерудные минералы*. От подошвы к кровле каждого из прослоев возрастает количество нерудных минералов, представленных клиноферросилитом, ферросилитом, авгитом, реже – сидеритом и биотитом в ассоциации с пиритом-IV и магнетитом. Биотит, энстатит, ферросилит и авгит приурочены к поздним генерациям кристаллического пирита (фиг. 4д), клиноферросилит – к халькопириту (см. фиг. 5б), сидерит и авгит – к пирротину (фиг. 5г). Отмечается интенсивная коррозия сульфидов нерудными минералами.

По результатам микроскопических наблюдений в полосчатых и брекчиевых рудах Маукского месторождения была реконструирована следующая последовательность минералообразования: 1) пирит-I-II; 2) пирит-II-III, халькопирит, кубанит-макинавит-грейгит, сфалерит, золото, раклиджит, магнетит, нерудные минералы; 3) пирит-IV, халькопирит, пирротин, пирит-V, магнетит, молибденит, уранинит, гессит-теллуrowисмутит-галенит-штюцит, нерудные минералы.



**Таблица 1.** Химический состав минералов систем Pb, Bi–Te; Bi–Te; Ag–Te из руд Маукского месторождения (мас. %)

№ п/п	№ анализа	Te	Bi	Pb	Ag	Fe	Se	S	Сумма
1	15359b	43.12	42.19	14.36	–	–	–	–	99.67
2	15359c	43.57	43.44	12.48	–	–	–	–	99.49
3	15359d	44.04	43.48	12.54	–	–	–	–	100.06
4	17479a	51.94	32.18	8.55	2.56	3.67	–	1.10	100.00
5	17479b	50.10	32.82	9.64	2.40	3.65	–	1.39	100.00
6	17480a	39.07	31.18	11.28	2.33	9.61	–	6.54	100.00
7	17480b	42.99	34.05	10.98	2.35	7.67	–	1.95	100.00
8	20224h	39.95	41.95	9.92	1.78	3.74	0.33	1.80	99.46
9	20224g	37.40	–	–	61.80	–	–	–	99.20
10	20224a	42.50	–	–	57.50	–	–	–	100.00
№ п/п	№ анализа	Формула							
1	15359b	$(\text{Bi}_{2.30}\text{Pb}_{0.80})_{3.10}\text{Te}_{3.90}$							
2	15359c	$(\text{Bi}_{2.41}\text{Pb}_{0.69})_{3.10}\text{Te}_{3.90}$							
3	15359d	$(\text{Bi}_{2.41}\text{Pb}_{0.69})_{3.10}\text{Te}_{3.90}$							
4	17479a	$(\text{Bi}_{1.04}\text{Fe}_{0.49}\text{Pb}_{0.28}\text{Ag}_{0.14})_{1.95}(\text{Te}_{2.85}\text{S}_{0.21})_{3.06}$							
5	17479b	$(\text{Bi}_{1.10}\text{Fe}_{0.42}\text{Pb}_{0.35}\text{Ag}_{0.14})_{2.01}(\text{Te}_{2.71}\text{S}_{0.28})_{2.99}$							
6	17480a	$(\text{Fe}_{0.94}\text{Bi}_{0.83}\text{Pb}_{0.28}\text{Ag}_{0.11})_{2.16}(\text{Te}_{1.72}\text{S}_{1.1})_{2.82}$							
7	17480b	$(\text{Bi}_{1.04}\text{Fe}_{0.91}\text{Pb}_{0.32}\text{Ag}_{0.13})_{2.40}(\text{Te}_{2.21}\text{S}_{0.39})_{2.60}$							
8	20224h	$(\text{Bi}_{1.41}\text{Fe}_{0.49}\text{Pb}_{0.35}\text{Ag}_{0.14})_{2.39}(\text{Te}_{2.18}\text{S}_{0.42})_{2.62}$							
9	20224g	$\text{Ag}_{1.99}\text{Te}_{1.0}$							
10	20224a	$\text{Ag}_{4.81}\text{Te}_{3.0}$							

Примечание. Формулы раклиджита (№ 1–3) рассчитаны на сумму атомов висмута, свинца и теллура, равную 7; теллуровисмутита (№ 4–8) – на сумму теллура и висмута, равную 5; гессита (№ 9) – на сумму теллура и серебра, равную 3; штюццита (№ 10) – на 3 атома теллура. Прочерк – элемент не обнаружен. Аналитики В.А. Котляров и И.А. Блинов (ИМин УрО РАН).

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Методом ЛА-ИСП-МС в полосчатых рудах месторождения были определены содержания элементов-примесей в пирите, халькопирите, пирротине, сфалерите и магнетите (табл. 2).

