

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет

549(07)
С217

Н.П. Сафина, К.А. Новоселов

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ РУД

Учебное пособие

*Допущено Учебно-методическим объединением
по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 020700 «Геология»*

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2013

УДК 549(075.8)
С217

38.35

Одобрено учебно-методической комиссией
геологического факультета филиала ЮУрГУ в г. Миассе

Рецензенты:

*М.П. Покровский, к.г.-м.н., старший научный сотрудник
Института геологии и геохимии УрО РАН,
доцент факультета геологии и геофизики УГГУ (г. Екатеринбург);
И.Ю. Мелекесцева, к.г.-м.н., ведущий научный сотрудник
Института минералогии УрО РАН (г. Миасс)*

Сафина, Н.П.

С217 Микроскопические методы в исследовании руд: учебное пособие /
Н.П. Сафина, К.А. Новоселов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ,
2013. – 168 с.

ISBN 978-5-696-04435-4

Пособие содержит сведения, необходимые для самостоятельного изучения руд при помощи методов рудной микроскопии. Приводятся рекомендации по изготовлению полированных образцов и препаратов для микроскопического изучения, основы кристаллоптики в контексте отражательной микроскопии, устройство микроскопа и способы определения важнейших свойств минералов, необходимые для их диагностики. Важная часть учебного пособия посвящена основам текстурно-структурного анализа руд и его применению для решения прикладных задач. В приложении приводятся характеристики основных рудных минералов.

Пособие соответствует рабочей программе по дисциплине «Минералогия» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 020700 (020300) – «Геология» и всем геологическим специальностям. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-526.2009.5) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК П237).

Ответственный редактор:

*Е.В. Белогуб, д.г.-м.н., главный научный сотрудник
Института минералогии УрО РАН (г. Миасс)*

УДК 549.(075.8)

ISBN 978-5-696-04435-4

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

1623996

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
Пермского государственного
национального исследовательского
университета

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Введение в кристаллооптику отраженного света	
1.1. Природа света.....	9
1.2. Электромагнитные волны. Естественный свет.....	9
1.3. Взаимодействие световых волн. Взаимодействие света с веществом.....	11
<i>Вопросы для самопроверки</i>	19
Глава 2. Устройство рудного микроскопа	21
2.1. Объективы и окуляры.....	21
2.2. Опак-иллюминатор и осветитель.....	26
2.3. Поляризатор. Анализатор.....	29
2.4. Дополнительные принадлежности к микроскопу.....	30
2.5. Модели микроскопов. Настройка освещения.....	30
<i>Вопросы для самопроверки</i>	32
Глава 3. Подготовка препаратов для минераграфических исследований	33
3.1. Изготовление полированных аншлифов и шашек.....	34
3.1.1. Предварительная подготовка.....	34
3.1.2. Шлифовка.....	35
3.1.3. Полировка.....	37
3.2. Изготовление двусторонне-полированных шлифов.....	39
3.3. Изготовление полированных шлифов из разобщенных зерен.....	39
<i>Вопросы для самопроверки</i>	39
Глава 4. Диагностические признаки минералов	40
4.1. Оптические признаки минералов.....	40
4.1.1. Цвет и отражательная способность.....	40
4.1.2. Двухотражение и плеохроизм отражения.....	47
4.1.3. Анизотропия.....	48
4.1.4. Внутренние рефлексy.....	49
4.2. Структурные и морфологические признаки минералов.....	50
4.2.1. Форма кристаллов.....	50
4.2.2. Спайность и отдельность.....	51
4.2.3. Двойникование.....	52
4.2.4. Зональность.....	53
4.2.5. Включения и срастания.....	54
4.3. Физические признаки минералов.....	54
4.3.1. Твердость.....	54
4.3.2. Электропроводность.....	60

4.3.3. Магнитность	62
4.4. Химические признаки минералов	63
4.4.1. Диагностическое травление	64
4.4.2. Световое травление	65
4.4.3. Методы химического анализа	66
4.5. Диагностика рудных минералов	68
<i>Вопросы для самопроверки</i>	72
Глава 5. Текстурно-структурный анализ руд	74
5.1. Текстуры руд	75
5.2. Структуры руд	79
5.3. Структурное травление рудных минералов	83
5.4. Методы и подходы изучения текстур и структур	92
<i>Вопросы для самопроверки</i>	94
Глава 6. Документация изображений	95
Глава 7. Количественный анализ изображений	99
7.1. Ручные измерения	
7.1.1. Измерения линейных размеров зерен под микро- скопом	100
7.1.2. Измерение количественных соотношений между минералами	101
7.2. Автоматизация измерений	105
<i>Вопросы для самопроверки</i>	110
Глава 8. Рудная микроскопия и переработка руд	111
<i>Вопросы для самопроверки</i>	118
Библиографический список	119
Приложения	
<i>Приложение 1.</i> Символы для обозначения основных рудо- и по- родообразующих минералов	124
<i>Приложение 2.</i> Основные свойства рудных минералов в аншлифах	125
<i>Приложение 3.</i> Пример описания рудных минералов (или руды) в аншлифе	148
<i>Приложение 4.</i> Рекомендации по составлению отчета о минера- графических исследованиях	150
<i>Приложение 5.</i> Оформление результатов минералогического ис- следования руд и продуктов их переработки для решения технологических задач	151
<i>Приложение 6.</i> Цветные иллюстрации	153

ВВЕДЕНИЕ

Минераграфия – раздел минералогии, изучающий состав руд в полированных шлифах с помощью: а) отраженного света (методы изучения отражательной способности и вращающих свойств); б) физических (определение микротвердости, магнитности и др.) и в) химических (микрохимические испытания, методы отпечатков, структурное травление) методов [Геологический..., 1978]. Термин минераграфия был введен У. Уайтхэдом в 1917 г.

Цель курса – способствование освоению методов минераграфии для описания минерального состава и строения руд и рудных минералов.

В **задачи курса** входит получение навыков: 1) работы с рудным микроскопом и освоение основных приемов изучения свойств минералов в отраженном свете; 2) изготовления препаратов для диагностики рудообразующих минералов; 3) структурного и диагностического травления полированных шлифов; 4) анализа изображений; 5) структурно-текстурного анализа руд. На основании полученных знаний студенты должны научиться отбирать образцы для минераграфических исследований, определять оптические и физические свойства рудных минералов и, руководствуясь соответствующими определителями, проводить их диагностику; анализировать текстурно-структурные особенности руд и их минеральный состав.

Для успешного изучения курса минераграфии студенты должны знать основы физики (природа света и линейная оптика), химии (качественные реакции), кристаллооптики, минералогии и петрографии.

Объектом минераграфии являются минералы, непрозрачные в проходящем свете – самородные металлы и интерметаллиды, сульфиды, теллуриды, селениды, оксиды металлов и некоторые другие соединения. Основным разделом минераграфических исследований является рудная микроскопия, вне зависимости от того, образуют изучаемые минералы промышленные скопления или являются акцессорными примесями в породе.

Первые упоминания, касающиеся минераграфических методов исследования, изложены в кратком историческом очерке проф. Ж. Орселя, опубликованном в фундаментальном труде Р. Галопена и Н. Генри «Исследование непрозрачных минералов под микроскопом» [1975]. Автор указал, что изготовление полированных шлифов из непрозрачных материалов для исследования их структуры впервые стал использовать И. Берцелиус в XIX в. Последующее развитие минераграфических исследований получили в работах К. Сорби, Ф. Осмонда, А. Ле-Шателье и др.

Современное направление в рудной микроскопии определилось в начале XX-го века после опубликования результатов работы У. Кэмпбелла и К.У. Найта, исследовавших под микроскопом полированные образцы руд из Кобальта (Онтарио) [1906]. Совершенствование оптических микроскопов в конце первой половины XX в. открыло большие перспективы для

изучения тонких сростаний различных минералов и их возрастных соотношений, способов сочетаний и т.п. К первым работам, в которых был систематически рассмотрен метод изучения рудных минералов под микроскопом, обобщены их диагностические признаки и приведены данные о сростаниях рудных минералов, следует отнести труды Дж. Мердоcha «Микроскопическое определение непрозрачных минералов» [Murdoch, 1916], В. Дэви и К. Фарнхама «Микроскопический анализ рудных минералов» [Davy, Farnham, 1920], Ван дер Веена «Минераграфия и рудоотложение» [Veen, 1925], и книгу Х. Шнейдерхена и П. Рамдора «Руководство по рудной микроскопии» [Schneiderhohn, Ramdohr, 1931]. Среди работ отечественных ученых этого периода следует отметить труды Ф.И. Абрамова «Микроскопические исследования руд в отраженном свете» [Абрамов, 1930], А.Г. Бетехтина и Л.В. Радугиной «Определение рудных минералов под микроскопом» [Бетехтин, Радугина, 1933] и И.С. Вольнского «Определение рудных минералов под микроскопом» [Вольнский, 1947].

В начальный период развития минераграфии основное внимание обращалось на физические и химические свойства минералов, форму рудных зерен, их размеры и особенности сростаний с целью получения объективной информации о минеральном составе руд. Несколько позднее в геологической печати появлялись работы по описанию не только состава, но и структур руд (И.Ф. Григорьев, Е.Е. Захаров, С.А. Вахромеев). В настоящее время результаты минераграфических исследований используются не только для диагностики рудных минералов и описания руд, но и для моделирования генезиса геологических объектов. Расшифровка генезиса (происхождения) минеральных индивидов и последовательности минералообразования в любых геологических объектах открывает перед исследователем широкие возможности использования полученных результатов [Чесноков, 1974; Попов, 1984; Краснова, Петров, 1997]. Для решения генетических вопросов все более широко применяется рудно-фациальный анализ строения рудных тел, методика которого детально разработана для колчеданных месторождений [Жабин, 1979; Рудницкий, 1988; Масленников, Зайков, 1998; Тесалина и др., 1998; Зайков и др., 2001; Масленников, Зайков, 2006].

Важную роль играют минераграфические исследования для разработки оптимальных схем обогащения и текущего контроля технологических процессов на обогатительных фабриках. Первым в России этот вопрос поставил К.И. Богданович [1912]. Он подчеркнул, что «изучение сложения рудной массы имеет значение не только фундаментальное, но и практическое – при обогащении руд и оценке месторождений». Например, он указывал, что руды, характеризующиеся значительной величиной составных частей, легко подвергаются ручной разборке. Тогда как руды, сложенные полосами, труднее измельчаются (из-за тонкозернистого строения), что увеличивает технические трудности и повышает стоимость работ.

Настоящее учебное пособие соответствует рабочей программе по дисциплине «Минераграфия» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 020700 (020300) – «Геология» и всем геологическим специальностям. Некоторые разделы способствуют более полному восприятию материала по курсам «Геология месторождений полезных ископаемых» и «Технологическая минералогия». При составлении пособия использованы отечественные и зарубежные источники, а также опыт авторов, приобретенный за годы исследовательской работы в Институте минералогии УрО РАН и преподавательской деятельности на геологическом факультете в ЮУрГУ (г. Миасс). Классические труды по минераграфии, на которые опирались авторы, перечислены в библиографическом указателе. Нужно отдельно упомянуть работы И. С. Вольнского «Определение рудных минералов под микроскопом» [1947], С.А. Вахромеева «Руководство по минераграфии» [1956], а также учебное пособие С.А. Юшко «Методы лабораторного исследования руд» [1966]. Эти актуальные по нынешний день труды уже давно не переиздавались и в некотором роде являются библиографической редкостью. Наиболее поздняя работа коллектива авторов «Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете» [1988] является, прежде всего, определителем, а не учебником. В ней приведено систематическое описание 505 рудных минералов, таблицы и графики для их определения. Особое внимание уделено редким и новым минералам. Помимо общих сведений для каждого минерала даны спектры отражения, двуотражение, параметры цвета, микротвердость, рентгенограмма, примеры месторождений.

Среди зарубежных источников, на наш взгляд, заслуживает внимания книга известных геологов-рудников Джеймса Р. Крейга (США) и Дэвида Дж. Вогана (Великобритания) «Рудная микроскопия и рудная петрография» [1983], которая обобщает современные данные по изучению рудных минералов под микроскопом, в частности, методику исследований, характеристику структур рудных агрегатов и минеральных ассоциаций руд различных генетических типов, таблицы важнейших свойств наиболее распространенных минералов, сведения, необходимые для технологии их разделения и получения мономинеральных фракций. В руководстве «Исследование непрозрачных минералов под микроскопом», написанном крупными специалистами Женевского и Кембриджского университетов Р. Галопеном и Н. Генри [1975], рассмотрены основные вопросы изучения рудных минералов под микроскопом, но основное внимание уделено количественным методам диагностики – измерению отражения и твердости минерального вещества. Большая часть книги посвящена теории оптики отраженного света – в этом ее большая ценность и отличие от других руководств по минераграфии. На этой основе рассмотрены оптические свойства непрозрачных минералов.

Теории и практике микроскопического изучения рудных минералов, руд и полученных при их обогащении концентратов посвящена книга

Ю. Кэмерона «Рудная микроскопия» [1966]. В первых главах дается описание современных микроскопов и методов подготовки руд и концентратов для микроскопического исследования. Затем детально описываются физические и оптические свойства рудных минералов, а также методы определения этих свойств под микроскопом. Основное внимание уделено количественным методам определения микротвердости, отражательной способности и анизотропии. Одна из глав посвящена теории отраженного света.

Собранная в предлагаемом учебном пособии информация поможет студентам разобраться в теоретических основах оптики отраженного света, технологии подготовки каменного материала к исследованиям, получить навыки работы с рудным микроскопом и освоить методики микроскопического исследования полированных шлифов.

Специфика данной работы заключается в том, что наряду с разделами по определению рудных минералов в полированных шлифах, в ней даны сведения об автоматизированных методах анализа изображений, позволяющих осуществлять классификацию рудных объектов по интересующим параметрам (содержание определенной фазы, морфологические особенности частиц и их геометрические характеристики). В цветной вкладке учебного пособия иллюстрируются основные текстуры и структуры руд.

В приложении 1 приводятся стандартные символы для обозначения основных рудных и породообразующих минералов, в приложениях 2, 3 и 4 приведены основные свойства рудных минералов, планы описания полированных шлифов, которые могут быть использованы при написании соответствующих разделов курсовых и дипломных работ, производственных или геологических отчетов. В приложении 5 – практические рекомендации по оформлению полученных данных в виде таблиц.

За консультационную помощь при создании этой работы авторы благодарят коллег по лаборатории минералогии рудогенеза (ИМин УрО РАН), а также доцента кафедры геологии рудных месторождений СПбГУ к.г.-м.н. Ю.С. Полеховского. Особую благодарность авторы адресуют доценту СПбГУ М.М. Болдыревой, любезно позволившей использовать накопленную ею базу данных по спектрам отражения минералов и программе MicroMin. Весьма продуктивными были консультации профессоров, докторов наук В.В. Зайкова, В.В. Масленникова, В.А. Попова, к.г.-м.н. В.И. Поповой. Авторы признательны д.г.-м.н. Е.В. Белогуб, к.г.-м.н. М.П. Покровскому и к.г.-м.н. И.Ю. Мелекесцевой, взявшим на себя труд по редактированию текста пособия и внесившим многочисленные предложения по его улучшению.

Пособие создано при финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-526.2009.5), Минобрнауки (ГК-П237).

Авторы будут признательны за все замечания и предложения, которые просят направлять по адресам safina@ilmeny.ac.ru, const@ilmeny.ac.ru.

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В КРИСТАЛЛООПТИКУ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

*Суша теория, мой друг,
а древо жизни вечно зеленеет.*
И.В. Гёте «Фауст»

1.1. Природа света

Свет является одной из форм электромагнитного излучения, которое испускает материя, находящаяся в возбужденном состоянии. Свет и другие формы электромагнитного излучения могут быть описаны и как волны, и как поток частиц (фотонов). *Фотоны* – кванты света, частицы, характеризующиеся определенной энергией и количеством движения. Корпускулярные свойства света проявляются в явлениях микромира на уровне атомов. Макромир, в том числе и оптические явления, используемые в рудной микроскопии, хорошо описываются волновой теорией света.

Гипотеза о волновой природе света была впервые высказана в «Трактате о свете» в 1690 г. датским физиком *Х. Гюйгенсом*, который предположил, что световая энергия переносится при посредстве гипотетического «светового эфира», а волны продольны по отношению к световому лучу. В соответствии с известным принципом Гюйгенса, каждая точка поверхности, которой достигла в данный момент волна, является точечным источником вторичных волн. Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени.

Исследователи начала XIX в. показали, что многие явления, наблюдаемые при прохождении луча через кристаллы, не объясняются теорией Гюйгенса. *А. Френель* и *Т. Юнг* сделали предположение, что световые волны поперечны. Также как и Гюйгенс, Френель полагал, что *световые колебания* – это движение частиц эфира. Гипотеза Френеля легла в основу кристаллооптики: световые волны подобны упругим волнам, средой для распространения которых является «световой эфир».

Позднее были установлены факты, вскрывшие связь между электромагнитным излучением и оптическими явлениями. Она объясняется электромагнитной теорией света шотландского ученого *Дж. К. Максвелла* (1865 г.): световые волны – это разновидность электромагнитных волн с очень высокими частотами, порядка 10^{15} Гц.

1.2. Электромагнитные волны. Естественный свет

Диапазон длин электромагнитных волн огромен: от более 10^{16} (радиоволны) до менее 10^{-5} нм (гамма-лучи) (рис. П.1, прил. 6). Электромагнитные волны с различными длинами и частотами фундаментально сходны в

том, что они распространяются в пространстве с одной скоростью, приблизительно 300000 км/сек.

В соответствии с электромагнитной теорией света изменение во времени электрической напряженности E сопровождается появлением переменного магнитного поля H , направленного перпендикулярно вектору E . Это переменное магнитное поле распространяется со скоростью света вдоль линии перпендикулярной плоскостям векторов E и H , образуя световые волны (рис. 1.1). Волна, возникающая при этом типе движения, имеет форму синусоидальной кривой и характеризуется следующими параметрами:

- *длина волны (λ)* – расстояние, на которое распространяется колебательное движение за один период. Длина волны определяет спектральный цвет света;

- *амплитуда (A)* – наибольшее расстояние, на которое отклоняется колеблющаяся точка от своего положения равновесия. Амплитуда прямо пропорциональна квадрату интенсивности света;

- *частота колебания (ν)* – число полных колебаний в секунду. Частота связана с периодом колебаний (T) обратным отношением;

- *скорость распространения колебательного движения (V)*, которая прямо пропорционально связана с длиной волны и частотой колебаний $V = \lambda \nu$.