**Пирит.** Первая разновидность – пирит-II-III, характеризуется повышенными содержаниями элементов-примесей и их значительными вариациями, которые могут быть связаны с реликтами пирита с колломорфным и зональным строением. В отличие от перекристаллизованного пирита-IV, ранние разновидности пирита содержат значительно больше Mn и Tl при сходных содержаниях Co, Ni и As (см. табл. 2). Судя по трендам ЛА-ИСП-МС-импульсов, последние три элемента изоморфно входят в структуру обеих раз-

новидностей пирита. Значительные вариации Tl (0.03–36 г/т), Bi (8–128 г/т), Pb (9–162 г/т), Te (7–90 г/т), Au (0.01–0.45 г/т), Sb (0.07–18 г/т), Ag (0.04–16 г/т), Se (71–795 г/т), Mo (0.01–2.96 г/т), Ni (0.81–130.0 г/т), очевидно, обусловлены микровключениями аксессуарных минералов, количество которых в каждой разновидности пирита различное. Присутствие примесей Tl, Pb и Sb свидетельствует в пользу микровключений галенита. Обогащение пиритов Ag, Bi, Pb, Se, Te связано с микровключениями минералов систем Pb–Bi–Te, Bi–Te и Ag–Te и их селенистых разновидностей.

Вторая разновидность пирита (Py-IV), согласно микроскопическим наблюдениям, почти полностью лишена реликтовых включений аксессуарных минералов, или они встречаются редко. Значи-

**Фиг. 6.** Аксессуарные минералы в рудах Маукского месторождения.

а – включение кубанит-макинавит-пирротинового состава в халькопирите (кубанит – с, макинавит – d, пирротин – а, b); б – раклиджит (b–d) в сростании с халькопиритом (Chp) и пирротинном (а) в пирите (Py); в – угловатые включения теллуровисмутита в ассоциации с нерудными минералами (черное) и магнетитом (Mgt) в пирите (Py); г – сросток гессита (g) и селенсодержащего теллуровисмутита (h) в пирите (Py); д – включение штюццита в ассоциации с пиритом (Py) и магнетитом (Mgt); е – уранинит в магнетите (Mgt).

а–е – изображения в обратно-рассеянных электронах.

**Таблица 2.** Содержание элементов-примесей в минералах полочатых магнетит-сульфидных руд колчеданного месторождения Маук (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

Минерал		n	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo
Py-II-III	cp	10	3.4	0.3	0.16	44	46.3	3612	16	1340	44	165	283	0.80
	co		0.8	0.5	0.21	103	0.5	5576	40	2258	56	228	260	0.96
Py-IV	cp	12	5.5	0.03	0.11	0.2	46.4	1499	21	1.4	2.1	186	74.0	1.58
	co		1.7	0.05	0.13	0.3	0.4	4477	42	1.4	4.0	257	86.0	4.74
Chp	cp	10	7.2	7.0	0.17	50	31.7	1.2	0.17	332737	858	0.9	218	0.04
	co		7.9	20.0	0.34	141	1.0	2.6	0.28	9337	194	0.9	94.0	0.07
Sph	cp	6	2.4	0.01	0.29	323	3.7	0.9	0.10	21.0	628667	1.3	85.0	0.07
	co		0.4	0.00	0.22	28	0.8	2.1	0.14	4.2	8869	1.9	7.0	0.09
Po	cp	5	1.2	0.01	0.14	1.5	63.5	78	43	0.5	2.1	0.6	403	0.04
	co		0.3	0.01	0.19	1.8	0.0	2.7	4.7	0.6	3.6	0.6	27.0	0.02
Mgt-1	cp	5	3.4	6.6	0.65	555	72.0	3.9	0.7	205	48	1.4	6.0	0.08
	co		1.3	0.3	0.49	65	0.0	0.6	0.3	357	21	1.4	4.0	0.08
Mgt-2	cp	13	138	51.0	0.44	231	72.0	2.4	1.0	141	90	4.1	2.0	0.13
	co		237	33.0	0.63	143	0.0	1.0	0.5	279	96	2.9	2.0	0.24
Минерал		n	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Ba	W	Au	Tl	Pb	Bi	U
Py-II-III	cp	10	4.2	0.5	0.1	2.8	27.5	1.5	0.17	0.13	3.7	44.1	36.5	0.33
	co		7.1	0.8	0.1	5.4	33.9	3.6	0.17	0.17	11.4	51.8	46.8	1.01
Py-IV	cp	12	0.1	0.1	0.7	0.05	1.3	0.04	0.29	0.02	0.04	1.3	0.5	0.01
	co		0.2	0.1	0.3	0.04	3.0	0.05	0.98	0.05	0.07	1.6	0.9	0.02
Chp	cp	10	4.1	10.2	55.8	0.34	10.9	0.80	0.01	0.04	0.08	7.8	6.7	0.002
	co		3.9	4.4	27.8	0.35	10.5	2.13	0.02	0.09	0.18	7.7	10.4	0.002
Sph	cp	6	1.6	1847	1.3	0.07	0.3	0.04	0.001	0.01	0.002	1.0	1.0	0.002
	co		1.3	101.9	0.1	0.12	0.4	0.04	0.001	0.01	0.001	1.4	2.0	0.001
Po	cp	5	0.3	0.01	0.1	0.01	0.4	0.18	0.001	0.01	0.01	2.4	0.3	0.002
	co		0.2	0.02	0.0	0.01	0.2	0.33	0.001	0.03	0.02	2.3	0.2	0.002
Mgt-1	cp	5	0.2	0.11	0.3	0.37	1.7	3.0	0.24	0.01	0.08	2.4	0.8	0.2
	co		0.1	0.09	0.1	0.42	1.6	2.1	0.30	0.02	0.07	1.0	0.7	0.3
Mgt-2	cp	13	0.1	0.14	0.4	1.8	1.9	23.9	0.50	0.01	0.35	6.5	1.0	1.7
	co		0.2	0.14	0.3	1.5	4.5	64.5	0.44	0.01	0.63	5.5	1.8	1.5

Примечание. Минералы: Py – пирит; Chp – халькопирит; Sph – сфалерит; Po – пирротин; Mgt – магнетит. Содержание железа в минералах в %, cp – среднее содержание, co – стандартное отклонение, n – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова.

**Таблица 3.** Соотношения средних содержаний элементов-примесей в магнетите-1 и -2 полосчатых магнетит-сульфидных руд колчеданного месторождения Маук (г/т) по данным ЛА-ИСП-МС

	<i>n</i>	Hg	Se	Mn	Au					
Mgt-1/Mgt-2	5	5.2	2.9	2.4	2.1					
	<i>n</i>	Ti	Ba	V	U	Sb	Tl	As	Pb	W
Mgt-2/Mgt-1	13	40.3	8.0	7.8	7.2	4.8	4.5	2.9	2.7	2.0

Примечание. Mgt – магнетит. *n* – количество анализов. Аналитики В.В. Масленников, С.П. Масленникова.

тельные вариации содержаний таких элементов, как Mo (0.01–16.6 г/т), W (0.001–3.4 г/т), связаны с включениями нерудной матрицы. Обеднение элементами-примесями пирита-IV объясняется его большей перекристаллизацией и очищением от большинства примесей, а также включений других минералов.

**Халькопирит.** Особенностью химического состава халькопирита полосчатых руд Маукского месторождения, относительно сосуществующих рудных минералов, является повышенное содержания Zn, Sn, Se (см. табл. 2). Помимо перечисленных элементов халькопирит является носителем Te (до 36.6 г/т), Pb (до 16.0 г/т), Bi (до 32.3 г/т) и Ag (до 9.9 г/т).

В халькопирите Маукского месторождения цинк, олово и селен (Zn  $\gg$  Se > Sn) присутствуют в виде изоморфных примесей. Ассоциация этих примесей, наряду с теллуrom и висмутом, характерна для высокотемпературного (>250°C) халькопирита медно-колчеданных труб палеозойских “черных курильщиков” (Масленникова, Масленников, 2007), а также обломков халькопирита в кластогенных рудах некоторых колчеданных месторождений Урала (Сафина, Масленников, 2009).

**Пирротин.** В целом пирротин полосчатых руд Маукского месторождения обнаруживает высокие, но стабильные содержания Ni (35–47 г/т), Co (76–82 г/т) и Se (378–450 г/т). Очевидно, что все эти элементы изоморфно входят в структуру пирротина. Этот факт, а также низкие содержания As (до 1.47 г/т), отличают пирротин Маукского месторождения от пирротинов Дергамышского и Ишкининского месторождений, в которых эти элементы представлены собственными минералами – сульфидами, арсенидами и сульфоарсенидами Ni и Co (Melekestseva *et al.*, 2013). Однако, по данным микрорентгеноспектрального анализа, в изучаемом пирротине с микровключениями никельсодержащего макинавита концентрации Ni достигают 0.69–0.86 мас. %.

**Сфалерит.** Сфалерит является высокожелезистой разновидностью (Fe 3.2–5.2 мас. %). По данным рентгеноспектрального микроанализа, в единичных случаях содержания Fe в сфалерите дости-

гают 11.8 мас. %. Это существенно отличает его от сфалерита колчеданных месторождений уральского и куроко типов. Судя по трендам импульсов ЛА-ИСП-МС, железо изоморфно входит в структуру сфалерита, и лишь незначительная его часть связана с микровключениями халькопирита (Cu 17–26 г/т). Содержания марганца в сфалерите умеренные (303–378 г/т), при необычно низких содержаниях Cd (1779–1941 г/т) и Sn (1.1–1.5 г/т). Содержания Se в сфалерите хотя и ниже, чем в других сульфидах, однако все же стабильно высокие (78–94 г/т) по сравнению со сфалеритом из других уральских колчеданных месторождений. Судя по ровным трендам импульсов ЛА-ИСП-МС, Se<sup>2-</sup> изоморфно замещает S<sup>2-</sup> в структуре сфалерита и не образует собственных минеральных включений.

**Магнетит.** Результаты химического анализа двух разновидностей магнетита показали следующие вариации содержаний основных компонентов (табл. 2).

В целом в двух разновидностях магнетита содержания рудных элементов, за исключением Ti, V, U, Sb, As, Ba и Mn, всегда ниже по сравнению с сульфидами. Отличия в ассоциациях элементов-примесей обусловлены различным составом замещаемой матрицы. Большинство химических элементов, среди которых доминируют литогенные (Ti, Ba, V, U, W), концентрируются в магнетите-2, который образовался по алюмосиликатам. Соотношение элементов-примесей, вероятно связанных с галенитом (Pb, Tl, Sb), в магнетите-2 выше, чем в магнетите-1 (табл. 3). Апопиритовый магнетит-1 не наследует химические элементы колчеданной ассоциации, за исключением Hg, Se и Au.