- *фаза колебаний* – физическая величина, определяющая при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени. Измеряется в угловых единицах или долях периода колебаний. Например, точка y на рис. 1.1 имеет фазу 90° .

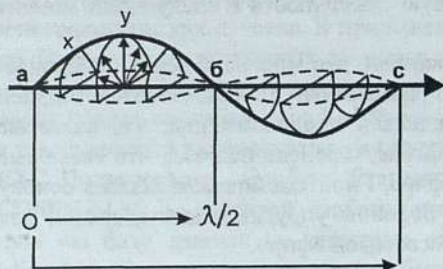


Рис. 1.1. Волновое движение неполяризованного (естественного) света. По [Крейг, Воган, 1983]:

a и b – точки, в которых колебания волны равны нулю, c – направление колебания волны, x и y – радиусы полуокружного сечения, равные колебанию волны в данной плоскости, o – точка начала распространения волны

Таким образом, имеются три взаимно перпендикулярных вектора E , H и V . Для естественного света (дневной свет или свет от обычных источников, к которым относится и лампочка светового микроскопа) вектора E и H , находясь в одной плоскости, перпендикулярной V , могут быть ориентированы произвольно, без каких-либо преимущественных направлений колебаний, т.е. присутствуют все возможные направления векторов E и H (см. рис. 1.1).

Человеческий глаз воспринимает лишь небольшую область электромагнитных волн примерно от 380 до 760 нм, в которой и ведутся оптические наблюдения. Исаак Ньютон вы-

делил 7 областей видимого света в зависимости от длины волны (см. рис. П.1, прил. 6): красный 760–620; оранжевый 620–585; желтый 585–560; зеленый 560–510; голубой 510–480; синий 480–450; фиолетовый 450–380 нм. Область невидимых ультрафиолетовых лучей находится в более коротковолновой части спектра (менее 380 нм), а инфракрасных – в более длинноволновой (более 780 нм).

Свет с определенной длиной волны называется *монохроматическим*. Белый свет представляет собой смесь световых волн с различной длиной. Если часть длин волн, входящих в состав белого света, усилена или ослаблена, свет будет казаться цветным. Цветной свет, как и белый, является сложным, состоящим из света различных длин волн.

1.3. Взаимодействие световых волн. Взаимодействие света с веществом

При взаимодействии световых волн между собой наблюдается явление *интерференции* света: эффект увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух или нескольких волн с одинаковыми периодами колебаний. Интерференция волн возможна только при выполнении условия когерентности (согласованности). *Когерентными* называют колебания с одинаковой частотой и постоянной во времени разностью фаз. Взаимное гашение волн наблюдается при интерференции волн с одинаковой амплитудой и частотой, но сдвигом по фазе колебаний 180° . Напротив, максимальная амплитуда наблюдается в случае интерференции когерентных волн с одинаковой фазой колебаний. Свойство интерференции используется в различных приложениях микроскопии.

Взаимодействие света с веществом сопровождается различными оптическими явлениями, такими как, преломление (рефракция) и двупреломление, поляризация, отражение, абсорбция (поглощение). Когда луч света, проходящий в воздушной среде, падает наклонно к поверхности прозрачного твердого тела, часть света отражается (отраженный луч), а другая часть проникает внутрь этого тела (рис. 1.2). Направление отраженного луча подчиняется закону отражения, согласно которому угол отражения равен углу падения; падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости. Луч, проникающий внутрь твердой среды, называется преломленным, так как его путь отклоняется от продолжения падающего луча. Угловые соотношения между падающим и преломленным лучами подчиняются закону преломления: для любого данного вещества характерен показатель преломления n , который можно определить как отношение синуса угла падения к синусу угла преломления:

$$n = \sin i / \sin r, \quad (1)$$

где i – угол падения, r – угол преломления.

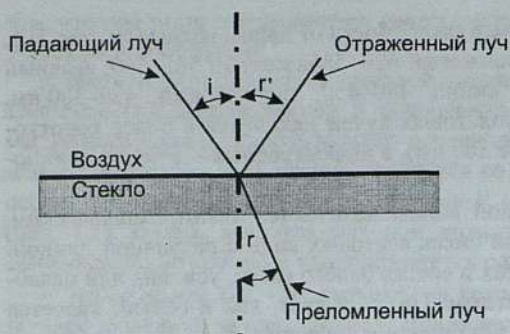


Рис. 1.2. Отражение и преломление светового луча на поверхности раздела двух сред. По [Берри и др., 1987]:

i – угол падения, r – угол преломления, r' – угол отражения

Позже было установлено, что показатель преломления можно представить как отношение скоростей распространения света в вакууме и в данном твердом теле:

$$n = c/c_m, \quad (2)$$

где n – показатель преломления, c и c_m – скорости света в вакууме и среде. Так как c_m всегда меньше c , то $n > 1$ (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Показатели преломления различных веществ
(при стандартных условиях)
(по [<http://refractiveindex.info/>])

Вещество	Показатель преломления
Воздух	1,0003
Вода	1,33
Глицерин	1,47
Иммерсионное масло	1,515
Стекло	1,52
Циркон	1,92
Алмаз	2,42

Характер взаимодействия света с прозрачным веществом зависит от кристаллической структуры последнего. Вещества, через которые свет проходит с одинаковой скоростью независимо от кристаллографического направления, называются оптически *изотропными*. К ним относятся кристаллы кубической сингонии и многие некристаллические вещества. Кристаллы средних и низших сингоний оптически *анизотропны*, и лучи света проходят сквозь них с различными скоростями в зависимости от кристаллографической ориентировки по отношению к свету.

Луч света, проникающий в кристаллическое твердое тело, расщепляется на два луча с взаимно перпендикулярными направлениями световых колебаний. В анизотропных кристаллах, в отличие от изотропных кристаллических и аморфных сред, эти лучи распространяются с различными ско-

ростями в зависимости от кристаллографического направления, т.е. показатели преломления для них различны. При этом скорость распространения одного из лучей (он называется «обыкновенным») не зависит от направления, а второго — зависит, и он называется «необыкновенным». Разность показателей преломления называется величиной двупреломления.

Зависимость показателя преломления от кристаллографического направления геометрически описывается оптической индикатрисой (от франц. *indicatrice*, буквально «указывающая»): воображаемой поверхностью, выражающей оптические свойства кристаллических веществ. Индикатриса — это «волновая поверхность», или поверхность, которую достигает световая волна равной фазы, поступившая от точечного источника в центре кристалла в единый момент времени.

Каждый радиус-вектор оптической индикатрисы геометрически пропорционален показателю преломления волны, колебания которой совершаются в направлении этого радиус-вектора [Татарский, 1965]. Каждое сечение индикатрисы, за исключением частных случаев круговых сечений, имеет форму эллипса. Оси этого эллипса по своей величине и направлению отвечают показателям преломления и направлениям колебаний «необыкновенных» волн, распространяющихся перпендикулярно данному сечению индикатрисы.

Оптическая индикатриса в кристаллах кубической сингонии имеет форму шара (рис. 1.3а), так как показатели преломления в этом случае одинаковы во всех направлениях.

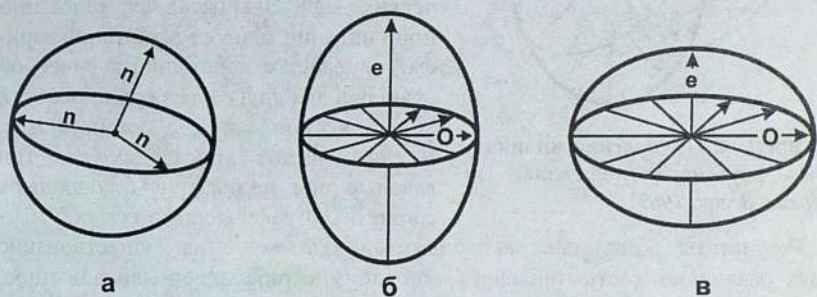


Рис. 1.3. Оптическая индикатриса изотропного вещества (а), одноосного положительного (б) и отрицательного (в) кристаллов. По [Крейг, Воган, 1983]

В кристаллах средних сингоний индикатриса имеет форму эллипсоида вращения, в котором имеется одна главная ось (ось вращения). Эта ось совпадает с кристаллографической осью c и является оптической или главной осью. Величина показателя преломления для колебания вдоль оптической оси отвечает необыкновенному лучу, максимально отличающемуся от

величины преломления обыкновенного луча, и обозначается как e . Сечения, перпендикулярные главной оси, являются круговыми. Величина показателя преломления в круговом сечении эллипсоида отвечает колебаниям обыкновенной волны (o) и может иметь или максимальное, или минимальное значения. При этом эллипсоид (индикатриса) будет или вытянутым, или уплощенным. Вещества, у которых индикатриса вытянута ($N_e - N_o > 0$), называются одноосными положительными. В случае уплощенной индикатрисы ($N_e - N_o < 0$), кристалл является одноосным отрицательным (см. рис. 1.36, в).

В кристаллах ромбической, моноклинной и триклинной сингоний индикатриса менее симметрична и имеет форму трехосного эллипсоида (рис. 1.4). Осями симметрии являются главные оси эллипсоида. Меньшая из них обозначается как N_p , средняя по величине N_m и наибольшая N_g (см. рис. 1.4). Одно из свойств такого эллипсоида заключается в том, что в нем можно провести два круговых сечения, а все остальные сечения являются эллиптическими. Оси, перпендикулярные круговым сечениям, являются оптическими осями. Соответственно кристаллы низших сингоний являются оптически двuosными.

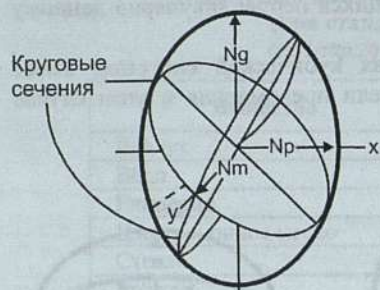


Рис. 1.4. Оптическая индикатриса двuosного кристалла. По [Крейг, Воган, 1983]

Ориентировка оптической индикатрисы в кристаллах низших сингоний определяется их симметрией. В триклинных кристаллах положение главных осей индикатрисы никак не связано с направлениями кристаллографических осей. В кристаллах моноклинной сингонии одна из осей индикатрисы совпадает с кристаллографической осью b , а две другие лежат в плоскости ac , но не совпадают с осями a и c . В ромбических кристаллах все три главные оси индикатрисы совпадают с кристаллографическими осями.

Результаты различных экспериментов указывают на существование двух различных состояний света – поляризованное и неполяризованное. Поляризованный свет описывается векторами E и H , величина и направление которых в данной точке пространства меняется закономерно во времени. В практике микроскопии используется линейно-, эллиптически- и циркулярнополяризованный свет.

У линейно- или плоскополяризованного света колебания вектора электрической напряженности происходят в одной плоскости, которая называется плоскостью колебаний (рис. 1.5). В микроскопе линейнополяризованный свет получается при прохождении обыкновенного света через поляризующие устройства (призму Николя или поляроиды) (см. главу 2).

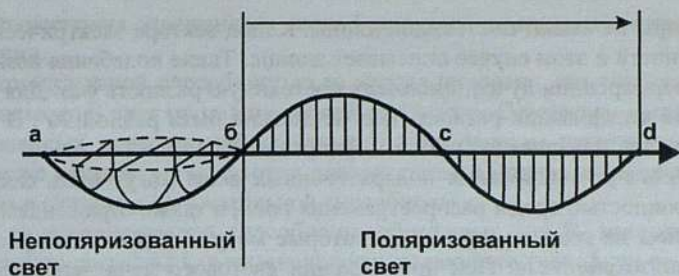


Рис. 1.5. Волновое движение линейно-поляризованного света.
По [Крейг, Воган, 1983]

При циркулярной поляризации (рис. 1.6а) конец вектора электрической напряженности описывает окружность в проекции на плоскость нормальную к направлению распространения волны. В зависимости от направления вращения такая поляризация может быть правой или левой. Эллиптическая поляризация (рис. 1.6б) является более общим случаем циркулярной,

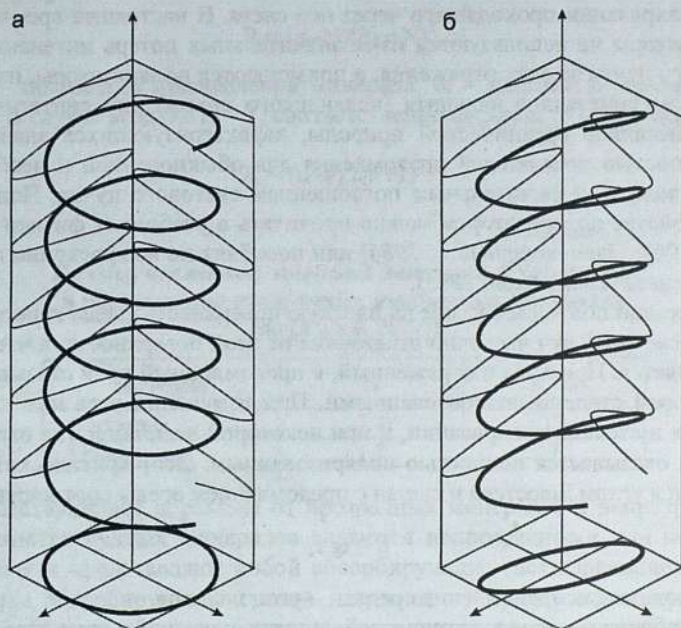


Рис. 1.6. Схематические примеры циркулярной (а), эллиптической (б) поляризации.

По [<http://ru.wikipedia.org/wiki/>]

но векторы не имеют постоянной длины. Конец вектора электрической напряженности в этом случае описывает эллипс. Такие колебания возникают при интерференции лучей, имеющих постоянную разность фаз. Для эллиптической поляризации разность фаз не должна быть равной 90° . В случае циркулярной поляризации разность фаз равна 90° .

Причины возникновения поляризованных волн могут быть связаны с анизотропностью среды распространения волн, а также отражением и преломлением на границе двух сред, которые могут быть как изотропными, так и анизотропными. При прохождении светового луча через кристалл происходит его расщепление на два луча, поляризованных во взаимноперпендикулярных плоскостях, но в анизотропных кристаллах средних и низших сингоний величина светового вектора для обыкновенной и необыкновенной волн будет различаться, иногда очень значительно, что позволяет их использовать для изготовления специальных приборов — поляризаторов. При этом достигается полное гашение одного из лучей, т.е. достигается плоская поляризация света. Способность любой среды частично поляризовать свет использовалась в конструкции стеклянных поляризаторов в виде набора пластинок, каждая из которых последовательно увеличивала степень поляризации проходящего через нее света. В настоящее время такие поляризаторы не используются из-за значительных потерь интенсивности светового пучка за счет отражения, а применяются поляризаторы, изготовленные из кристаллов кальцита (исландского шпата) или синтетических квазикристаллов органической природы, характеризующихся значительной разностью показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волн и незначительным поглощением светового пучка. Подробно об устройстве поляризаторов можно прочитать в учебниках физики [Думчберн, 1965; Элементарный..., 1986] или пособиях по микроскопии проходящего света [Татарский, 1965].

Падающий под косым углом на плоскую поверхность среды неполяризованный световой луч частично отражается от этой поверхности, а частично преломляется. При этом и отраженный, и преломленный лучи оказываются в некоторой степени поляризованными. При изменении угла падения изменяется и степень поляризации, и при некоторой величине угла отраженный луч оказывается полностью поляризованным. Этот критический угол называется углом Брюстера и связан с преломлением среды соотношением:

$$n = \operatorname{tg} i, \quad (3)$$

где n — показатель преломления среды, i — угол падения.

Колебания вектора электрической напряженности при этом параллельны отражающей поверхности и перпендикулярны плоскости падения (плоскость, в которой лежат падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча).

Микроскопия отраженного света базируется на явлениях отражения и абсорбции.

Отражательной способностью минерала называют его свойство отражать падающий свет от полированной плоскости. Отражение света от неполированных поверхностей осложняется диффузным рассеянием света. Отражение света от естественных поверхностей в минералогии называется блеском и связано с отражательной способностью.

Если отражательную способность обозначить как R , интенсивность отраженного света как I_r , а интенсивность падающего света I_i , то численное значение отражательной способности (иногда употребляется термин коэффициент отражения) можно выразить следующим образом:

$$R = I_r/I_i. \quad (4)$$

Отражательная способность связана со способностью минерала к преломлению и поглощению света. Для случая вертикального падения света на полированную поверхность прозрачного кристалла, у которого можно пренебречь поглощением, отражательная способность может быть выражена формулой:

$$R = (n-N)^2/(n+N)^2, \quad (5)$$

где n – показатель преломления минерала, N – показатель преломления среды. В случае воздуха $N \sim 1$, соответственно формула [5] принимает вид

$$R = (n-1)^2/(n+1)^2. \quad (6)$$

Таблица 1.2

Пример численных значений показателей отражения и преломления прозрачных изотропных минералов
(по [Юшко, 1971])

Минерал	N	R , %
Сфалерит	2.4	17
Гранат	1.7	7

Существуют все переходы от прозрачных минералов к непрозрачным. Большинство рудных минералов являются непрозрачными или полупрозрачными и представляют собой абсорбирующие (поглощающие) среды. В оптике абсорбирующей средой называют среду, поглощающую свет. Абсорбция света обусловлена тем, что при прохождении света через вещество под воздействием электромагнитного поля волны возникают колебания электронов этого вещества, что сопровождается потерей энергии волны. Изучение абсорбирующих минералов возможно только в отраженном

свете. Их отражательная способность зависит не только от показателя преломления, но и от показателя поглощения и может быть выражена формулой Френеля:

$$R = [(n-N)^2 + k^2] / [(n+N)^2 + k^2], \quad (7)$$

где n – показатель преломления вещества, N – показатель преломления среды, k – коэффициент абсорбции вещества, R – отражение. Для воздуха $N \sim 1$, и формула Френеля приобретает вид:

$$R = [(n-1)^2 + k^2] / [(n+1)^2 + k^2] \quad (8)$$

В непрозрачных кристаллах колебания оптических свойств зависят не только от показателя преломления, но и от коэффициента абсорбции. Эти колебания сложно представить геометрически, и в этом случае действует математическое понятие «комплексной индикатрисы».