Особенности химического состава минералов в преобразованных в условиях метаморфизма обломочных рудах следующие: кристаллы пирита концентрируют Co и As, пирротина – Ni и Se, халькопирита – Cu, Ag, Sn, Te, Pb и Bi, сфалерита – Mn. Магнетит-1 накапливает большинство элементов-примесей по сравнению с магнетитом-2.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

### *Признаки первичной обломочной природы полосчатых руд*

В полосчатых рудах Маукского месторождения выявляются признаки разнородности рудокластов, реликты первичного тонкодисперсного пирита, а также механоглифы в подошве прослоев, сходные со знаками нагрузки, оставляемыми обломочными рудными потоками. Перечисленные признаки широко распространены на неметаморфизованных колчеданных месторождениях.

Для полосчатых руд Маукского месторождения характерны обломки и реликты первичных донных гидротермальных руд, представленные пиритом с колломорфным строением. В метакристаллах пирита выявлены ядра грубозонального пирита, характерные для слабо метаморфизованных колчеданных месторождений (Ярош, 1973; Шадлун, Добровольская, 1987; Богуш, Бурцев, 2004). Отмечается регенерация обломков – обрастание рудокластов оторочками новообразованного пирита. Такие же обрастания встречаются и на неметаморфизованных колчеданных месторождениях (Масленников, 2006; Сафина, Масленников, 2009). На Маукском месторождении, как и на неметаморфизованных колчеданных месторождениях, тонкослоистые руды почти полностью потеряли признаки обломочного строения – место рудокластов занимают агрегаты или одиночные эвгедральные кристаллы пирита с реликтами рудокластов.

### *Признаки преобразования руд*

Полосчатые руды Маукского месторождения в значительной степени перекристаллизованы в результате глубокой проработки исходного материала в условиях метаморфизма, сопровождающегося деформациями. Причинами различного минерального состава прослоев при их одинаковой мощности служат различия в исходном составе рудокластов и скорости преобразования отличных по крупности исходных обломков руд (Сафина, Масленников, 2007).

Кристаллы пирита в метаморфизованных полосчатых рудах Маукского месторождения не достигают совершенной формы ввиду их роста в уплотненной среде, что возможно в условиях катагенеза и метагенеза (Япаскерт, 2008). Они обладают заливчатыми очертаниями из-за “вдавливаний” сосуществующих кристаллов пирита при их совместном росте, а также гранозернистой структурой.

Особенностями кристаллов позднего метаморфогенного пирита-IV с зональностью II рода является обрастание каймами нерудных минералов, что, согласно (Елисеев, 1963), считается признаком регрессивного метаморфизма руд. Кристаллы метаморфогенного пирита в прослоях с преобла-

данием магнетита-2 отличаются дырчатой структурой, ранее описанной для метаморфизованных колчеданных руд (Богуш, Бурцев, 2004). В таких кристаллах пирита присутствуют включения магнетита и нерудных минералов (авгит, ферросилит), захваченные при перекристаллизации.

Особенностью химического состава кристаллов пирита-III в брекчиях, по сравнению с поздним пиритом из полосчатых руд, а также халькопиритом, сфалеритом, пирротинном и магнетитом, является накопление кобальта. Концентрирование кобальта в каймах кристаллического пирита, окружающего ядро с тонкодисперсным строением, незначительные содержания в более перекристаллизованных агрегатах и отсутствие кобальта в сосуществующих минералах свидетельствуют о диффузии элемента в пределах кристалла в результате увеличения температуры минералообразования. В целом содержания кобальта в кристаллах пирита сопоставимы с пиритом кобальт-медноколчеданных объектов, залегающих в ультраосновных породах на Урале (Пышминско-Ключевское, Ишкининское и др.) и базальтах (Летнее) (Белогуб и др., 2004; Мелекесцева, 2007; Мурзин и др., 2011).

Пирит-III полосчатых руд характеризуется повышенными концентрациями мышьяка в сравнении с пиритами Пышминско-Ключевского, Ишкининского, Дергамышского и Ивановского месторождений (Мелекесцева, 2007; Мурзин и др., 2011). Сходные по содержанию мышьяка кристаллы пирита широко представлены как в гидротермально-метасоматических рудах, так и в пиритовых диагенитах неметаморфизованных колчеданных месторождений. Однако пирит неметаморфизованных месторождений содержит больше марганца и таллия (Сафина, Масленников, 2009).

Морфологические особенности и физические свойства пирротина в изученных рудах различны. В сфалерит-магнетит-халькопирит-пиритовых рудах отмечаются редкие включения пирротина в кристаллах пирита и его агрегатах. В магнетит-халькопирит-пирит-пирротинных и брекчиевых пирротин-магнетит-халькопирит-пиритовых рудах пирротин характеризуется гранозернистой структурой и зональным строением с чередованием немагнитной и магнитной модификаций. Выявленное зональное строение пирротинных свидетельствует о разных механизмах роста граней пирротина в результате изменения активности серы и температуры растворов при рекристаллизации рудных агрегатов с увеличением степени метаморфизма (Грабовский, Жерденко, 1963; Lianxing, Vokes, 1996).

Пирротин в изученных рудах – более поздний минерал по отношению к халькопириту и пириту и в сравнении с этими минералами концентрирует никель (см. табл. 2). Сопоставление с пирротинами из метаморфизованных медных руд Западного

рудопроявления (Полярный Урал), залегающих в полосчатых амфиболитизированных роговиках (Петров и др., 2008), показывает также накопление в пирротине Маукского месторождения Se (378.3–450.0 г/т) и Co (75.5–82.2 г/т).

Избирательное и интенсивное замещение халькопирита пластинчатым клиноферросилитом в полосчатых рудах является проявлением метаморфических изменений. Замещение халькопирита хлоритом широко развито в метаморфизованных рудах колчеданных месторождений Северного Урала (Ярош, 1973). В сплошных сульфидных рудах Пышминско-Ключевского месторождения выявлено замещение халькопирита, реже пирротина, железистым амфиболом – ферроантофилитом (Мурзин и др., 2011). Замещение сульфидов послерудными тонкочешуйчатыми слюдястыми минералами приводило к образованию вкрапленных руд с низкими содержаниями сульфидов (Пшеничный, 1984).

Особенностью химического состава халькопирита Маукского месторождения является присутствие изоморфных примесей цинка, олова и селена ( $Zn \gg Se > Sn$ ). Поступление в халькопирит большинства элементов-примесей могло происходить при замещении кристаллов пирита халькопиритом на стадии катагенеза. Такая разновидность халькопирита со сдвойникованным внутренним строением чаще всего характеризуется более низкими содержаниями элементов-примесей по сравнению с гидротермальными и диагенетическими разновидностями халькопирита (Сафина, Масленников, 2007).

В пользу аутигенной природы теллуридов, концентрирующихся в полосчатых сфалерит-магнетит-халькопирит-пиритовых рудах, свидетельствует их морфология. Минералы заполняют поры, межзерновые пространства, микротрещины в кристаллах пирита-III и магнетита-2. Смена грейгит-пирротин-кубанит-макинавитовой ассоциации золото-раклиджитовой и шпютцит-гессит-теллуrowисмутит-галенитовой может быть результатом перекристаллизации исходного рудного вещества в условиях катагенеза (Аюпова и др., 2012) или регрессивного метаморфизма (Молошаг, 2011). Важно отметить, что минералы, слагающие первую ассоциацию, обогащены никелем. В полосчатых рудах месторождения присутствие акцессорных минералов совпадает с общим нарастанием в них магнетита-2 при снижении количества метакристаллов пирита и халькопирита.

Магнетит как в брекчиях, так и в полосчатых рудах является поздним минералом по отношению к сульфидным и некоторым нерудным минералам. В прослоях, в которых сохранились ранние генерации пирита, концентрируется псевдоморфный магнетит-1. Большая часть магнетита – это суб- и эвгдральные кристаллы (магнетит-2) с

признаками наложенных деформаций, приуроченные к сульфидным минералам, испытавшим наибольшую перекристаллизацию в результате постдиагенетических преобразований. Так, в брекчиях магнетит-2 развивается на фоне пирротина, замещающего халькопирит и пирит. В полосчатых разностях магнетит – результат коррозии, регенерации и трансформации сульфидных и нерудных минералов, что подтверждается их концентрированием в ассоциации с клиноферросилитом. В кристаллах магнетита-2 содержание большинства элементов-примесей ниже, чем в псевдоморфном магнетите-1. В целом в обеих разновидностях магнетита содержание рудных элементов, кроме Ti, V, U, Sb, As, Ba, Mn, всегда ниже по сравнению с сульфидами.

Появление магнетита в рудах колчеданных месторождений связывается с замещением пирита и пирротина этим минералом при метаморфизме руд (Ярош, 1973). На Маукском месторождении магнетит появляется как в рудах с пирротинном, так и без него. Больше количество магнетита образовалось по пириту, меньшее – по халькопириту, пирротину и нерудным минералам. Появление на гранях кристаллов магнетита микроскульптур в виде пластинок, “звездочек” и “бугорков” может являться реакцией на изменения в среде минералообразования в процессе метаморфизма (Попов, 2011). Ранее новообразования в виде “бугорков” были отмечены П.Я. Ярошем (1973) в сфалерите из деформированных руд колчеданного месторождения им. III Интернационала. Подобные микроскульптуры на гранях кристаллов пирита из руд Маукского месторождения являются результатом совершенствования их внутреннего строения и исчезновения зональности I рода в результате процессов диагенеза и метаморфизма (Ярош, 1973).