Для изотропного кристалла комплексная индикатриса также будет характеризоваться сферической формой. Непрозрачные изотропные минералы будут иметь одно значение отражения при любой кристаллографической ориентировке. Как и прозрачные вещества, все кубические кристаллы и круговые сечения кристаллов средних сингоний изотропны. Падающий пучок плоскополяризованного света не изменяет своей поляризации при падении на плоскую полированную поверхность изотропного кристалла.

Так же как и прозрачные, кристаллические непрозрачные вещества средних сингоний оптически одноосны. Однако комплексная индикатриса отличается по форме от правильного эллипсоида и более сложна математически. Фигура комплексной индикатрисы (рис. 1.7) имеет одно круговое сечение с оптической осью, нормальной к нему. Направление колебаний, параллельное этой оси, называется направлением необыкновенного колебания, а направление колебаний в плоскости кругового сечения – направлением обыкновенного колебания. Значения отражений для этих направлений будут соответственно обозначаться R_e и R_o . Если $R_e > R_o$, кристалл называется одноосным положительным. Для одноосных отрицательных кристаллов R_e меньше R_o . Это знаки двуотражения кристаллов. Разность $(R_e - R_o)$ служит мерой двуотражения минерала.

Когда плоскополяризованный свет отражается при нормальном падении от небазального сечения непрозрачного одноосного минерала, световой пучок распадается на два взаимно перпендикулярных линейно-поляризованных пучка с различающимися показателями отражения. При тех двух положениях полированной поверхности кристалла, когда направления поляризации падающего света совпадают с направлениями поляризации отраженных лучей, состояние поляризации не меняется. В остальных случаях компоненты обоих колебаний будут складываться.

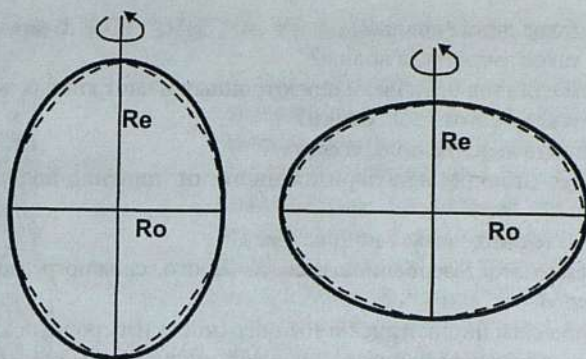


Рис. 1.7. Примеры индикатрис. Слева – комплексная индикатриса для одноосного положительного кристалла; справа – для одноосного отрицательного кристалла. Пунктирные линии показывают контур правильного эллипса, построенного на тех же осях. По [Крейг, Воган, 1983]

Непрозрачные кристаллические вещества низших сингоний двуосны. Однако различия между индикатрисой прозрачных веществ и поверхностями показателей непрозрачных значительны, так как у последних «оси» поверхности показателя преломления n не совпадают с «осями» поверхности показателя абсорбции k . Поэтому отсутствуют сечения, аналогичные круговым сечениям в прозрачных двуосных кристаллах.

Особенностью непрозрачных веществ является неравномерное отражение света разной длины волны, которое носит название *дисперсии отражения*. При наблюдениях в отраженном белом свете эта особенность может фиксироваться качественно человеческим глазом как цвет или цветной оттенок. Количественная оценка дисперсии отражения осуществляется с помощью микроспектрофотометров, о чем будет сказано в главе 4. Отражение совершенно белого вещества не будет характеризоваться какими-либо цветными эффектами. Вещества с синим оттенком в отраженном свете, более интенсивно отражают волны в синей области спектра, а красные – в красной области спектра.

Как и другие оптические свойства веществ некубической сингонии, дисперсия отражения связана с ориентировкой кристалла по отношению к пучку белого света. Свойство изменения цвета минерала в отраженном свете в зависимости от кристаллографической ориентировки называется *плеохроизмом*.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите различные гипотезы природы света
2. В чем заключается электромагнитная природа света?

3. Что такое длина волны?
4. Что такое амплитуда волны?
5. В чем отличия оптически анизотропных и изотропных веществ?
6. Что такое частота колебаний?
7. Опишите явление поляризации.
8. В чем отличие неполяризованного от линейно-поляризованного света?
9. Что такое оптическая индикатриса?
10. В чем состоят особенности света белого, сложного, монохроматического?
11. Оптическая индикатриса и R-поверхность изотропных кристаллов.
12. В чем состоит различие оптической индикатрисы одноосных и двуосных кристаллов?

Глава 2. УСТРОЙСТВО РУДНОГО МИКРОСКОПА

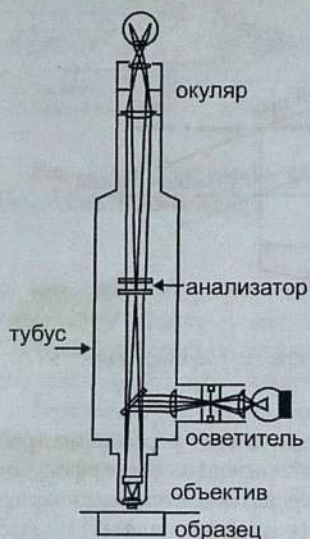


Рис. 2.1. Схематическое строение рудного микроскопа в разрезе. По [Крейг, Воган, 1983]

тот называется *пространством объекта*, а пространство между объективом и окуляром – *пространством изображения*.

- Точки, в которых оптическая ось проходит через поверхность линзы, называются *вершинами линзы*.

- *Фокус* в пространстве изображения – это точка оптической оси, в которой сходятся лучи, падающие на линзу параллельно ее оптической оси. Лучи, исходящие из фокуса в пространстве объекта, выходят из линзы параллельно оси.

- *Фокальные плоскости* – плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической оси.

- *Главные плоскости объекта* – плоскости, расположенные перпендикулярно оптической оси, для которых увеличение равно единице. Линейный объект в этом случае равен по величине своему изображению и одинаково с ним направлен относительно оптической оси.

- Точки, в которых оптическая ось проходит через главные плоскости, называются *главными точками*.

- Расстояние между фокусами и главными точками называется *фокусным* в пространстве объекта и изображения.

Рудный микроскоп рассчитан на исследование непрозрачных объектов – полированных шлифов руд, освещаемых сверху (со стороны объектива). Он сходен с петрографическим по системе линз, наличию поляризатора и анализатора и различных диафрагм, но изображение объекта создается лучами, отраженными от полированной поверхности аншлифа (рис. 2.1). Поэтому минералогические исследования называются исследованиями в отраженном свете.

2.1. Объективы и окуляры

Микроскоп является оптическим устройством и состоит преимущественно из линз, сосредоточенных в объективах и окулярах. Для понимания работы микроскопа используют следующие термины и понятия (рис. 2.2):

- Линия, соединяющая центры кривизны поверхностей линз объектива и окуляра, называется *оптической осью*.

- Пространство между линзой и объек-

том называется *пространством объекта*, а пространство между объективом и окуляром – *пространством изображения*.

- Точки, в которых оптическая ось проходит через поверхность линзы, называются *вершинами линзы*.

- *Фокус* в пространстве изображения – это точка оптической оси, в которой сходятся лучи, падающие на линзу параллельно ее оптической оси. Лучи, исходящие из фокуса в пространстве объекта, выходят из линзы параллельно оси.

- *Фокальные плоскости* – плоскости, проходящие через фокусы перпендикулярно оптической оси.

- *Главные плоскости объекта* – плоскости, расположенные перпендикулярно оптической оси, для которых увеличение равно единице. Линейный объект в этом случае равен по величине своему изображению и одинаково с ним направлен относительно оптической оси.

- Точки, в которых оптическая ось проходит через главные плоскости, называются *главными точками*.

- Расстояние между фокусами и главными точками называется *фокусным* в пространстве объекта и изображения.

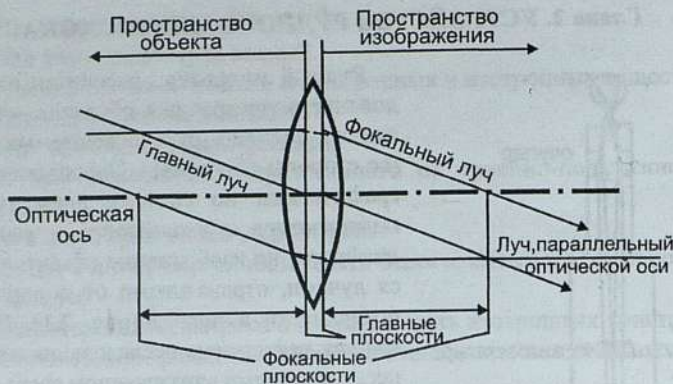


Рис. 2.2. Схема хода лучей в собирающих линзах. По [Бергнер и др., 1977]

Объектив микроскопа формирует на определенном расстоянии (расчетная оптическая длина тубуса для данного объектива) за своим фокусом *действительное изображение объекта*, которое наблюдается через окуляр микроскопа, как через лупу. При правильной фокусировке для наблюдателя *действительное промежуточное изображение*, полученное с помощью объектива, находится в фокальной плоскости окуляра, и поэтому наблюдаемое изображение находится как бы в бесконечности. Большинство объективов дают первичное изображение в несколько искривленной плоскости, т.е. возникают ошибки или *абберации* в передаче изображения.

Сферическая абберация вызвана различием в ходе лучей в центральной и краевых частях линзы (рис. 2.3). Если на простую собирающую линзу падает широкий пучок лучей, параллельных оси, то лучи, проходящие через различные concentрические зоны линзы, будут пересекать ось в различных точках. Чем дальше от оси находится данная зона линзы, тем короче фокусное расстояние этой зоны. Каждая зона образует свой особый фокус. В результате изображение растягивается вдоль оси и на периферии поля зрения окружено нерезкой каймой. Эта ошибка изображения обусловлена формой линзы.

Хроматическая абберация возникает вследствие того, что лучи света разной длины волны (цвет) преломляются линзой по-разному. В результате, лучи различных длин волн в пространстве изображения имеют различные точки фокуса (рис. 2.4).

Хроматическая разница масштабов отображения возникает тогда, когда фокусы для лучей различных цветов не совпадают, а главные точки совпадают. Поэтому фокусные расстояния и масштабы отображения для лучей отдельных цветов при определенном фокусном расстоянии различны.

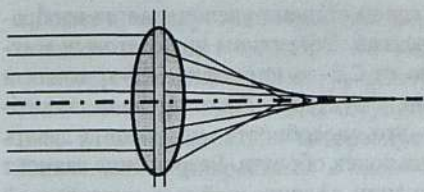


Рис. 2.3. Сферическая aberrация. По [Бергнер и др., 1977]

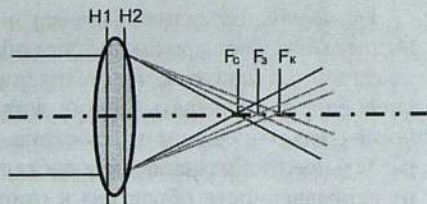


Рис. 2.4. Хроматическая aberrация. По [Бергнер и др., 1977]

Сферическая и хроматическая aberrации, присущие многим объективам, уменьшаются путем сочетания нескольких линз из разного стекла. По степени исправленности aberrаций объективы различаются на ахроматы, апохроматы, монохроматы, планобъективы.

Ахроматы (от греческого «*achromatos*» – бесцветный) состоят из системы линз подобранных таким образом, чтобы устранить хроматическую aberrацию. В этом типе объективов фокальные точки для красного и голубого цветов совпадают, при этом сферическая aberrация устранена только для средней желто-зеленой части спектра, и полученное изображение несколько размыто в периферической части.

В *апохроматах* устранены хроматические aberrации для трех цветов (красного, зеленого и синего) спектра, а сферические – для двух цветов (синий и зеленый). Остаточные искажения практически незначительны, так что у апохроматических объективов коррекция распространяется на всю видимую область спектра. Поскольку апохроматы обладают хроматической разностью увеличения, их следует применять в сочетании с соответствующими проекционными системами, компенсирующими этот дефект (компенсационные окуляры или компенсационные проекционные объективы). Апохроматы тоже искривляют поле зрения.

Монохроматы представляют собой объективы микроскопов, в которых aberrации устранены для одной длины волны или очень узкой области спектра. В первую очередь, у них исправляется сферическая aberrация. Монохроматы используются только в специальных случаях.

Ошибка поля зрения устранена у *планобъективов*. Обычно они скорректированы для полей зрения (средний диаметр изображения) диаметром 20–28 мм. Планобъективы выпускаются как с ахроматической, так и с апохроматической коррекцией. В них сохраняется хроматическая разность увеличения, поэтому их следует применять с компенсационным окуляром. Целесообразно сочетание планобъективов со специально для них рассчитанными планоокулярами (окуляры большого поля или широкоугольные окуляры), с помощью которых расширяется световое поле объектива.

Увеличение объектива означает, в какой степени увеличивается изображение, когда свет проходит через объектив. Объективы для световых микроскопов различаются по увеличению от 2,5 до примерно 125-кратных и способности разрешать тонкие детали структуры. *Разрешающая способность* или разрешение микроскопа – это способность микроскопа давать раздельное изображение двух соседних точек объекта. Разрешение зависит от исправленности объектива в отношении сферической и хроматической аберраций и, главным образом, от *апертуры* (от латинского «*apertura*» – отверстие оптического прибора). В оптике апертура определяется размерами линз или диафрагмами. Угловая апертура – угол между крайними лучами конического светового пучка, входящего в систему (рис. 2.5). Числовая или нумерическая апертура определяет глубину фокуса и полезную степень увеличения. Математически числовая апертура (A) лежит в пределах от 0,04 до 1,3 и равна:

$$A = n \times \sin \alpha, \quad (9)$$

где n – показатель преломления среды, в которую погружен объектив, α – угол, равный половине угловой апертуры данной линзы. Величина апертуры выравнена на оправе объектива. Числовая апертура апохроматов выше, чем ахроматов. Предельным значением для сухих объективов является 0,95, а для иммерсионных ($n = 1,5$) увеличивается до 1,4.

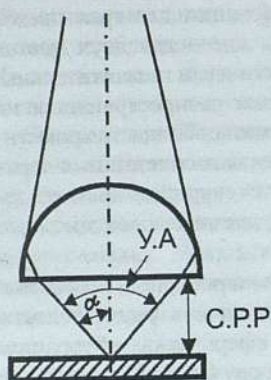


Рис. 2.5. Апертура объектива. По [Крейг, Воган, 1983]:

U.A. – угловая апертура, C.P.P. – свободное рабочее расстояние

Применяемые для минераграфических исследований объективы низких и средних увеличений относятся, как правило, к *сухим* или *воздушным* системам, которые рассчитаны на наличие между объективом и образцом воздуха. *Иммерсионные* объективы часто используются при больших увеличениях и необходимости высокого разрешения. В этом случае между образцом и объективом помещают каплю иммерсионного масла. Присутствие иммерсионной среды уменьшает отражение минерала, но повышает различие в цвете, снижает диффузное рассеяние света и обычно позволяет наблюдать слабые эффекты анизотропии и двуотражения, которые не видны с сухими объективами.

Для исследований в отраженном свете применяются объективы, отличающиеся от объективов для проходящего света. Выпускаемые сегодня объективы относятся к серии, так называемой ICS-оптики (Infinity Color-corrected System). Эти объективы проецируют изображение на «бесконечность», и лишь тубусная линза

создает промежуточное изображение. Световые лучи в такой «бесконечной оптике» проходят параллельно между объективом и тубусной линзой. Фильтры и рефлекторы могут использоваться без дополнительных оптических элементов. Объективы и тубусные линзы создают совместно в конечном итоге полностью скоррегированное промежуточное изображение. Классические микроскопы с «конечной оптикой» требуют значительного улучшения окуляров.

Вся необходимая информация об объективе гравировается на его оправе. Обычно указываются следующие параметры:

- увеличение и числовая апертура. Например, объектив $40\times/0,65$ имеет увеличение 40 крат и числовую апертуру 0,65;
- дополнительная буквенная маркировка, если объектив используется при различных методах исследования и контрастирования. Например, иммерсионные объективы могут маркироваться как Oil или MI;
- маркировка типа оптической коррекции. Например, апохромат – Аро, планахромат – PL или Plan, планапохромат – Plan-Apo;
- для объективов, сконструированных для «классической» конечной оптики, пишется оптическая длина тубуса, а ICS-оптика маркируется символом бесконечности; маркировка объективов, скоррегированных на покровное стекло, содержит индекс 0,17 (толщина покровного стекла), а без коррекции – символ 0. Например, надпись $\infty/0$ обозначает, что оптика «бесконечная», и коррекция на покровное стекло не введена (т.е. объектив предназначен для наблюдений в отраженном свете).

В комплект микроскопа входят **окуляры** (рис. П.2, прил. 6), предназначенные для передачи созданного объективом действительного изображения в глаз наблюдателя или для проектирования промежуточного изображения на плоскость изображения фотокамеры или проекционный экран. По своему функциональному назначению окуляры разделяются на *обычные* (окуляр Гюйгенса) и *специальные*.

Обычные окуляры по системе Гюйгенса предназначены для работы со слабыми и средними ахроматами. Они состоят из двух линз – нижней (коллектора) и верхней (глазной), между которыми расположена диафрагма. Глазная линза сфокусирована на кромку диафрагмы, поэтому улавливаемое глазом мнимое изображение оказывается резко ограниченным изображением диафрагмы. Таким образом, определяется *величина объективного поля зрения микроскопа*. Окуляры Гюйгенса обычно в плоскости диафрагмы снабжаются крестом нитей. На этом месте можно также установить и вспомогательные средства, например, индексы, координатные сетки и окулярные масштабные пластинки.