#### *Условия преобразования мелкообломочных руд*

Условия преобразования обломочных руд Маукского месторождения можно оценить по минеральным ассоциациям. Образование первых двух минеральных ассоциаций происходило в условиях диагенеза, ката- и метагенеза исходных кластогенных руд. В пользу этого факта свидетельствует присутствие в рудах частично перекристаллизованного пирита-II и пирита-III с признаками структуры исходного осадка, сохранившимися от диагенетической стадии. Вторичные структуры перекристаллизации (регенерационные, коррозионные, грануляционно-бластические) возникли в результате постепенного уплотнения осадка в интервале температур 25–350°C (Япаскерт, 2008).

Температурным репером процесса рудоотложения может служить присутствие в рудах продуктов распада твердого раствора с выделением кубанита ( $T < 200^\circ\text{C}$ ) (Мурзин и др., 2011). В

единственном случае установлена приуроченность зерен пирротина и макинавита к пластинам кубанита в халькопирите. Присутствие примеси никеля как в пирротине, так и в макинавите позволяет предполагать их совместное формирование в результате трансформации макинавита в гексагональный пирротин при температуре 250°C (Hornig, Roberts, 2006). С приведенными оценками температуры согласуется образование в халькопирите полосчатых руд, помимо вышеперечисленных никельсодержащих минералов, грейгита, устойчивого ниже 350–250°C (Roberts, 1995).

К пириту-III в полосчатых рудах Маукского месторождения приурочены зерна самородного золота, теллуrowисмутита и раклиджита; к магнетиту в брекчиевых рудах – селенистого теллуrowисмутита и галенита, гессита, штюцита. Поступление в раствор Au, Bi, Te, Au и Ag возможно из метаморфизованного пирита-II, халькопирита и сфалерита, способных накапливать эти элементы при диагенезе (Сафина, Масленников, 2009). Также существует предположение о возможности метаморфогенного анатексиса свинец-, теллур- и висмутсодержащих акцессорных минералов первичных руд, температуры плавления которых находятся в диапазоне 230–800°C (Tomkins, Pattison, 2007; Белогуб и др., 2010; Молошаг, 2011).

Формирование третьей минеральной ассоциации начиналось при высокой температуре. Присутствие в этой ассоциации кристаллов пирита-IV с многочисленными включениями магнетита и нерудных минералов, раннего высокосернистого гексагонального пирротина свидетельствует о начальных температурах минералообразования более 500°C (Справочник..., 1988), что соответствует альбит-эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма (Афанасьева и др., 2011). Очистка пирита-IV от примесей в условиях амфиболитовой фации метаморфизма также могла осуществляться при температуре 500°C (Молошаг, 2011). При понижении температуры минералообразования до 330°C происходил переход гексагонального пирротина в моноклинный (Гзогян, Чантурия, 2010). Результаты расчетов температур образования пирротиновых руд Маукского месторождения с помощью пирит-пирротинового кобальтового геотермометра соответствуют интервалу температур 330–400°C (Медноколчеданные..., 1992). В этой же работе условия формирования пирротина на метаморфизованных колчеданных месторождениях Урала оценены в интервале 330–520°C.

На Маукском месторождении сростки гексагонального и моноклинного пирротина с признаками деформации и рекристаллизации можно интерпретировать как результат регрессивного метаморфизма в условиях амфиболитовой фации, что было установлено для сульфидных руд норвежских метаморфизованных месторож-

дений (Cook *et al.*, 1993). Метаморфизм привел к перекристаллизации рудных минералов (образование метакристаллов пирита), замещению халькопиритом, а затем магнетитом ранее образованных сульфидов и формированию сростков нерудных минералов (авгит, энстантит, биотит) с магнетитом и пиритом. Деформации, сопровождающие формирование этой минеральной ассоциации, привели к трещинам в пиритовых агрегатах и дефектам во внутреннем строении кристаллов магнетита.

С третьей минеральной ассоциацией сопряжено отложение молибденита, уранинита с поздним магнетитом, халькопиритом, пирротином и нерудными минералами, что сближает изучаемый объект с рудами Пышминско-Ключевского месторождения. Так, по данным В.В. Мурзина и др. (2011), появление молибденита в медно-кобальтовых рудах Пышминско-Ключевского месторождения оценивается температурным интервалом 430–300°C. Формирование уранинита объясняется заимствованием урана из углисто-кремнистых сланцев при высоко- и среднетемпературных условиях (>300°C). Заканчивалось образование минералов третьей ассоциации при температурах менее 300°C, что можно оценить по присутствию в брекчиях гессита и штюцита, устойчивых при 265–295 и 145°C (Afifi *et al.*, 1988; Bortnikov *et al.*, 1988).

Результаты, полученные при определении индикаторных минералов и микроструктур в полосчатых рудах Маукского месторождения, свидетельствуют о том, что температура метаморфизма на месторождении превышала 500°C, а минеральные преобразования руд завершились в регрессивную стадию метаморфизма при температуре ниже 300°C.