Специальные окуляры (компенсационные, планокуляры, кварцевые окуляры) обладают особыми оптическими свойствами, необходимыми для конкретных случаев. Компенсационные окуляры предназначены для работы с апохроматами, но их можно применять и с ахроматами, преимущест-

венно с теми, чья численная апертура больше 0.65. Такие окуляры компенсируют хроматическую разность увеличений.

Даже самые совершенные объективы и окуляры Гюйгенса дают сферическую абберацию. Для ее устранения создан ортоскопический (планатический или перипланатический) окуляр, который используется в основном в микрофотографии.

Микрометрический окуляр, снабженный линейкой, предназначен для измерения в шлифе размеров зерен.

Увеличение микроскопа определяет во сколько раз полученное изображение больше реального объекта, вычисляется умножением увеличения объектива на увеличение окуляра. Увеличение при проецировании зависит от расстояния между окуляром и экраном. Увеличение микроскопа определяется (*правило Аббе*) разрешающей способностью объектива, т.е. его апертурой, и должно находиться в пределах от 500 до 1000 А (апертура). Более слабые увеличения не позволяют выявить все детали, а большие бесполезны, т.к. никаких новых подробностей структуры не выявляют. Однако иногда такие увеличения применяют в микрофотографировании.

2.2. Опак-иллюминатор и осветитель

Основной деталью, отличающей рудный микроскоп от петрографического, является *опак-иллюминатор* (рефлектор) (рис. 2.6). Учитывая равенство угла падения и угла отражения, можно сказать, что источник освещения объекта должен находиться над препаратом. Опак-иллюминатор устанавливается между нижним торцом тубуса и объективом, именно с его помощью свету придается вертикальное направление, и он падает на полированную поверхность образца. Существует два типа opak-иллюминаторов: *призматический* и *пластинковый*. Призматический opak-иллюминатор представляет собой призму полного внутреннего отражения (рис. 2.6а). Потери падающего света в этом случае отсутствуют. Но апертура используется только наполовину, в результате чего происходит снижение четкости изображения. Пластинковый opak-иллюминатор представляет собой тонкое стекло, ориентированное под углом 45° к оси микроскопа (рис. 2.6б). Падающий на стекло свет частично отражается, частично пропускается и поглощается тубусом. На обратном пути опять часть лучей отражается, а часть уходит к окуляру. Для пластинкового opak-иллюминатора свойственно ослабление света, но рабочее отверстие объектива полностью открыто, и апертура используется полностью.

В рудном микроскопе типа ПОЛАМ Р-312, в opak-иллюминаторе установлена как стеклянная призма, так и полупрозрачная пластинка. Призматический opak-иллюминатор применяется при исследовании низкоотражающих минералов, в случае, когда необходимо яркое изображение объекта. Резкость изображения при работе с opak-иллюминатором, имеющим

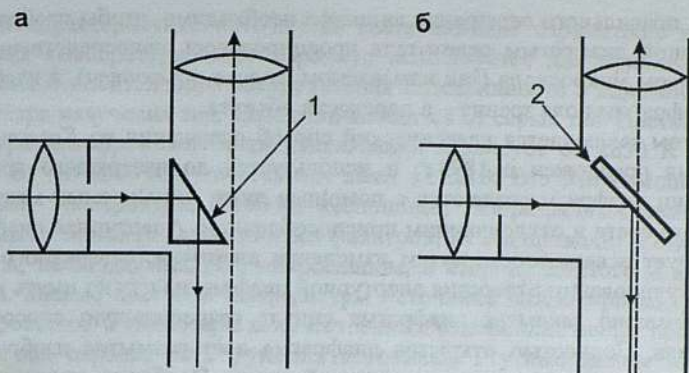


Рис. 2.6. Системы опак-иллюминаторов. По [Юшко, 1984]:

а) система устройства опак-иллюминатора по Нишетту, 1 – призма; б) система устройства опак-иллюминатора по Бекке, 2 – стеклянная пластинка

стеклянную пластинку, значительно выше, чем при работе с призматическим опак-иллюминатором. Поэтому им рекомендуется пользоваться при работе с большими увеличениями, микрофотографировании. Применяя пластинковый рефлектор можно вести коноскопические наблюдения. Большинство исследователей считают, что для рутинной работы предпочтительно использование пластинкового опак-иллюминатора.

Опак-иллюминатор снабжается специально рассчитанным осветителем (рис. 2.7), в конструкцию которого входят лампа, коллекторная линза, апертурная диафрагма осветителя, полевая диафрагма осветителя, линза осветителя. Для специальных наблюдений в схему осветителя могут быть добавлены поляризатор, светофильтры.

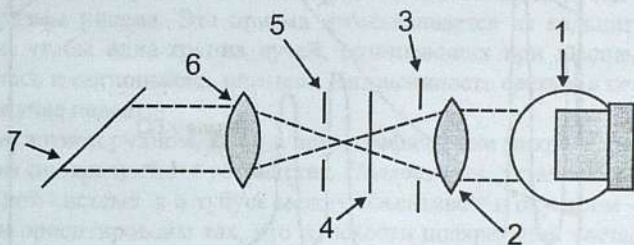


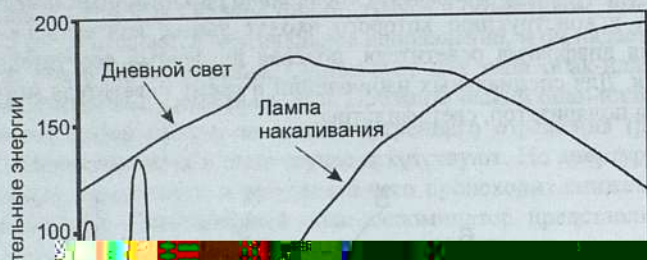
Рис. 2.7. Схематическое строение осветителя. По [Крейг, Воган, 1983]:

1 – лампа, 2 – коллекторная линза, 3 – апертурная диафрагма осветителя, 4 – поляризатор, 5 – полевая диафрагма осветителя, 6 – линза осветителя, 7 – рефлектор

Для правильного освещения аншлифа необходимо, чтобы изображение апертурной диафрагмы осветителя проецировалось непосредственно над объективом микроскопа (так называемом, *зрачке объектива*), а изображение диафрагмы поля зрения – в плоскости объекта.

В этом заключается классический способ освещения *по Келеру*, который был предложен в 1893 г. и используется до настоящего времени. Проекции диафрагм создаются с помощью линз, помещаемых между источником света и отклоняющим приспособлением. Апертурная диафрагма регулирует освещенность путем изменения апертуры (отверстного угла). При регулировании отверстия апертурной диафрагмы нужно иметь в виду, что чрезмерно закрытая диафрагма снизит разрешающую способность объектива. Полностью открытая диафрагма дает размытое изображение объекта вследствие наложения световой вуали. Особенно важна регулировка при использовании пластинкового опак-иллюминатора при больших увеличениях, микрофотографии, а также скрещенных николях. Диафрагма поля зрения служит для ограничения поля зрения. Сила освещения и разрешающая способность не зависят от положения диафрагмы, но при этом увеличивается контрастность.

Обычными источниками света, используемыми в световой микроскопии, являются лампы накаливания, реже используются газоразрядные лампы (ХВО). Различные типы источников света отличаются друг от друга не только интенсивностью, но и своими спектральными характеристиками (рис. 2.8).



Диафрагма ХВО

При характеристике источников света важным параметром является цветовая температура. Этот параметр используется для приближенного описания относительного распределения интенсивности в видимой области спектра излучения тел, мало отличающихся от серых тел. Цветовая температура вольфрамовой нити накаливания варьирует от 2850 К у ламп 6 В/15 Вт до 3300 К у галогенных ламп 12 В/100 Вт. Это намного ниже цветовой температуры (6100 К) ксеноновых газоразрядных ламп. Если применять лампы накаливания без фильтров, то это приводит к смещению окрасок, наблюдаемых под микроскопом, в сторону желтого и красного цветов. Знание цветовой температуры источника важно при микрофотографировании, а также при количественных измерениях цвета, так как наблюдаемая окраска есть функция источника. Ртутные лампы высокого давления дают очень интенсивный свет с высокой долей УФ-излучения. Кроме того, спектр таких ламп дискретный, излучаемая световая энергия концентрируется при линиях ртути. При работе с такими лампами следует быть осторожным: не следует смотреть на прямой интенсивный свет и подвергать кожу прямому излучению.

2.3. Поляризатор. Анализатор

При прохождении луча света через поляризатор он поляризуется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Если один из поляризованных лучей при этом будет поглощаться, то на выходе из поляризатора будет свет, поляризованный в одной плоскости. В поляризаторах, состоящих из поляроидных пленок, используется именно этот принцип. Каждая пленка представляет собой тонкий слой нитроцеллюлозы, покрытый ультрамикроскопическими игольчатыми кристалликами, у которых кристаллографические оси ориентированы параллельно друг другу.

Поляризацию, возникающую при двупреломлении без абсорбции, также применяют для получения плоскополяризованного света путем использования призмы николя. Эта призма изготавливается из кальцита с таким расчетом, чтобы одна группа лучей, возникающих при двупреломлении, отклонялась и поглощалась оправой. Интенсивность света и в первом, и во втором случае падает.

В стандартном рудном, как и в петрографическом микроскопах, используется два поляризующих устройства. *Поляризатор* устанавливается в осветительной системе, а в тубусе между объективом и окуляром – *анализатор*. Они ориентированы так, что плоскости поляризации света, проходящего через них взаимно перпендикулярны. Поляризатор при работе с геологическими препаратами, как правило, введен в ход лучей. Анализатор вводится в ход лучей при изучении таких оптических свойств как анизотропия и поляризационные окраски (см. главу 1), и в этом случае говорят о скрещенности николей.

2.4. Дополнительные принадлежности к микроскопу

Светофильтры являются вспомогательными оптическими принадлежностями к микроскопу и имеют различное целевое назначение. Характеристики фильтров, которые необходимо учитывать в работе, включают в себя:

- длина волны λ_{max} , при которой коэффициент пропускания фильтра достигает максимального значения;
- ширина полосы пропускаемого излучения, определяемая полушириной разности длин волн, при которой коэффициент пропускания фильтра уменьшается до половины своего максимального значения;
- коэффициент фильтрации.

Светофильтры обычно устанавливаются в осветителе. Синий фильтр убирает желтизну, присущую объектам при освещении их обычной лампой накаливания. Оранжевый светофильтр используется при некоторых специальных наблюдениях, когда цвет или цветовой оттенок не должен приниматься во внимание. Желтый или оранжевый светофильтры используются для приблизительной оценки отражения исследуемого минерала путем сравнения его с эталоном. Использование желто-зеленого и желтого фильтра снижает влияние синих лучей и также убирает хроматические аберрации у ахроматов.

Светофильтры применяются и для микрофотографии. К черно-белой микрофотографии руд предъявляются особые требования: правильная градация степеней светлоты должна передать зрительное восприятие пестрой цветной картины на черно-белом изображении объекта. При работе с цветными фотографическими пленками следует учитывать цветовую температуру источника света. Коррекция осуществляется с помощью конверсионного светофильтра, созданного для введения основных поправок в цветовую температуру освещения.

Светофильтры дополнительной окраски используются тогда, когда в ущерб правильной цветопередаче, хотят выделить детали структуры. Окраска светофильтра является дополнительной к окраске выделяемой детали. Например, желтая деталь (халькопирит) на фоне белого (галенит) лучше проявлена при использовании синего фильтра.

Вращающийся столик необходим для наблюдения свойств анизотропии и двуотражения, а также для проведения угловых измерений. Прикрепляемый к нему *препаратодоводитель* используется для изучения и подсчета количества зерен точечным методом.

2.5. Модели микроскопов. Настройка освещения

Технический прогресс последних десятилетий в значительной мере коснулся и оптических систем. Крупным успехом явилось введение просветленной оптики, различных оптических приспособлений для количественного изучения оптических свойств. Фирмы – производители мик-

роскопов стремятся создать оригинальную конструкцию прибора, поэтому работа с конкретной моделью требует изучения руководства по использованию. Передовыми производителями микроскопов для отраженного света являются фирмы Zeiss, Leica, Olympus, Nikon. В России микроскопы отраженного света ПОЛАМ (поляризационный оптический ламповый микроскоп) Р-312 выпускаются в Санкт-Петербурге (рис. 2.9).

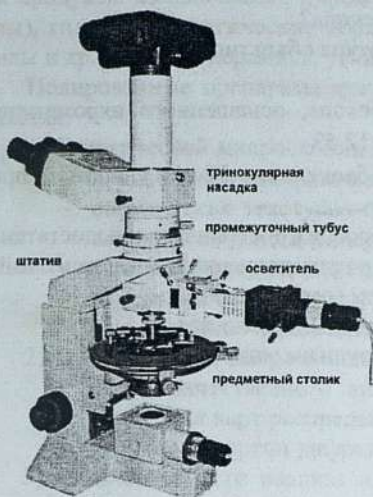


Рис. 2.9. Микроскоп ПОЛАМ Р-312 (производство ЛОМО, г. Санкт-Петербург)

Качество изображения в микроскопе в значительной степени зависит от освещения, поэтому настройка освещения является важной операцией, предваряющей работу. *Настройка* включает в себя следующие процедуры:

- 1) Установление объекта на предметный столик;
- 2) Включение осветителя;
- 3) Введение в ход лучей пластинкового opak-иллюминатора;
- 4) Установление объектива со средним увеличением и фокусировка микроскопа на резкое изображение объекта;
- 5) Проверка центрировки объектива и при необходимости его центрирование;
- 6) Выключение анализатора из хода лучей;
- 7) Прикрывание полевой диафрагмы на 1/3 поля зрения, получение ее резкого изображения и центрировка диафрагмы относительно центра перекрестия окуляра. Открытие полевой диафрагмы по полю зрения окуляра;
- 8) Введение в ход лучей линзы Бертрана и ее фокусировка на резкое изображение выходного зрачка объектива. Центрировка изображения выходного зрачка объектива относительно центра перекрестия окуляра;
- 9) Прикрытие апертурной диафрагмы на 1/3 изображения выходного зрачка; фокусировка линзы Бертрана на резкое изображение апертурной диафрагмы; центрировка изображения апертурной диафрагмы относительно изображения выходного зрачка объектива; открытие апертурной диафрагмы по зрачку;
- 10) Получение резкого изображения нити накаливания лампы в выходном зрачке объектива и полного его заполнения;
- 11) Выключение линзы Бертрана из хода лучей микроскопа.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные отличия рудного микроскопа от петрографического?
2. В чем особенность объектива для отраженного света (по сравнению с объективом для проходящего света)?
3. Что понимается под сферической и хроматической аберрациями, чем они характеризуются?
4. В чем особенность ахроматов?
5. От чего зависит разрешение микроскопа?
6. От чего зависит нумерическая апертура объектива?
7. Правило Аббе.
8. Каково общее увеличение микроскопа, оснащенного ахроматическим объективом $\times 40$ и окуляром $\times 12,5$?
9. Каково увеличение микроскопа с объективом $\times 10$ и окуляром $\times 8$ при апертуре объектива 0,25?
10. Перечислите разновидности окуляров, их достоинства и недостатки.
11. Охарактеризуйте опак-иллюминатор призматический и пластинковый.
12. Какова роль поляризатора в рудном микроскопе?
13. Применение светофильтров в рудной микроскопии.
14. Какова роль иммерсии в работе с рудным микроскопом?

Глава 3. ПОДГОТОВКА ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ МИНЕРАГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной формой минераграфических исследований являются полированные препараты. Объектами препарирования являются геологические образцы (руды, минерализованные породы), продукты обогащения (хвосты и продукты измельчения), пиromеталлургические продукты (шлаки, сплавы), гидрометаллургические образцы (остатки от выщелачивания – кеки, илы и др.), бетон и керамика, угли и продукты горения, почвы и т.д.

Полированные препараты могут быть использованы в следующих областях:

- 1) В оптической микроскопии для:
 - диагностики минералов по оптическим свойствам;
 - определения текстурно-структурных особенностей и парагенетических ассоциаций минералов;
 - количественных подсчетов минеральных фаз;
 - измерений микротвердости;
 - изучения флюидных включений;
- 2) В электронной микроскопии для:
 - полуколичественного анализа химического состава минералов, получения карт распределения элементов;
 - получения картин дифракции обратно-рассеянных электронов;
- 3) Количественного анализа изображений, а также для других целей, требующих полированных поверхностей.

Виды полированных препаратов:

Полированные илифы (анилифы) и шашки были и остаются основной формой для минераграфических исследований. Они просты в изготовлении и достаточно информативны. Размер и форма препаратов определяются задачами исследования. Толщина образца тоже произвольна, но ограничена свободным расстоянием микроскопа.

Прозрачно-полированные илифы полезны для изучения минерализованных пород и руд с большой долей жильных минералов, ассоциаций, содержащих низкоотражающие рудные фазы, и для измененных и окисленных руд. Такие препараты удобны для изучения деталей внутреннего строения, зональности, двойникования, изменения внутренних рефлексов и последующих исследований с применением люминесцентных и электронных микроскопов, лазерных микроанализаторов. Однако их изготовление более трудоемко.

Двусторонне-полированные илифы сходны с прозрачно-полированными, но при этом полировке подвергаются две поверхности препарата. Двусторонне-полированные шлифы обычно имеют толщину 3–4 мм. Области применения двусторонне-полированных шлифов сходны с таковыми для прозрачно-полированных. Однако в связи с трудоемкостью изготовле-

ния, двусторонне-полированные шлифы применяются, прежде всего, для изучения флюидных включений.

Монтированные препараты используются для подготовки к минералогическому изучению неконсолидированного материала – почв, охр, шлихов и минеральных концентратов. В качестве основы используется эпоксидная смола, канифоль.

Процедура шлифовки и полировки образцов, описываемая ниже, успешно применяется в шлифовальной мастерской Института минералогии УРО РАН (г. Миасс) и применима в любой лаборатории.

3.1. Изготовление полированных аншлифов и шашек

Процесс изготовления полированных аншлифов и шашек разделяется на несколько стадий: предварительная подготовка, шлифовка и полировка.

3.1.1. Предварительная подготовка

Задача предварительной подготовки состоит в подгонке рудного штафа по размерам и форме и получении плоской поверхности, которая на последующих стадиях будет шлифоваться и полироваться. Характер подготовки зависит от природы материала и целей исследования. Твердый материал просто обрезается алмазной пилой до требуемого размера и шлифуется.

Для рыхлых, хрупких, трещиноватых или пористых образцов необходима предварительная цементация и брикетирование (получение брикета), чтобы предупредить выкрашивание образца или захват абразивного порошка во время шлифовки и полировки образца. С внедрением механических способов пробоподготовки появилась тенденция к стандартизации формы препаратов, которым придается форма шашки или шайбы диаметром 23 или 40 мм и толщиной около 0,8 см (рис. П.3, прил. 6).

Цементация образцов осуществляется с помощью различных смол. Традиционно для этого использовались канифоль и бакелит. В настоящее время минералогические лаборатории для этой цели применяют эпоксидные смолы. Такие смолы должны иметь низкую вязкость, для того чтобы более качественно пропитывать образец. Важно, чтобы затвердевание смолы не требовало нагрева, так как даже небольшой нагрев может привести к изменению структуры руд и полиморфным превращениям некоторых фаз. В случае, если препарат планируется исследовать методами электронной микроскопии, следует помнить, что смола не должна возгоняться под электронным пучком.

Для подготовки препаратов существуют специальные цилиндрические металлические или пластмассовые заливные формы, но можно использовать и самодельные, представляющие собой металлические кольца нужного диаметра с отполированной внутренней поверхностью. Металлическое кольцо кладется на поверхность оргстекла (рис. 3.1), стык между оргстек-

лом и кольцом промазывается пластилином для предотвращения протечек эпоксидной смолы. Оргстекло и, особенно, металлическое кольцо предварительно смазываются тонким слоем вазелина: без этого шашку будет очень сложно извлечь из формы после застывания. Образец помещается в форму плоской отшлифованной поверхностью вниз. Порошковая проба насыпается на дно формы тонким слоем. Отмеряется (по весу или объему) необходимое количество компонентов смолы (согласно инструкции по применению). Затем эти компоненты тщательно смешиваются, выдерживаются некоторое время (1–5 минут) для удаления пузырьков воздуха и заливаются в форму с образцом. Для придания смоле текучести можно добавить немного ацетона, количество которого подбирается опытным путем. Немедленно после заливки нужно аккуратно пошевелить образец, чтобы удалить пузырьки. Для ускорения всплывания пузырьков их можно активизировать обычной швейной иглой. При подготовке монтированных препаратов из порошков иногда применяется смешивание порошка с эпоксидкой и заливка формы этой суспензией.

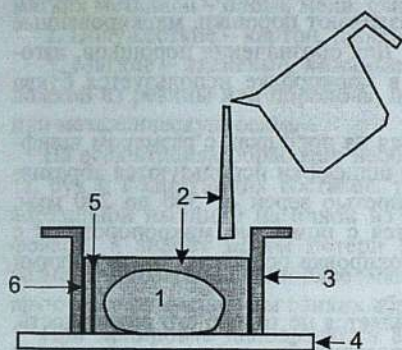


Рис. 3.1. Модель изготовления шашки:

1 – образец, 2 – эпоксидная смола, 3 – металлическая форма, 4 – плексиглас, 5 – бумажная этикетка «стоймя»; 6 – тонкая пленка вазелина

Для заливки шашек и пропитки пористых образцов полезно использовать специальные приспособления, позволяющие создавать вакуум – импрегнаторы. При этом широко применяются импрегнаторы фирмы Struers.

Смола затвердевает согласно инструкции при комнатной температуре в течение 24 часов, после чего залитый образец извлекается из формы. Если смола не затвердела, то обычно нагрев до 70–80 °С в сушильном шкафу в течении 1 часа приводит к ее полному затвердеванию. Для облегчения извлечения шашки из формы, ее можно слегка разогреть, например, в емкости с горячей водой. Выбивание шашек из заливных форм недопустимо, это может привести к их раскалыванию.

3.1.2. Шлифовка

Шлифовка является наиболее важной стадией в процессе подготовки аншлифа или шашки. Задачи шлифовки состоят в ликвидации всех неровностей поверхности, уменьшении толщины образца, подготовке гладкой

поверхности и удалении зоны деформированных при резке зерен. В результате должна получиться гладкая поверхность, свободная от царапин, дыр и выраженного рельефа.

Шлифовка подразделяется на стадии:

- обдирка;
- тонкая шлифовка на станке;
- ручная шлифовка или грубая полировка.

В качестве абразива обычно используются алмаз (С), карбид кремния (SiC), окись алюминия (Al_2O_3) [Справочник..., 1985]. Выбор абразива зависит от твердости образца. Некоторые исследователи считают желательным использование фиксированных абразивов (например, алмазный порошок, импрегнированный в смолу, шлифовальная бумага). Дело в том, что частицы нефиксированного порошка имеют тенденцию вращаться и оставлять царапины. Фиксированные абразивы лишены этого недостатка.

Маркировка порошков и паст основана на их зернистости, и производится в виде одно-, двух- или трехзначного числа. Размер абразивных порошков на основе карбида кремния и окиси алюминия, дается как номер основного сита при ситовом анализе. Различают порошки, маркированные буквой «М», и микропорошки – «АМ». Для обозначения порошков, изготовленных из синтетических алмазов, в маркировке используется буква «С».

Обдирочные операции осуществляются на порошках с размером шлифзерен более 500 мкм. На стадии грубой шлифовки используются абразивные порошки карбида кремния с крупностью зерен от 500 до 200 мкм. Тонкая шлифовка образцов производится с помощью микропорошков с размером частиц 100–10 мкм. Грубая полировка осуществляется тонкими микропорошками фракции 10–1 мкм.

Для абразивного порошка важным является не только его размерность, но и вариации размера частиц. Поэтому чрезвычайно важно предохранение образца от загрязнения старыми порошками.

Остывший черновой вариант препарата обдирается на шлифовальном станке на чугунной планшайбе с абразивным порошком карбида кремния № 8. Обдирка производится до вскрытия образца. Важным при начальной обработке черновых шашек является снятие острых краев по кругу (фаски). Это является необходимым во избежание порезов рук.

Тонкая шлифовка осуществляется также на чугунной планшайбе с абразивным порошком М20 и М14. В результате удаляется большинство царапин и оставшиеся зоны поверхностных деформаций.

Ручная шлифовка или *грубая полировка* осуществляется на стеклах микропорошками Al_2O_3 фракции 10, 5, 3, 2 и 1 мкм. Обработка каменного материала на порошках занимает примерно 15 мин на порошке каждой крупности, а, в целом, примерно 1 час. При переходе с одной фракции порошка на другую важной является тщательная промывка рук, рабочего

стекла и аншлифа щеткой с мыльным раствором, а если необходимо, то с применением ультразвуковой ванны для очищения микропор образца от порошков.

3.1.3. Полировка

Полировка или доводка аншлифа, шашки (*тонкая полировка*) производится на полировальном станке с использованием полировальных кругов. В зависимости от физико-механических свойств каменного материала полировальники могут иметь различную жесткость и рельеф поверхности, от правильного выбора которых существенно зависит качество отполированной поверхности.

Формы полировальников могут быть самыми разнообразными: плоскими, сферическими, чашеобразными и сложной формы. По типу применяемого материала и способу обработки они делятся на:

1. Жесткие – выполняются из твердых пород дерева или многослойной фанеры, синтетических материалов (бакелита, жестких пластмасс), а также мягких металлов – олова, меди, свинца.

2. Полу жесткие – картон, наборные круги из бумаги, мягких пластмасс.

3. Мягкие – тканевые, кожаные или войлочные полировальники с подложкой из резины или поролона, натягивающиеся на твердую деревянную или металлическую основу.

На всех стадиях обработки необходимо следить за чистотой инструмента, рук и полирующих составов, т.к. появление царапин из-за случайной абразивной пылинки на одной из стадии можно убрать только перешлифовкой, а значит ценой потери не только времени, но и уменьшения размера препарата. Наиболее мягкие камни рекомендуется полировать вручную с применением тонких абразивов на основе мела, трепела и т.п.

При полировке используются алмазные пасты. Диапазон размерности зерен (в мкм.) указывается через дробь, числитель которой равен наибольшему, а знаменатель – наименьшему, размеру зерен основной фракции, например, 7/5 и 5/3.

Полировка образцов начинается с пасты 7/3 и может быть закончена пастой 3/2, которыми обрабатывается прикрепленный к чугунной планшайбе деревянный круг. Работу на данном этапе рекомендуется проводить при небольшой скорости вращения. При переходе полирования с одной алмазной пасты на пасту с меньшей фракцией зерна проводится обязательная промывка аншлифа в керосине или мыльном растворе с применением щетки (при необходимости используется ультразвуковая ванна). Важными процедурами являются просушка и протирка аншлифа спиртом.

На заключительной стадии используются алмазные абразивы (2/1 и 1/0), которыми пропитывается ткань без ворса, способствующая фиксации алмазных зерен. Применение плотных, лишенных ворса тканей, сводит к ми-

Дефекты препаратов и способы их устранения (по [Кринов, Ефимов, 2008])

Дефект препарата	Следствие дефекта	Способы устранения дефекта	Примечания
Высокий рельеф поверхности	Сильно проявляются эффекты смачивания поверхности и происходит образование ложной зональности роста	Доводку поверхности после абразивных порошков необходимо проводить на плотных сортах бумаги (ватман, плотный картон, обратная сторона фотобумаги, перфокарты) или плотных бязевых кругах с использованием алмазных паст	Доводку поверхности необходимо проверять на чистоту. В противном случае при полировке получаются грубые царапины. Чем выше скорость движения полировальника относительно поверхности препарата, тем выше качество полировки. Нажим на препарат – минимально возможный
Царапины и грубые дефекты на поверхности	Образование артефактных эффектов травления	По возможности необходимо удаление царапин путем дополировки окисью хрома на плотном сукне или бязи на высоких скоростях круга. Дефекты поверхности при приготовлении препарата заполняются эпоксидными смолами или густым раствором шеллака	Чем выше скорость движения полировальника относительно поверхности препарата, тем выше качество полировки. Нажим на препарат – минимально возможный
Наличие сильно реагирующих минералов (карбонатов)	Вспучивание поверхности или различное по интенсивности вытравливание этих минералов	Нанесение тонкой пленкой пчелиного воска на поверхность перед окончательной полировкой. Рудные минералы практически не покрываются этой пленкой и хорошо очищаются	Возможно фрагментарное перекрытие жильных карбонатов вне зоны травления. Пленки прекрасно удаляются бензином марки «В» («галоша»)
Остатки полирующих агентов на поверхности полировки	Смачивание поверхности полировки происходит фрагментарно или не происходит вовсе	Препараты после приготовления обезжириваются равнопропорциональной смесью спирта и ацетона и помещаются в бокс для предотвращения загрязнения поверхности	Проводится операция путем нанесения тонкого слоя жидкости с помощью ткани (бязь, фланель)

нимому развитие рельефа при условии слабого давления. При необходимости количественного анализа образца полировку желательнее завершить алмазной пастой 0,25 мкм или абразивом Al_2O_3 (1–0,3 мкм), порошок которого смешивают с водой или специальной жидкостью (лабрикантом) и наносят на ворсистую ткань, наклеенную на стеклянный круг. Т.к. ворсистые ткани создают рельеф, то эта стадия должна быть очень непродолжительной (3–5 сек.). На данном этапе работа ведется на больших оборотах для удаления царапин, полученных при полировании на пастах. Процесс полировки занимает приблизительно 15 мин.

Результаты полировки, полученные при работе на пастах с различной размерностью зерен, по возможности нужно контролировать с помощью микроскопа. Это поможет избежать рельефа, дефектов, царапин.

Дефекты препаратов, их следствия и способы устранения рассмотрены в таблице 3.1.

3.2. Изготовление двусторонне-полированных шлифов

Двусторонне-полированные шлифы очень удобны для изучения прозрачных и полупрозрачных минералов, их взаимоотношений с непрозрачными минералами, зональности, двойникования, внутренних рефлексов или флюидных включений. Также они могут быть использованы при электронной микроскопии, лазерном микроанализе и исследовании люминесценции.

Методика изготовления следующая: одна из поверхностей шлифуется и полируется указанным выше способом и приклеивается с помощью канадского бальзама на предметное стекло. После полного высыхания канадского бальзама тонкий срез шлифуется до достижения необходимой толщины в соответствии с задачами исследований и полируется.

3.3. Изготовление полированных шлифов из разобщенных зерен

При работе с очень мелкими зернами (0,5–0,1 мм) работа проводится под бинокляром, зерна наклеивают на плексиглас, смазанный вазелином. При этом зерна необходимо группировать, зарисовывать, чтобы потом их быстро находить. Затем зернышки накрывают металлической формой без дна и заливают эпоксидной смолой. После затвердевания эпоксидной смолы, обдирка, шлифовка и полировка производится, как описано выше для аншлифов и шашек (см. раздел 3.1). В этом случае при шлифовке нужно снимать очень тонкий слой эпоксидной смолы во избежание потери зернышек.

Вопросы для самопроверки

1. Объекты исследования в минераграфии.
2. Области использования полированных препаратов.
3. Перечислите этапы изготовления полированной шашки.

Глава 4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МИНЕРАЛОВ

Диагностика минералов в отраженном свете опирается на определение оптических, структурно-морфологических, магнитных, электрических и химических признаков.

4.1. Оптические признаки минералов

Исследование минералов в рудной микроскопии производится в плоскополяризованном свете (с включенным поляризатором – «никили параллельны») или с поляризатором и анализатором («никили скрещены»).

Без анализатора изучаются:

- цвет; отражательная способность; двуотражение.

В скрещенных николях наблюдаются:

- изотропность и анизотропность; поляризационные окраски; внутренние рефлексы.

4.1.1. Цвет и отражательная способность

Эти признаки дают первое качественное впечатление о минерале в шлифе. Обычно это впечатление возникает при сравнении с минералами-спутниками и часто оказывается ложным. Например, умеренно окрашенный пентландит (или халькопирит) рядом с сильно окрашенными минералами может казаться бесцветным, но рядом с белыми – яркоокрашенным. В шлифе самый светлый и самый яркий минерал обуславливает общее впечатление, и невольно с ним сопоставляются все остальные.

Цвет (окраска) минерала в отраженном свете зависит от тренированности глаза, ассоциации, в которой находится минерал, оптической системы, через которую происходит наблюдение, источника света. С другой стороны, восприятие цвета в какой-то мере объективно, т.к. обусловлено тем, что оптические константы n (показатель преломления), k (коэффициент абсорбции) и, следовательно, R (отражательная способность) функционально связаны с длиной волны во всей видимой области спектра (440–700 нм).

Поскольку белый свет не является монохроматическим (одноцветным), а минерал, на который падает такой свет, по-разному отражает лучи с разной длиной волны, то те волны, которые отразятся больше, и будут определять окраску минерала. Таким образом, можно качественно судить о характере дисперсии отражения по цвету минерала в отраженном свете и количественно – по спектрам отражения в спектральной области 440–700 нм. В том случае, если отражательная способность минерала увеличивается с увеличением длины волны падающего света, говорят об аномальной дисперсии, которая часто свойственна металлам; в противном случае дисперсия нормальна, что свойственно слабоабсорбирующим и прозрачным минералам. Но в большинстве случаев имеет место смешанная дисперсия.

Дисперсия отражения проявляется у минералов, показатель поглощения которых имеет избирательно по спектру повышенные значения. В этом случае у таких минералов в белом свете появляются цветные оттенки; их спектральный тон является дополнительным к цвету минерала в проходящем свете. Например, киноварь и куприт в синей части спектра имеют повышенные значения показателя поглощения. В проходящем свете минералы имеют ярко-красную окраску, а в отраженном – выглядят голубоватыми. Прозрачные минералы (большинство жильных и породообразующих) в отраженном свете не имеют окраски. Они кажутся темными, т.к. отражают мало света. Непрозрачные выглядят ярче. Существуют все переходы от прозрачных к непрозрачным минералам, соответственно существуют все оттенки от черного и темно-серого к ярким белым.

Цвет минерала в отраженном свете также зависит от показателя преломления иммерсионной среды, в которой происходит наблюдение, что вытекает из формулы Френеля ($R = [(n-N)^2 + k^2] / [(n+N)^2 + k^2]$). Для отдельных минералов различия цвета в воздухе и иммерсионной жидкости имеют диагностическое значение. Например, ковеллин в воздухе ($n_{им} \sim 1$) темно-синий, в воде ($n_{им} - 1,333$) – фиолетово-голубой, в кедровом масле ($n_{им} - 1,515$) – красновато-фиолетовый, в иодистом метиле ($n_{им} - 1,74$) – оранжево-красный.

Очень мало минералов имеют отчетливую окраску (ковеллин, борнит, золото и некоторые др.). Большинство окрашены слабо и характеризуются слабыми оттенками. Поэтому лучше всего цвет воспринимается глазом в сравнении с другими тонами. Так, халькопирит в ассоциации с белыми и серыми минералами выглядит отчетливо желтым, а рядом с золотом – зеленовато-желтым.

Еще одна проблема в восприятии света связана с аппаратурой, используемой для наблюдения. Каждому микроскопу свойственны тонкие отличия в оптике. Важное значение имеет ее чистота. Очень сильно на восприятие цвета влияют условия освещения, поскольку источники света, используемые в микроскопии, имеют различное спектральное распределение энергии, и длительная эксплуатация ламп приводит к смещению окрасок. Наконец, следует учитывать и качество полировки. На окраску минерала может оказывать влияние побежалость, образующаяся со временем при хранении шлифа на воздухе из-за окисления поверхностного слоя, или окалина, образующаяся при полировке. Например, окраска борнита изменяется от розовой (в свежих шлифах) до кремовой и коричнево-кремовой (в старых). Иногда окраска обусловлена внутренними рефlekсами – отражением от внутренних неоднородностей, и слабый оттенок минерала сходен с цветом внутренних рефлексов. Это отчетливо заметно в иммерсии, но иногда наблюдается и в воздухе (например, у киновари, прустита, пираргирита).

Для наблюдения цвета минерала в отраженном свете освещение должно быть максимальным, хорошо центрированным и обе диафрагмы открыты. Применяют слабый объектив, а в качестве рефлектора – пластинковый opak-иллюминатор. На основании качественной оценки все минералы в отношении цвета делят на (по [Волынский, 1947]):

- 1) Бесцветные;
- 2) Цветные.