Таким образом, проведенные исследования показали, что обломочные руды Маукского месторождения претерпели преобразования на стадиях литогенеза и метаморфизма. Однако, несмотря на значительные изменения текстурно-структурных и минералого-геохимических особенностей руд, они сохранили признаки первичного формирования, характерные для рудокластитов менее измененных колчеданных месторождений.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Ж.Ж. Оржеваля (BRGM, Франция, Орлеан) за содействие при выполнении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00691).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьева М.А., Бардина Н.Ю., Богатиков О.А. и др. Петрография и петрология магматических, метамор-

- фических и метасоматических горных пород. М.: Логос, 2001.
- Аюпова Н.Р., Целуйко А.С., Масленников В.В.* Минеральный состав слоистых сульфидных руд Юбилейного медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: IX Межрегиональная научно-практич. конф. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2012. С. 14–17.
- Белогуб Е.В., Щербакова Е.П., Новоселов К.А.* Кобальт на Летнем медно-колчеданном месторождении (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов—2004. Научное издание. Миасс: ИМин УрО РАН, 2004. Т.1. С. 268–273.
- Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Новоселов К.А., Котляров В.А.* Самородный висмут, цумоит и свинцовистый цумоит из Тарньерского медно-цинково-колчеданного месторождения (Северный Урал) // Зап. РМО. 2010. Ч. 139. Вып. 6. С. 82–93.
- Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н.* Текстуры и структуры руд. М.: Госгеолтехиздат, 1958.
- Богуш И.А., Бурцев А.А.* Онтогенетический атлас морфогенетических микроструктур колчеданных руд. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ, 2004.
- Викентьев И.В.* Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. М.: Научный мир, 2004.
- Гозян С.Р., Чантурия Е.Л.* Влияние термических воздействий на сульфиды и оксиды железа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. № 5. С. 63–69.
- Грабовский М.А., Жерденко О.Н.* Исследование рудных минералов методом магнитной порошкографии // Геология руд. месторождений. 1963. Т. 5. № 1. С. 99–104.
- Елисеев Н.А.* Метаморфизм. М.: Недра, 1963.
- Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Позднякова Н.В.* Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 2. С. 176–188.
- Зайков В.В., Масленников В.В.* О придонных сульфидных постройках на колчеданных месторождениях Урала // ДАН СССР. 1987. Т. 293. № 1. С. 181–184.
- Зайков В.В., Масленников В.В., Зайкова Е.В., Херрингтон Р.* Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеокеана. Миасс: ИМин УрО РАН, 2001.
- Злотник-Хоткевич А.Г.* Железистые и кремнисто-железистые осадки колчеданных месторождений // Кремнисто-железистые отложения колчеданосных районов. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. С. 42–52.
- Иванов С.Н.* Изучение зон роста зерен пирита в колчеданных месторождениях Урала // Зап. ВМО. 1950. № 2. С. 113–126.
- Контарь Е.С., Либарова Л.Е.* Металлогения меди, цинка и свинца на Урале. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997.
- Коротеев В.А., Сазонов В.Н.* Геодинамика, рудогенез, прогноз. Екатеринбург, 2005.
- Крейг Дж., Воган Д.* Рудная микроскопия и рудная петрография. М.: Мир, 1983.
- Масленников В.В.* Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс: Геотур, 1999.
- Масленников В.В.* Литогенез и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006.
- Масленников В.В.* Морфогенетические типы колчеданных залежей как отражение режимов вулканизма // Литосфера. 2012. № 5. С. 96–113.
- Масленникова С.П., Масленников В.В.* Сульфидные трубы палеозойских “черных курильщиков”. Екатеринбург—Миасс: УрО РАН, 2007.
- Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение / Прокин В.А., Буслаев Ф.П., Исмагилов М.И. и др. Свердловск: УрО РАН, 1988.
- Медноколчеданные месторождения. Условия формирования / Прокин В.А., Серавкин И.Б., Буслаев Ф.П., Масленников В.В., Зайков В.В. и др. Екатеринбург: УрО РАН, 1992.
- Мелекесцева И.Ю.* Гетерогенные кобальт-медноколчеданные месторождения в ультрамафитах палеоостроводужных структур. М.: Наука, 2007.
- Молошаг В.П., Грабежев А.И., Гуляева Т.Я.* Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфириновых месторождений Урала // Зап. ВМО. 2002. Ч. СXXXI. № 5. С. 40–54.
- Молошаг В.П., Грабежев А.И., Викентьев И.В., Гуляева Т.Я.* Фации рудообразования колчеданных месторождений и сульфидных руд медно-порфириновых месторождений Урала // Литосфера. 2004. № 2. С. 30–51.
- Молошаг В.П.* Теллуридная минерализация колчеданных месторождений Урала: новые данные // Литосфера. 2011. № 6. С. 91–102.
- Мурзин В.В., Варламов Д.А., Викентьев И.В.* Медно-кобальтовое оруденение Пышминско-Ключевского месторождения на Среднем Урале: минеральный состав руд и метасоматитов, стадийность, РТ-условия минералообразования // Литосфера. 2011. № 6. С. 103–122.
- Петров Г.В., Глушков А.Н., Зубков А.И., Огородников Г.Н.* Предварительные результаты прогнозно-поисковых работ на медь в пределах Западной площади // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа — ЮГРБ. Т. 1 : Одиннадцатая научно-практич. конф. Ханты-Мансийск, 2008. С. 427–434.
- Попов В.А.* Практическая генетическая минералогия. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.
- Пшеничный Г.Н.* Текстуры и структуры руд месторождений колчеданной формации Южного Урала. М.: Недра, 1984.
- Рамдор П.* Рудные минералы и их сростания. М.: Иностранная литература, 1962.
- Сафина Н.П., Масленников В.В.* Состав и продукты придонного преобразования обломочных сульфидных отложений в рудных залежах Яман-Касинского и Сафьяновского колчеданных месторождений (Урал) // Литосфера. 2007. № 2. С. 130–140.
- Сафина Н.П., Масленников В.В.* Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское (Урал). Миасс: УрО РАН, 2009.
- Скрипченко Н.С.* Гидротермально-осадочные сульфидные руды базальтоидных формаций. М.: Наука, 1972.
- Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете / Чвилёва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М. и др. Москва: Недра, 1988.