К группе бесцветных минералов относятся все, так называемые, белые, серые и минералы с неясным цветным оттенком. К группе 2 относятся минералы ясноокрашенные:

- 1) Желтые (и коричневые);
- 2) Розовые;
- 3) Голубые.

Сравнительно немногие рудные минералы имеют яркий цвет. С другой стороны, совершенно бесцветных минералов нет, всегда есть оттенки (табл. 4.1). В качестве эталонов для сравнения цвета используются:

- 1) Белые: сурьма самородная, арсенопирит, галенит, блеклая руда, сфалерит и все жильные;
- 2) Желтые: золото самородное, пирит, халькопирит, пирротин (с розовым оттенком), станнин (коричневый из-за малой отражательной способности);
- 3) Розовые: медь самородная, никелин, борнит (в свежей полировке);
- 4) Голубые: прустит, пираргирит, ковеллин.

Свойство вещества отражать определенное количество падающего на него света является оптической константой и называется *отражением или отражательной способностью*. Отражательная способность минерала является фундаментальным свойством и выражается в процентах. Численное значение отражательной способности в оптике носит название коэффициента отражения (R) и вычисляется по формуле:

$$R = I_r \times 100 / I_0 (\%), \quad (10)$$

где R – коэффициент отражения, I_r – интенсивность отраженного света, I_0 – интенсивность падающего света.

Глаз не может «измерить» величину отражения (для этого служат фотометры), но оценить относительную величину отражения легко, особенно для бесцветных минералов. Минералы с высоким отражением выглядят более светлыми, яркими. С величиной отражения связана яркость минералов на фотографиях. Для оценки отражательной способности в полированном шлифе находят участок аншлифа, в котором интересующий минерал попадает в одно поле зрения с минералом с известным отражением, и определяют, какой из них светлее или темнее.

Примеры цвета распространенных минералов
(по [Волынский, 1947])

Минерал	Цвет
Галенит, PbS	Белый
Сфалерит, ZnS	Светло-серый
Халькопирит, CuFeS ₂	Обычно светло-желтый, рядом с галенитом – ярко-желтый, с золотом – зеленовато-желтый, сходен по цвету с пирротинном, но нет коричнево-розового оттенка
Пирротин, FeS	Светло-желтый с коричнево-розовым оттенком
Борнит, Cu ₅ FeS ₄	Розовато-коричневый, быстро окисляется с приобретением сначала красноватой окраски, затем фиолетовой и синей; одновременно могут быть оттенки разных тонов
Ковеллин, CuS	Темно-синий с нежно-сиреневым оттенком
Пирит, FeS ₂	Желтовато-белый
Арсенопирит, AsS	Белый с легким желтым оттенком или желто-розовый по сравнению с галенитом
Гематит, Fe ₂ O ₃	Белый с легким синевато-серым оттенком, по сравнению с магнетитом чисто-белый
Кварц, SiO ₂	Серый, темнее сфалерита
Кальцит, CaCO ₃	Серый, светло-серый
Халькозин, Cu ₂ S	Белый, тусклый (синевато-белый, розовато-белый, по сравнению с галенитом – голубовато-серый)
Золото самородное, Au	Желтый, яркий
Серебро самородное, Ag	Белый, яркий (рядом с самородным висмутом, цвет похож, но отражение выше)
Медь самородная, Cu	Розовато-белый цвет, по сравнению с серебром – более матовый и красноватый
Пентландит, (Fe, Ni)S	Светло-кремовый, белый с коричневым оттенком (без розового); рядом с пирротинном – светлее и без розового тона
Киноварь, HgS	Белый до синевато-белого рядом с галенитом (отражение меньше галенита)
Антимонит, Sb ₂ S ₃	Белый до серовато-белого (с сильным блеском, подобен галениту, но несколько темнее и с некоторым кремовым оттенком)

Ошибки при оценке отражения могут быть обусловлены многими причинами. Плохо отполированные минералы будут казаться менее отражающими, чем те, которые отполированы хорошо, хотя их величины отражения могут быть и одинаковыми. Сравнение отражательной способности минералов разного цвета также может вызвать затруднения, которые преодолеваются использованием светофильтра. Для качественной и приближенно-количественной оценки отражательной способности удобно использование черно-белого изображения объекта (традиционная фотография или цифровое изображение, на котором отражение переведено в режим «градации серого»). Чем темнее участок изображения, тем меньше отражение (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Градация оттенков серого на черно-белом изображении полированного шлифа.

Полиметаллическая руда, рудопровление Звездное, Южный Урал

Для точного определения коэффициента применяются специальные приборы – фотометры. Нужно напомнить, что коэффициент отражения различается для разных длин волн, поэтому при измерениях используется монохроматический свет. Наиболее полная информация может быть получена последовательным измерением коэффициентов отражения от различных длин волн с фиксированным шагом, т.е. спектра отражения.

Существует два основных метода определения коэффициента отражения – прямой и метод сравнения. «Прямое» измерение отражения требует относительно больших образцов, и к такому методу прибегают при калибровке эталонов, которые используются в других методах. Интенсивность пучка стабилизированного светового источника измеряется фотометром; затем измеряется интенсивность этого пучка после его отражения от относительно большой полированной поверхности вещества под углами, близкими к 90° .

При сравнительных измерениях значение, полученное для образца, сопоставляют со значением, полученным в тех же условиях для эталона, предварительно откалиброванного прямым методом. В установке одновременного сравнения пучок, отраженный от образца, сравнивается с пучком, одновременно отраженным от стандарта. В установках последовательного сравнения сначала измеряют пучок, отраженный образцом, а затем пучок, отраженный стандартом в тех же условиях. Сопоставление полученных значений позволяет определить величину отражения.

Метод сравнения впервые был предложен Ж. Орсе́лем. Еще в 1927 г. он экспериментировал с фотоэлектрическим прибором, применяя его для измерения света, отраженного от полированной поверхности. Современные *спектрофотометры* представляют собой усовершенствованные модели установки Орсе́ля. Прибор для измерения включает в себя рудный микроскоп, монохроматор и фотоэлемент, соединенный с фотометром (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Общая схема фотометрической установки.

По [Крейг, Воган, 1983]

Микроскоп, включенный в систему измерения отражения, должен иметь диафрагму ограничения светового пучка, а источник света – высокую цветовую температуру и быть стабилизированным. Монохроматор предназначен для создания монохроматического пучка света. В качестве фотоэлемента используются обычно фотоэлектронные умножители.

Процедура получения спектров отражения сводится к последовательному измерению интенсивности отраженного пучка света для эталона с известным отражением и для изучаемого минерала. Вычисление отражательной способности минерала осуществляется по формуле:

$$R_M = (I_M/I_{ЭТ}) * R_{ЭТ}, \quad (11)$$

где R – отражение минерала (R_M) и эталона ($R_{ЭТ}$), I – интенсивность света, показания фотометра для минерала (I_M) и эталона ($I_{ЭТ}$).

Поскольку большинство рудных минералов характеризуется некоторой дисперсией отражения, измерения производят для нескольких длин волн внутри диапазона видимого света (400–700 нм). В соответствии с рекомендациями Комиссии по рудным минералам при Международной минералогической ассоциации результаты измерения отражательной способности приводят для диапазона 400–700 нм с интервалом 20 нм и отдельно для четырех стандартных длин волн – 470, 546, 549 и 650 нм [Рябева, Шадлун, 1990].

Эталоны для измерения отражения должны хорошо принимать и сохранять полировку, иметь незначительную спектральную дисперсию. В качестве эталонов рекомендуются (коэффициент отражения, %): нейтральное стекло 0–15; синтетический карборунд 15–25; кремний 25–45; металл, напыленный на стекло 65.

Спектры отражения рудного минерала позволяют получить количественную характеристику цвета минерала. Первые расчеты цветовых характеристик рудных минералов по их спектрам отражения были выполнены Г. Пиллером [Piller, 1966]. Использование спектров отражения для количественного выражения цвета рудных минералов рассмотрены в работах Н.И. Шумской [1985; 1993], Т.Н. Чвилевой с соавторами [1988], М.М. Болдыревой с соавторами [2009] и др., в них можно найти подробное описание процедуры расчета. Здесь же приводятся только краткие сведения по данному вопросу.

Выражение цвета минералов в отраженном свете возможно через категории, используемые в колориметрии. В основе колориметрических систем лежит идея о трехкомпонентности цветового зрения. Цветовое зрение человека обусловлено наличием трех видов световосприимчивых рецепторов на сетчатке глаза, максимумы спектральной чувствительности которых локализованы в области 420, 534 и 564 нм, что соответствует синему, зеленому и желтому (хотя в литературе обычно пишут «красному») цветам. Они являются базовыми, все остальные тона воспринимаются как их смешение в определенных пропорциях. В 1931 г. Международной комиссией по освещению (International Commission on Illumination, CIE) была предложена эталонная цветовая модель XYZ. Определение цвета в этой системе базируется на определении экспериментально измеряемых коэффициентов спектрального отражения или пропускания в видимой области света и стандартных источниках света со строго фиксированным типом светоизлучения. В результате пересчетов результатов измерений получают три колориметрических параметра – яркость цвета, его светлоту и коэффициенты цветности x , y , учитывающие доли красного и зеленого цветов. Нанеся последние на график, получают точку на треугольнике цветности (рис. П.4, прил. 6).

Ее положение дает возможность объективно определить количественные характеристики цвета минерала. На треугольнике цветности указаны также координаты x и y для пяти стандартных источников света А, В, С, D, Е. Их излучение максимально близко к белому. Также указаны температуры поверхности, излучающей свет определенной волны [Булах и др., 2008]. Использование цветового треугольника позволяет не только визуализировать данные расчета цветовых характеристик, но и наглядно сравнивать различные минералы.

4.1.2. Двуотражение и плеохроизм отражения

Кубические минералы при любой ориентировке зерен не меняют цвет и отражение при вращении столика микроскопа. Большинство минералов средних и низших сингоний обнаруживают изменения цвета и/или отражения при вращении небазальных сечений, которые связаны в целом с анизотропией свойств этих минералов. Изменение отражения называется *двуотражением*, а свойство изменять цвет (или оттенок) – *плеохроизмом отражения*. Измерение отражения на разрезах, параллельных главному сечению (базальное сечение) позволяет получить главное отражение. Мерой двуотражения служит разница между максимальным (R_{\max}) и минимальным (R_{\min}) значениями отражения, выраженными в процентах. Двуотражение можно охарактеризовать относительной величиной двуотражения:

$$[(R_{\max} - R_{\min}) / R_{\max}] \times 100 \% \quad (12)$$

Кроме констатации факта наличия у минерала двуотражения или плеохроизма необходимо отмечать интенсивность их проявления (очень слабая, слабая, умеренно сильная, очень сильная) и, в случае плеохроизма, фиксировать цвета, наблюдаемые в различных сечениях.

К сильно двуотражающим минералам относятся графит, молибденит, ковеллин, антимонит, валлериит; к умеренно двуотражающим – марказит, гематит, никелин, кубанит, пирротин; слабое двуотражение отмечается у ильменита, энаргита, арсенопирита (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Минералы с плеохроизмом отражения и двуотражением
(по [Юшко, 1971])

Минерал	Изменение цвета (более темный – более светлый)	Двуотражение (R %)
Ковеллин	Темно-синий – голубовато-белый	7–24
Молибденит	Беловато-серый – белый	19–39
Висмутин	Беловато-серый – желтовато-белый	38–45
Пирротин	Розовато-коричневый – коричневатожелтый	34–40
Никелин	Розовато-коричневый – голубовато-белый	47–52
Кубанит	Розовато-коричневый – светло-желтый	35–40
Валлериит	Коричневатосерый – кремзово-желтый	14–22
Миллериит	Желтый – светло-желтый	50–56
Графит	Коричневатосерый – серовато-черный	7–18

Примечание: данные приведены при наблюдении в воздухе.

Оба свойства зависят от ориентировки кристалла относительно пучка поляризованного света; в некоторых сечениях (базальных и близких к нему) плеохроизм и двуотражение исчезают. При поисках минералов со слабым и умеренным двуотражением и плеохроизмом обычно наблюдают зерна в сростках. Оптические контрасты отражения, двуотражения и цвета усиливаются при наблюдении в масляной и йод-метиленовой иммерсии.

4.1.3. Анизотропия

Кубические минералы в скрещенных николях остаются темными при всех положениях столика микроскопа, в какой бы кристаллографической ориентировке они ни находились по отношению к поверхности. В некоторых случаях сечение может быть не полностью темным, но и тогда оно не изменяется при вращении столика. Такие минералы являются *изотропными*. В противном случае наблюдаются явления *анизотропии*, которые связаны с изменением яркости и цветового оттенка минерала в скрещенных николях при вращении столика. В анизотропных сечениях наблюдают четыре положения погасания, в которых минерал имеет минимальную яркость. Между этими позициями под углами 45° к положению погасания лежат позиции максимальной яркости.

Интенсивность анизотропии описывается с использованием относительных градаций: очень слабая, слабая, умеренная, сильная, очень сильная. Цвета, наблюдаемые у анизотропных минералов при вращении столика (*цвета анизотропии*), являются дополнительным диагностическим признаком. В некоторых случаях они проявляются достаточно отчетливо (например, желто-зеленые цвета у марказита). Однако эти цвета постоянны лишь при строго скрещенных николях, а при их неполном скрещивании у конкретных минералов могут изменяться. Цвета анизотропии чувствительны к различиям между разными микроскопами и системами освещения.

Наблюдение анизотропии минерала требует изучения большого количества зерен, чтобы отыскать сечение с максимальной анизотропией. В случае, когда порода имеет ориентированную текстуру, может возникнуть необходимость полировки другого сечения. Иногда совместное влияние вращения столика и анизотропии окружающих зерен затрудняет решение вопроса, является ли данное зерно изотропным или слабо анизотропным. В этом случае рекомендуется оставить столик неподвижным и медленно поворачивать анализатор на $5-10^\circ$ вперед и назад от его «скрещенного» положения с поляризатором. Необходимо, чтобы объектив был тщательно отцентрирован. Полевую диафрагму можно прикрыть, для того, чтобы исключить из поля зрения посторонние зерна.

Несовершенство оптических приборов приводит к тому, что 1) направление поляризованных световых колебаний в разных участках поля зрения азимутально неоднородно и 2) среди отраженных лучей, кроме плоскопо-

ляризованных, возникают эллиптически поляризованные. Неоднородность направления световых колебаний в разных участках поля зрения приводит к тому, что зерно анизотропного минерала, занимающего все поле зрения или его большую часть, гаснет неодновременно. Эллиптически поляризованные лучи не гасятся анализатором, что обуславливает неполноту и нечеткость угасания высокоотражающих кубических минералов, особенно хорошо проявляющуюся при использовании иммерсионных сред (рис. П.5, прил. 6).

Некоторые кубические минералы проявляют аномальную анизотропию, которая может быть обусловлена полировкой.

4.1.4. Внутренние рефлексy

В прозрачных и полупрозрачных веществах свет частично проникает внутрь и отражается от дефектов. При этом направление колебаний света может измениться, вследствие чего возникают *внутренние рефлексy*, которые проявлены в виде светлых диффузных участков или пятен. При включенном анализаторе лучи, отразившиеся от изотропного сечения минерала, гасятся, а деполаризованные лучи внутренних рефлексов большей частью пропускаются анализатором. Внутренние рефлексy видны в скрещенных николях при интенсивном освещении, но также могут быть заметны и в параллельных николях (рис. П.6, прил. 6). Диагностическое значение имеет как наличие внутренних рефлексов, так и их цвет, который, как правило, соответствует цвету минерала в порошке (цвету черты).

Таблица 4.3

Внутренние рефлексy минералов (по [Юшко, 1971])

Минерал	Цвет внутренних рефлексов	Минерал	Цвет внутренних рефлексов
Азурит	Синий	Малахит	Зеленый
Анатаз	Голубой	Оливин	Оливковый
Аурипигмент	Желтый	Пираргирит	Рубиново-красный, слабее прустита
Гематит*	Красный	Прустит	Кирпично-красный
Гетит	Желтовато-бурый	Реальгар	Оранжевый
Касситерит	Желто-коричневый, желтый	Рутил	Светло-желтый – темно-красно-коричневый
Кварц	Пестрый	Сидерит	Желтый, коричневый
Киноварь	Кроваво-красный	Сфалерит	Бело-желтый, красный, коричневый
Куприт	Красный	Хромит*	Темно-коричневый

Примечание: * – минералы, внутренние рефлексy у которых выражены слабо, иногда проявляются в воздухе, часто проявлены в масле.

Внутренние рефлексы лучше наблюдать в косом свете, т.е. когда свет от источника направлен непосредственно на полированную поверхность минерала. При косом освещении шлифа лучи, падающие наклонно, встретив на своем пути полированное сечение полупрозрачного или прозрачного минерала, частично попадут вглубь минерала, тогда как непрозрачные минералы при косом освещении будут совершенно темными.

Еще более отчетливо внутренние рефлексы проявлены в масляной иммерсии; они лучше всего заметны в небольших зернах и по краям зерен. Внутренние рефлексы рудных минералов обычно яркие, у жильных – бесцветные. У минералов с аномальной дисперсией отражения, а также у минералов с $R > 44\%$ внутренние рефлексы обычно отсутствуют.

Некоторые примеры минералов с внутренними рефlekсами перечислены в таблице 4.3.

4.2. Структурные и морфологические признаки минералов

Определяемыми признаками являются облик кристаллов, их габитус, спайность и отдельность, двойникование, зональность и характер взаимных прорастаний. Перечисленные признаки минералов, главным образом, зависят от их кристаллической структуры и особенностей роста.

4.2.1. Форма кристаллов

Для характеристики морфологии кристаллов используют два термина – облик и габитус.

Облик (форма) – это общий вид кристалла. Кристаллы могут быть изометричными (равномерно развитыми во всех трех направлениях), удлиненными или уплощенными. Среди удлиненных кристаллов выделяют игольчатые, столбчатые, шестоватые, волосовидные; уплощенных – таблитчатые, лейстообразные, чешуйчатые и т.д.

Габитус определяет облик кристаллов по доминирующим граням и соотношению размеров кристаллов в трех его измерениях (по осям x , y , z). Так, кристаллы пирита почти всегда изометричные, но по преобладающим граням их габитус может быть разным – гексаэдрическим (кубовидным), пентагон-додэкаэдрическим, октаэдрическим [Булах и др., 2008].

Принятые в минералогии термины, описывающие морфологию кристаллов, могут быть использованы в рудной микроскопии и существенно помогают при диагностике минералов (табл. 4.4).

При работе с полированными препаратами следует помнить, что наблюдаемое изображение характеризует плоское двумерное сечение, которое редко отражает истинные размеры и форму зерен.

Понятие о плоских сечениях. Изображения, получаемые на минералогических образцах, могут быть очень сложными. Создание объемной картины, а также решение вопроса о габитусе и структуре, требует анализа серии сече-

Типичные формы некоторых рудных минералов (по [Юшко, 1971])

Морфология	Минерал
Изометричные формы	Галенит, пирит, хромит, шпинель, магнетит
Игольчатые	Гематит, антимонит, джемсонит, рутил
Лейстообразные	Ильменит, гематит
Таблитчатые	Ковеллин, молибденит, графит, гематит

ний. Методом определения трехмерных особенностей минералов является метод *стереологии*. В этом случае из образца изготавливается серия параллельных последовательных сечений. Результаты изучения отдельных сечений используются для реконструкции трехмерной структуры. Этот метод очень трудоемкий, особенно когда изучаемая деталь мала и требует изготовления очень тонких срезов.

Гораздо большее распространение в рудной микроскопии имеет метод *случайных сечений*. Метод заключается в исследовании небольшого числа сечений, случайно вырезанных из образца породы. Применительно к текстурно ориентированным образцам может использоваться метод *взаимно-перпендикулярных сечений*.

Все разнообразие форм кристаллов, с которым приходится встречаться при макроскопическом изучении минералов, можно увидеть и в полированных шлифах и в аншлифах. При описании форм используется одинаковая терминология. Некоторые минералы развиваются в виде хорошо образованных, или *идиоморфных* (эвгедральных) кристаллов (например, пирит, арсенопирит, магнетит, гематит, вольфрамит). Для других более типичны *ксеноморфные* (ангедральные) формы (например, халькопирит, борнит, тетраэдрит). *Гипидиоморфные* зерна характеризуются частичной огранкой. Следует учитывать, что наблюдения идут в плоских сечениях. При этом куб может давать прямоугольники, равносторонние и прямоугольные треугольники, восьмиугольники; гексагональная призма, срезанная параллельно оси c – прямоугольники, квадраты. Отсюда вытекает необходимость наблюдения ряда сечений.

4.2.2. Спайность и отдельность

Спайность – это способность минералов раскалываться с образованием плоской зеркальной поверхности по определенным кристаллографическим направлениям, соответствующим наиболее слабым связям в кристаллической решетке минерала и обычно параллельным реальным граням его кристаллов [Булах и др., 2008]. Бывает весьма совершенной, совершенной, средней (или ясной), несовершенной (отсутствовать). Принято указывать

направление, в котором спайность проходит в кристалле (по кубу, октаэдру, ромбоэдру и т.д.).

Отдельность минералов – это способность кристаллов или кристаллических зерен минералов раскалываться по некоторым более или менее параллельным плоскостям. От спайности минералов отдельность минералов отличается тем, что раскалывание происходит в местах проявления неоднородности структуры минералов. Плоскостями отдельности могут служить границы двойникования, возможные трещины скольжения, возникающие при механической деформации кристаллов, плоскости, обусловленные микровостками другого минерала, и т.д. (рис. П.7а, прил. 6). Отдельность наблюдается у гематита, пирита, магнетита и др. В отличие от спайности отдельность проявляется по всему кристаллу, а трещины более грубые [Булах и др., 2008].

В полированных шлифах спайность и отдельность обычно проявлены слабо. Выражаются одной или несколькими системами параллельных трещин различной отчетливости. В зависимости от числа плоскостей спайности или отдельности, присутствующих в минерале, ориентировки по отношению к полированной поверхности, обнаруживается от одной до трех систем трещин. Если имеется три или более направлений спайности, могут возникать треугольники выкрашивания (обнаруживаются у галенита, иногда магнетита, алтаита, сфалерита, пентландита, виоларита и др.) (рис. П.7б, прил. 6). Они обусловлены обычно спайностью по кубу, октаэдру или додекаэдру.

Спайность по призме дает ромбовидные, треугольные, прямоугольные углубления, а спайность по пинакоиду или призме – серию параллельных трещин. Как спайность, так и отдельность являются ненадежным критерием для диагностики, т.к. в идеально приготовленных шлифах спайность может не выявляться. Чем меньше размер зерен, тем менее вероятно проявление спайности. Спайность или отдельность хорошо выявляется при природном или лабораторном окислении, травлении или механических воздействиях (например, при измерении твердости).

4.2.3. Двойникование

Двойникование – это образование в монокристалле областей с закономерно измененной ориентировкой кристаллической структуры. Структуры двойниковых образований являются либо зеркальным отражением атомной структуры материнского кристалла (матрицы) в определенной плоскости (плоскости двойникования), либо образуются поворотом структуры матрицы вокруг кристаллографической оси (оси двойникования) на некоторый угол [Краснова, Петров, 1997]. Двойниками называются сростки из двух или более кристаллов с закономерной ориентировкой (рис. П.7в, прил. 6). Среди двойниковых сростаний можно выделить три типа двойни-

ков – двойники срастания, прорастания и полисинтетические двойники. Если однородность структуры монокристалла нарушена многочисленными двойниковыми образованиями, то его называют полисинтетическим двойником.

По способу образования двойники делятся на ростовые и механические.

Зарождение будущего двойникового сростка в ходе нормального роста кристалла происходит в результате дефектов упаковки, а также при срастании соседних зародышей.

Механические двойники образуются под влиянием механических нагрузок, а также при переходе одной полиморфной модификации в другую. Образование механических двойников является бездиффузионным процессом изменения структуры и сопровождается появлением частичных двойнивающих дислокаций, штриховки на гранях, или даже переориентировки части кристалла в двойниковое положение. Двойники деформаций (рис. П.7г, прил. 6) встречаются в виде пластинок одинаковой ширины, часто сопровождаются изгибами, катаклизом и частичной перекристаллизацией (участки очень мелких изометрических зерен), пластинки нередко проходят через соседние зерна [Крейг, Воган, 1983].

Под микроскопом ростовые и механические двойники не всегда различимы. В полированных шлифах кристаллографические направления часто неопределимы вследствие ксеноморфизма зерен или невозможности установления ориентировки кристаллографических осей.

Двойникование не всегда заметно в плоскополяризованном свете. В изотропных кристаллах обнаруживается по изменениям ориентировки спайности или линейных зон включений. В анизотропных минералах части двойника различаются по цвету и по-разному гаснут в скрещенных николях. В случае отсутствия видимых признаков двойникования, его можно попытаться обнаружить посредством травления.

Для ряда минералов, таких как сфалерит, халькопирит, раммельсбергит, двойникование является диагностическим признаком.

4.2.4. Зональность

Зональность проявляется в изменении цвета, твердости, показателя отражения, содержания включений и т.д. Зональность может быть следствием [Бетехтин и др., 1958]:

- 1) Перерывов в кристаллизации;
- 2) Изменения скорости роста;
- 3) Кристаллизации минералов-включений в определенные стадии роста основного кристалла;
- 4) Небольших или значительных изменений состава среды минералообразования.

В некоторых случаях зональность заметна в поляризованном свете благодаря цветовым контрастам между зонами или зонально расположенными

физическими неоднородностям и включениями (рис. П.7д, прил. 6). В других случаях зональная структура видна только в скрещенных николях. Часто для выявления зональности необходимо провести химическое травление. Зональное строение обнаруживается у множества минералов, например, пирита, галенита, сфалерита, антимонита, кобальтина, сафлорита, арсенопирита и др.

4.2.5. Включения и сростания

В кристаллах часто присутствуют включения, которые можно разделить на первичные и вторичные.

Первичные включения могут быть захвачены в ходе прямой кристаллизации из расплава или раствора, представлять собой закристаллизованные реликты минералообразующей среды, а также являться вростками одновременно кристаллизующихся (сингенетических) минералов (см. рис. П.7д, прил. 6). Распределение первичных включений может способствовать проявлению зональности роста.

Вторичные включения возникают в результате воздействия на минерал более поздних процессов (рис. П.7е, прил. 6), чаще всего – из-за распада твердого раствора в результате понижения температуры и давления. При этом первично гомогенный минерал распадается на две и более компоненты, обычно с закономерно ориентированными кристаллическими решетками. Вторичные включения также могут отражать воздействие на ранее сформированный минерал более поздних (*эпигенетических*) минералообразующих растворов, в результате чего новообразованные минералы формируют цепочки, мельчайшие жилки, заполняющие трещины спайности или отдельности.

4.3. Физические признаки минералов

Важнейшим физическим признаком рудных минералов является твердость, с ней тесно связаны прочность и склонность к полировке. Для изучения структур некоторых руд используются магнитные свойства минералов. Иногда применяются специализированные исследования электрических свойств минералов – электропроводности и термоЭДС.

4.3.1. Твердость

Твердость минерала – это способность сопротивляться внешним механическим воздействиям. Твердость зависит от типа химических связей в кристаллической решетке, степени ее дефектности, а также от кристаллографического направления сечения минерала. Твердость проявляется по-разному для различного типа нагрузок. Так, твердость при ударе, царапании и медленном сдавливании может различаться, что затрудняет количественное измерение этого свойства.



История наблюдения твердости минералов насчитывает много веков. Еще в 1530 г. *Агрикола* в книге «Берманус» упоминал, что галенит можно отличить от самородного висмута по твердости. Первая относительная шкала твердости была предложена немецким минералогом *Фридрихом Моосом* в 1811 г. и до сих пор используется минералогами. В 1936 г. металлургами была разработана методика микроскопического определения твердости вдавливания, а немного раньше склерометрическая методика определения твердости царапанием. Твердость, измеренную методом вдавливания наконечника, принято называть микротвердостью, поскольку твердость при использовании этого метода определяется в ограниченной области.

Практика рудной микроскопии использует три метода определения твердости минералов.

Метод царапания базируется на использовании стальной иглы, укрепленной в специальном деревянном держателе. Техника измерения состоит в следующем. Объектив с достаточно большим свободным расстоянием фокусируют на зерно. Конец иглы вводят в поле зрения. Удерживая иглу под углом к поверхности, проводят ею поперек зерна.

Ж. Мердох [Murdoch, 1916] разделяет минералы на мягкие (царапаются при легком надавливании или под собственным весом иглы, например, галенит, молибденит), промежуточной твердости (царапаются при умеренном давлении – халькопирит, сфалерит, теннантит), твердые (царапаются с трудом или не царапаются совсем, например, пирит, гематит).

С.Б. Талмейджем [Talmage, 1925] было предложено использование специального прибора *микросклерометра*, предназначенного для проведения точных измерений давления, необходимого для того, чтобы алмазное острие оставило на полированной поверхности царапину стандартного характера. Талмейдж выделил 7 степеней твердости: А – аргентит, В – галенит, С – халькопирит, D – тетраэдрит, Е – никелин, F – магнетит, G – ильменит. Прибор Талмейджа дорог, поэтому метод не стал стандартным. Однако во многих справочниках твердость по Талмейджу приводится.

М. Шорт [Шорт, 1934] на основании испытания иглой выделяет твердые и мягкие минералы.

Метод определения относительной твердости полировки (сопротивление истиранию) основан на свойстве твердых минералов истираться в процессе пробоподготовки более медленно, чем мягких. Рельеф, который характерен для обычного аншлифа, позволяет оценить относительную твердость двух расположенных рядом минералов. Для этого фокусируют объектив на ясную резкую границу между зернами, частично прикрывают апертурную диафрагму. Из-за того что в области контакта минералов падающий свет отражается не вертикально вверх, возникает световая полоска, которую называют *полоской Кальба* (рис. 4.3). Световая полоска будет двигаться в сторону мягкого минерала при медленном увеличении расстояния между фронтальной линзой объектива и препаратом.

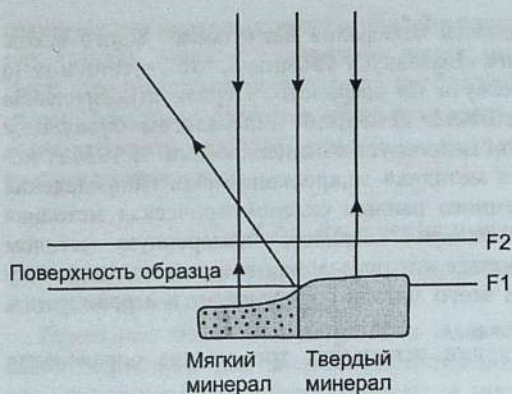


Рис. 4.3. Поперечное сечение поверхности полированного шлифа, объясняющее возникновение полоски Кальба на границе двух минералов различной твердости. По [Крейг, Воган, 1983].

F_1 – фокальная область в фокусе, F_2 – фокальная область во время дефокусировки

Кнупа, Бринелля), либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла). Микротвердость измеряется под микроскопом с использованием специальных приборов.

По имени исследователей, предложивших использовать ту или иную форму индентора, различают методы определения микротвердости:

В методе Виккерса индентор изготавливается из алмаза и характеризуется квадратным основанием. Каждая пара противоположенных граней образует угол 136° . Отпечаток – квадрат, диагональ которого в 7 раз больше глубины (рис. 4.4).

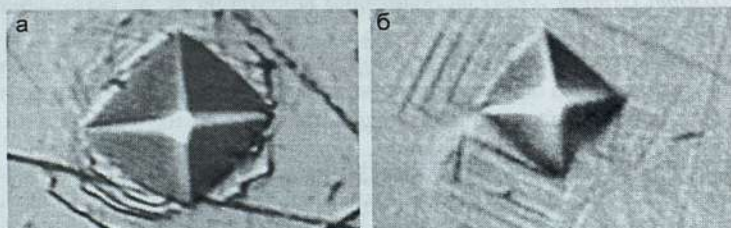


Рис. 4.4. Отпечатки пирамидки Виккерса:

а) прямосторонний с концентрической трещиноватостью в медистом кервеллите $(Ag,Cu)_2(S,Te)_3$; б) слабовыпуклый с трещинами спайности в борните. Бабарыкинское рудопроявление, Южный Урал

Метод микротвердости основан на воздействии на поверхность минерала наконечника (индентора), изготовленного из малodeформирующегося материала (алмаз, твердая закаленная сталь, твердый сплав) и имеющего форму пирамиды, конуса или шарика. Индентор приводится в соприкосновение с зерном, и к нему прикладывается определенная нагрузка (от 0,1 до 500 г), после чего нагрузка снимается и проводится измерение отпечатка. О твердости судят либо по величине (диагонали) отпечатка от вдавливания (методы Виккерса,

Микротвердость по Виккерсу (VHN) определяется по формуле:

$$\text{VHN (кг/мм}^2\text{)} = 1854,4 \times P/d^2, \quad (13)$$

где d – среднее значение диагонали, P – нагрузка на индентор.

В методе *Кнупа* индентор – пирамида, две противоположенные грани которой образуют угол 130° , а две другие – $172^\circ 30'$. Отпечаток такой пирамиды имеет длинную диагональ приблизительно в 7 раз больше короткой и в 30 раз превышает глубину вдавливания. Оба типа инденторов могут применяться в зернах с минимальным размером 0,01 мм.

Микротвердость по Кнупу (KV) вычисляется по следующей формуле:

$$\text{KV (кг/мм}^2\text{)} = 14230 \times P/L^2, \quad (14)$$

где P – нагрузка, г; L – длинная диагональ отпечатка.

В методе *Бринелля* индентор представляет собой шарик из закаленной стали. Диаметр сферического отпечатка измеряют с точностью до 0,05 мм (при вдавливании шарика диаметром 10 и 5 мм) в двух взаимно перпендикулярных направлениях; для определения твердости следует принимать среднее из полученных величин. Толщина измеряемого слоя (или образца) должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

Микротвердость по Бринеллю (HB):

$$\text{HB} = P / \pi D/2(D - \sqrt{D^2 - d^2}), \quad (15)$$

где P – нагрузка на шарик, кг·с (1 кг·с – 0,1 Мпа); D – диаметр вдавливаемого шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм. Число твердости по Бринеллю записывают без единиц измерения. На практике при измерении твердости расчет по указанной формуле не проводят, а используют таблицы.

Микротвердость по Роквеллу (HR) определяют, главным образом, в металлах и измеряют в условных единицах. Отличительной особенностью этого метода является постадийная нагрузка – сначала с меньшим грузом, затем с большим, что косвенно позволяет оценить меру упругой реакции металла на нагрузку. В минералогии практически не применяется. *Индентор Роквелла* представляет собой алмазный конус или шарик. В отличие от рассмотренного выше способа измерения, твердость определяют по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании, а не по площади отпечатка.

В металлографии также пользуются динамическими методами измерения твердости, в которых мерой твердости является высота отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого металла (например, *метод Шора*) или время затухания колебания маятника, опорой которого является исследуемый металл (*метод Кузнецова – Герберта – Ребиндера*). Получает распространение метод измерения твердости металлов с помощью

ультразвуковых колебаний, в основе которого лежит измерение реакции колебательной системы (изменения её собственной частоты) на твёрдость испытуемого металла.

Помимо абсолютного значения микротвердости информационную нагрузку несут форма отпечатка и характер трещиноватости, возникающий вокруг отпечатка. Пирамидка Виккерса может оставлять отпечатки прямой, боковой (см. рис. 4.4а), выпуклой (см. рис. 4.4б), вогнутой и сигмоидальной формы; кроме того, могут образовываться и комбинированные отпечатки.

Вокруг отпечатка часто возникают трещины. В зависимости от природы они разделяются на:

- трещины разрыва (обычно радиальные) – начинаются либо от сторон, либо от углов отпечатка;
- трещины спайности – различные системы прямых параллельных трещин, соответствующие направлениям спайности;
- трещины отдельности – прямые или слегка изогнутые, напоминающие трещины спайности, но менее четкие.