- Шадлун Т.Н.* Некоторые признаки метаморфизма в колчеданных рудах (месторождение им. III Интернационала) // Известия Академии наук СССР (серия геологическая). 1947. № 5. С. 139–145.
- Шадлун Т.Н., Викентьев И.В.* Новые данные о колчеданности Кабанского рудного поля (по материалам Уральской сверхглубокой скважины) // Зап. ВМО. 1992. № 2. С. 1–15.
- Шадлун Т.Н., Добровольская М.Г.* Текстуры и структуры руд как показатели процессов рудоотложения // Зап. ВМО. 1987. Ч. CXVI. Вып. 2. С. 151–161.
- Янаскурт О.В.* Стадиальный анализ осадочного процесса // Литосфера. 2008. № 4. С. 364–377.
- Ярош П.Я.* Диагенез и метаморфизм колчеданных руд на Урале. Москва: Наука, 1973.
- Ярош П.Я., Буслаев Ф.П.* Структуры руд и история формирования рудных агрегатов Узельгинского месторождения. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985.
- Afifi A.M., Kelly W.S., Essene E.J.* Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides. Termodinamical data and calculated equilibria // Econom. Geol. 1988. V. 83. P. 377–394.
- Bortnikov N.S., Kramer K., Genkin A.D. et al.* Paragenesis of gold and silver tellurides at the Florencia gold deposit, Cuba // Int. Geol. Rev. 1988. V. 30. P. 294–306.
- Cook N.J., Halls C., Boyle A.P.* Deformation and metamorphism of massive sulphides at Sulitjelma, Norway // Min. Magazine. 1993. V. 57. P. 67–82.
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Stanley J., Paar W., Sunblad K.* Compositional data for Bi-Sb-tellurosulfides // Canadian Mineralogist. 2007<sub>1</sub>. V. 45. P. 417–435.
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Wagner T., Stanley J.* Minerals of the system Bi-Te-Se-S related to the tetradyomite archetype: review of classification and compositional variation // Canadian Mineralogist. 2007<sub>2</sub>. V. 45. P. 665–708.
- Danyushevsky L.V., Robinson R., Gilbert S., Norman M., Large R., McGoldrick P., Shelley J.M.G.* Routine quantitative multielement analysis of sulfide minerals by laser ablation ICP-MS: standard development and consideration of matrix effects // Geochim Explor Environm Anal. 2011. V. 11. P. 51–60.
- Doyle M.G., Allen R.L.* Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits // Ore Geology Reviews. 2003. V. 23. P. 183–222.
- De Roo J.A., Van Staal C.R.* Sulfide remobilization and sulfide breccias in the Heath Steele and Brunswick deposits, Baturst Mining Camp, New Brunswick // Economic geology monograph: Massive sulfide deposits of the Baturst Mining Camp, New Brunswick and Northern Main / eds. Goodfellow W.D., VeCutcheon S.R. and Peter J.M. 2003. V. 11. P. 479–496.
- Hornig C.S., Roberts A.P.* Authigenic or detrital origin of pyrrhotite in sediments: Resolving a paleomagnetic conundrum // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 241. P. 750–762.
- Lianxing Gu, Vokes F.* Intergrowths of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in some sulphide ores from deposits Norway // Min. Magazine. 1996. V. 60. P. 303–316.
- Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Danyushevskiy L.V., Large R.R.* Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals // Ore Geology Reviews. 2012. V. 47. P. 5–41.
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // Mineralogy and Petrology, Special Issue: Ore deposits of the Urals. 2013. V. 107. P. 67–99.
- Melekestseva I. Yu., Zaykov V.V., Nimis P., Tretyakov G.A., Tesalina S.G.* Co-bearing massive sulfide deposits associated with ultramafic-mafic rocks of the Main Urals fault // Ore Geology reviews. 2013. V. 52. P. 18–36.
- Roberts A.P.* Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>) // Earth Planetary Science Letters. 1995. № 134. P. 227–231.
- Solomon M., Groves D.I.* The Geology and origin of Australian mineral deposits: monographs in Geology and Geophysics. Oxford University press. 1994. V. 24. 951 p.
- Tomkins A.G., Pattison D.R.M., Frost B.R.* On the Initiation of Metamorphic Sulfide Anatexis // J. Petrology. 2007. V. 48. № 3. P. 511–535.