Анизотропия твердости минералов – это проявление в кристалле неодинаковой твердости по различным кристаллографическим направлениям. Все наблюдаемые явления неодинаковой твердости в минералах делятся на два типа: 1) анизотропия твердости I рода – различная твердость по разным кристаллографическим направлениям при исследовании в одной плоскости минерала; она выражается в искаженной форме фигуры отпечатка, приближающейся к ромбу, а соответственно и в разных числовых значениях микротвердости; 2) анизотропия твердости II рода – различная твердость, наблюдаемая при исследованиях на разных гранях или сечениях одного кристалла. Для количественной оценки анизотропии твердости рассчитывается коэффициент анизотропии:

$$K_{\text{VHN}} = \text{VHN}_{\text{max}} / \text{VHN}_{\text{min}}, \quad (16)$$

где VHN_{max} и VHN_{min} – максимальное и минимальное значение микротвердости, полученные для данного минерала на различных сечениях и гранях или по различным направлениям в одном сечении.

Микротвердость в этом случае не может быть выражена одним числом, она должна быть охарактеризована пределами колебаний микротвердости, средним арифметическим VHN_{cp} и коэффициентами анизотропии твердости K_{VHN} .

В тех случаях, когда измерение микротвердости производится на гранях кристаллов или на кристаллографически ориентированных срезах, среднеарифметическое значение микротвердости рассчитывается для каждого кристаллографического направления. При исследовании минералов с $K_{\text{VHN}} \sim 1,12-1,2$ среднеарифметическое значение VHN_{cp} вычисляют на основании 9–13 замеров и по возможности на различных зернах (срезах) одного

минерала. Если минерал существенно анизотропен ($K_{VHN} > 1,2$), статистическая выборка должна содержать не менее 30–35 замеров.

Для стандартизации условий измерения микротвердости Международной минералогической ассоциацией в 1966 г. принято, что размер диагонали отпечатка должен быть стандартным. Руководствуясь этим принципом, разработаны следующие условия измерения:

1) Нагрузку подбирать в соответствии с классом твердости и размерами зерен минералов, а в публикациях указывать ее массу;

2) Стандартным считать размер диагонали отпечатка, который должен по возможности находиться в пределах 20–25 мкм (для хрупких минералов нижний предел может быть снижен до 15 мкм);

3) Количество измерений на одном минерале не строго регламентировано: для анизотропных – в зависимости от величины коэффициента анизотропии K_{VHN} изменяется от 7 до 15 и более;

4) Время опускания алмазной пирамидки и выдержки пирамидки на образце во время вдавливания составляет 5–15 сек.

Аппаратуру для определения микротвердости можно подразделить на два типа: самостоятельные приборы – микротвердомеры и приспособления к серийным микроскопам (насадки типа МНТ-10, Carl Zeiss).

Микроскопы-микротвердомеры ПМТ-3 и ПМТ-3М фирмы ЛОМО (г. Санкт-Петербург) предназначены для измерения микротвердости минералов методом вдавливания в испытуемый материал алмазного наконечника Виккерса или Кнупа (рис. 4.5а). Новые версии микротвердомеров фирмы Лесо (США) сочетают в себе механическую, оптическую и электронную технику (рис. 4.5б). Универсальные микроскопы-микротвердомеры серии Duramin фирмы Struers, позволяют измерять микротвердость по методам Роквелла, Бриделя и Виккерса. Дополнительными возможностями является наличие электронного измерительного устройства, автоматического определителя длины диагоналей отпечатка, автоматической системы смены нагрузок, автоматического преобразования значений твердости по Виккерсу в другие единицы твердости (HR, HB), а также расчет статистических величин (min, max, среднее значение, среднеквадратическое отклонение).

Прочность минералов обнаруживается при царапании иглой. Большинство рудных минералов дают порошок. Если минерал пластичный, получается стружка, если ковкий и вязкий – игла оставляет желобок с валиком по краям. Одновременно можно наблюдать *цвет порошка*, получаемый при царапании (наблюдается в скрещенных николях при объективе с небольшим увеличением). Минералы с внутренними рефлексами дают окрашенный порошок.

Твердость и прочность минералов зависит не только от их конституции – совокупности химического состава и кристаллической структуры, но и от

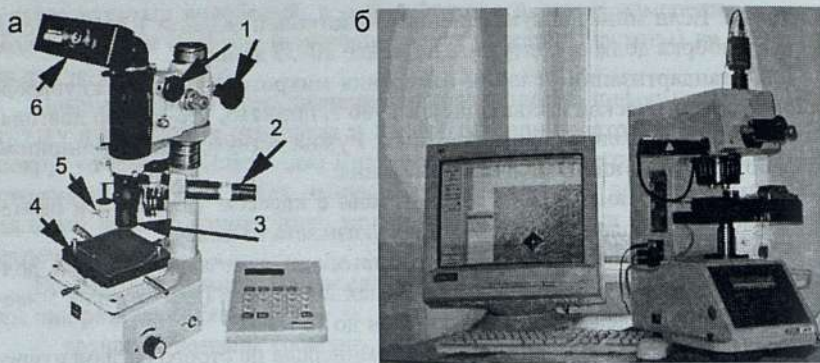


Рис. 4.5. Микротвердомеры:

- а) ПМТ-3М: 1 – винты фокусировки, 2 – осветитель, 3 – объектив, 4 – предметный столик, 5 – индентор, 6 – фотоэлектрический окуляр-микрометр;
 б) М-400-Н с программным обеспечением

дефектности кристаллов. Из-за этого твердость реальных минералов может варьировать, что находит отражение и в диагностических таблицах, где чаще всего даются минимальное и максимальное значения микротвердости для данного минерала.

Твердость минералов, представляющих собой твердые растворы, изменяется в зависимости от состава и может служить для качественной оценки химического состава. Например, минералы ряда колумбит-танталит в соответствии с химическим составом и значениями микротвердости были разделены на четыре группы (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Микротвердость минералов ряда колумбит-танталит (по [Лебедева, 1963])

Минералы	Содержание Ta_2O_5 , мас. %	Содержание Nb_2O_5 , мас. %	Микротвердость, $кг/мм^2$
Колумбиты	1–12	60–80	240–640
Тантало-колумбиты	12–40	40–60	420–900
Ниобо-танталиты	40–60	20–40	635–930
Танталиты	60–80	1–20	700–1070

4.3.2. Электропроводность

При детальном исследовании сульфидных руд, направленных на прогноз их технологических свойств, широко используется определение термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС).

Если в проводящем кристалле возникает градиент температуры, то в тех участках, где температура выше, увеличиваются число свободных носителей (электронов или дырок) и их кинетическая энергия. Если одна часть кристалла будет нагрета по отношению к другой, то свободные носители будут диффундировать из горячей области в холодную. Такое перемещение заряженных частиц приведет сравнительно быстро к избытку положительных зарядов в одних участках кристалла и отрицательных в других, что влечет за собой образование внутреннего электрического поля. По мере роста зарядов возрастает разность потенциалов между нагретой и холодной частями кристалла. Увеличивающееся электрическое поле будет постепенно замедлять диффузию носителей тока, что в конечном итоге приведет к установившемуся равновесию: потоки зарядов в обоих направлениях сравняются. Возникшая при этом разность потенциалов и называется термоэлектродвижущей силой кристалла (термо-ЭДС). Если носители тока имеют положительный заряд (дырки), то термо-ЭДС также имеет положительный заряд, а заряд у горячей части кристалла будет отрицательным. Если носителями тока в кристалле служат электроны, то знак термо-ЭДС – отрицательный, а заряд в горячей части кристалла будет положительным. Таким образом, используя термоэлектрический эффект можно четко разделить дырочный и электронный механизмы проводимости полупроводника. В случае смешанной или собственной проводимости знак и величина коэффициента термо-ЭДС определяются несколькими факторами, среди которых главное значение имеют подвижность и концентрация носителей зарядов. Поэтому для полупроводника со смешанным типом проводимости коэффициент может быть как положительным, так и отрицательным, а его величина, как правило, бывает меньше, чем у полупроводника с преимущественно одним типом проводимости.

Коэффициент термо-ЭДС зависит от химического состава минералов, количества примесей в них и изменяется с повышением или понижением температуры. Для измерения коэффициента термо-ЭДС рудных минералов предложены различные установки, отличающиеся, в основном, конструкцией датчиков, приспособленных к работе со штучными, полированными шлифами (рис. 4.6) и отдельными зернами. Метод изучения термо-ЭДС на геологических образцах не стандартизирован.

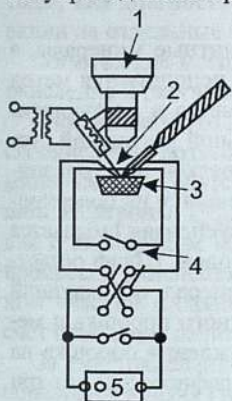


Рис. 4.6. Блок-схема установки для измерения коэффициента термо-ЭДС минералов в полированных шлифах. По [Розова, 1970]:

1 – объектив микроскопа; 2 – датчик; 3 – образец; 4 – переключатель полярности; 5 – милливольтметр постоянного тока

Определение величины коэффициента термо-ЭДС и электропроводности рудных минералов способствует выделению генераций минералов на отдельных месторождениях, определению характера распределения примесей в отдельных зернах минералов или их агрегатах, выявлению горизонтальной и вертикальной зональности оруденения.

4.3.3. Магнитность

Минералы в зависимости от поведения в магнитном поле разделяются на немагнитные и магнитные. Немагнитные (диа- и парамагнетики) не обладают собственным магнитным моментом, тогда как магнитные (ферро- и ферримагнетики) – обладают и способны притягивать стальную стружку.

Магнитность минералов в полированных шлифах определяют с помощью магнитной стрелки и намагниченной стальной иглы. Если магнитный минерал в шлифе наблюдается в виде микроскопических выделений или имеется несколько магнитных минералов, то магнитность каждого определяется по магнитности порошков. Если порошок минерала обладает магнитными свойствами, он будет прилипать к подведенному к нему концу магнитной стрелки или острию намагниченной иглы. Определение магнитности порошка ведется под микроскопом при малых и средних увеличениях.

Определять магнитность мелких включений минералов под микроскопом позволяет микромагнит Мак-Кинстри. Он представляет собой намагниченное ушко швейной иглы, приклеенное к концу упругого черного конского волоса длиной 10 см. Другой конец волоса прикрепляют на штативе. Прибор устанавливают так, чтобы микромагнит был в поле зрения микроскопа в 1–2 мм от полированной поверхности шлифа. Чувствительность прибора достаточна для зерен магнетита и пирротина размером 0,2 мм в диаметре.

Для мелких магнитных фаз, вкрапленных в немагнитные минералы, а также для выявления структур магнитных минералов, используется метод магнитной порошкографии. Сущность метода заключается в следующем. На поверхность полировки помещают каплю специальной магнитной суспензии, которую наносят пипеткой или стеклянной лопаткой при горизонтальном положении столика микроскопа. Она выдерживается на поверхности шлифа 1–2 мин., после чего шлиф наклоняется и суспензия смывается несколькими каплями спирта или дистиллированной водой. Шлиф остается в наклонном положении до полного высыхания. Минерал, обладающий магнитными свойствами, покрывается пленкой магнитного порошка и меняет цвет. При необходимости фиксации картины осаждения порошка на минерале, выбранный участок шлифа следует фотографировать два-три раза: первые снимки делаются до покрытия порошком в скрещенных и параллельных николях; третий – после покрытия магнитным порошком.

В качестве магнитного порошка для приготовления суспензии может быть использован чистый магнетит или порошки типа НЦ-400, Ф-600, Ф_к-600. При изготовлении суспензии пользуются следующей методикой: вначале приготавливают концентрированный мыльный раствор, к которому добавляют тонкодисперсный магнитный порошок; смесь взбалтывают. Состав мыльной суспензии: вода 10 мл, тонкодисперсный магнитный порошок 0,1 г, мыло в количестве, необходимом для образования устойчивой пены.

Метод порошкографии широко применяется при определении структуры минералов, обладающих естественной намагниченностью, т.е. ферро- и ферримангнетиков [Грабовский, Жерденко, 1963]. К таким минералам относятся: оксиды железа (магнетит, маггемит, мушкетовит), титаномагнетиты, якобит, франклинит, хромит, некоторые шпинели, минералы группы платины, троилит, пирротин, кубанит, валлериит, минералы группы вольфрамита.

Метод магнитной порошкографии позволяет проявить тонкие структуры сростания магнитных и немагнитных блоков пирротина. В отличие от сильномагнитного магнетита, пирротин покрывается порошком не полностью, иногда по контурам зерен, вдоль трещин спайности и отдельности (рис. П.8, прил. 6). Различные порошковые фигуры в пределах одного зерна свидетельствуют о магнитной неоднородности пирротинов [Грабовский, Жерденко, 1963; Чвилева и др., 1988].

4.4. Химические признаки минералов

Химические признаки минералов обусловлены их кристаллической структурой и химическим составом. В лабораторной практике при диагностике минералов в отраженном свете применяются такие химические методы, как диагностическое и световое травление, а также химические реакции на отдельные элементы, присутствующие в минералах.

Химические методы диагностики минералов основываются на реакциях окисления и растворения.

Окисление – это потеря электронов окисляющимся веществом. Процессы окисления возможны в том случае, когда элементы, входящие в состав минералов, находятся не в высшей степени окисления, т.е. способны отдавать электроны. Рудные минералы могут окисляться за счет взаимодействия с кислородом воздуха, а также с другими окислителями. Множество процессов окисления протекает при катализирующем или непосредственном участии микроорганизмов. При этом бактерии получают энергию за счет окисления железа, марганца, серы.

За счет окисления на поверхности некоторых сульфидных минералов образуется тонкая (толщиной в тысячные доли миллиметра) цветная пленка – побежалость (рис. П.9а–в, прил. 6). В результате окисления на поверхности минералов проявляются морфологические особенности – ростовые

формы с нечеткими размытыми границами, которые возможно установить при определенной настройке резкости. Ранее для выявления структуры халькопирита применяли следующую методику: полированный шлиф обратной стороной опускали в воду примерно наполовину и оставляли его в таком положении на сутки. В результате халькопирит покрывался цветной пленкой, подчеркивающей структуру минерала.

Растворение – это разъедание поверхности минерала под действием различных химических реактивов. При воздействии на аншлиф какого-нибудь растворителя происходит растворение поверхностного слоя и часто обнаруживается структура минерального агрегата (рис. П.9г, прил. 6); дальнейшее действие растворителя выражается в различной степени разъедания поверхности, уничтожающего выявленную структуру [Юшко, 1984].

4.4.1. Диагностическое травление

С помощью диагностического травления выявляют некоторые диагностические признаки (например, двойникование) и структуры рудных минералов.

Сущность метода заключается в различном отношении минералов к воздействию химических реагентов на их поверхность.

Методика травления. На зерно исследуемого минерала капают реактив, выдерживают, смывают и под микроскопом наблюдают реакцию. Реактив, применяемый для определения минерала, должен отвечать следующим требованиям: 1) действовать быстро и сильно; 2) не давать с исследуемым минералом труднорастворимых солей, маскирующих результаты реакций; 3) действовать по возможности одинаково на различные кристаллографические плоскости исследуемого минерала; 4) быть химически чистым. Таким требованиям отвечают: HNO_3 , HCl , KCN , FeCl_3 , HgCl_2 , KOH и NaOH [Юшко, 1984]. Перечисленные реактивы были использованы некоторыми исследователями при построении определительных таблиц. Результаты диагностического травления отражены в определительных таблицах справочников-определителей минералов [Юшко, 1984; Чвилева и др., 1988].

Для проведения диагностического травления поверхность зерна должна быть чистой, хорошо отполированной. Обычно используются объективы малого увеличения.

Реакция с испытуемым минералом может быть затруднена, в случае если он заключен среди минералов, более легко поддающихся травлению этим реактивом. Поэтому для диагностики минералов химическое травление применяется как дополнительный метод.

Иногда наряду с растворением минерала образуются осадки, покрывающие его поверхность. Эти осадки наблюдаются под микроскопом в виде ирризирующих пленок (желтой, красной, зеленой, синей и др.) и могут

быть использованы для диагностических целей. Окраска пленок изменяется в зависимости от их толщины, которая обусловлена интенсивностью и продолжительностью реакций. Для некоторых минералов окраска ирризирующей пленки или побежалости – хороший диагностический признак. Например, она характерна для борнита, халькопирита, ковеллина, лимонита и марказита. Примеры этих минералов с побежалостью, меняющей цвета от золотисто-желтого и зеленого до розового красного, синего и фиолетового приведены на рис. П.9а–б, прил. 6.

Ирризирующая пленка может образовываться и в том случае, если капля реактива удалена не полностью и на поверхности минерала происходит испарение оставшегося раствора. Для проверки необходимо на это место капнуть воды, которая переведет в раствор соль, образующуюся при высыхании реактива.

Положительными считаются такие реакции, при которых после снятия капли и промывания водой на полированной поверхности минерала остается след в виде структуры, шероховатой поверхности, ирризирующей пленки; отрицательными – те реакции, от которых следов не остается.

4.4.2. Световое травление

Некоторые минералы серебра травятся под воздействием интенсивного освещения.

Сущность анализа. Травление является в этом случае следствием восстановления серебра до самородного металла, который выделяется в виде крошечных частиц или округлых зерен на поверхности шлифа.

Методика травления. При световом травлении применяется сильный источник света (дуговая лампа или низковольтная лампа с вольфрамовой нитью) и объектив с небольшим увеличением. Травление начинается с появления на поверхности шлифа отдельных мелких пятнышек. Затем их количество возрастает, и полированная поверхность быстро «портится». В случае травления аргентита процесс идет очень быстро, и, если возникает необходимость изучить этот минерал при большом увеличении, нужно тщательно контролировать интенсивность освещения, чтобы предотвратить световое травление. *М. Стефенс [Stephens, 1931]* показал, что травление в одних случаях связано только с освещением, в других же зависит от теплового эффекта, вызываемого светом.

Световому травлению наиболее подвержены следующие минералы серебра: андорит, аргентит, колорадоит, кераргерит, гессит, ялпаит, полибазит, пирсеит, прустит, пираргирит, стефанит, штромейерит и стефанит. Однако интенсивность светового травления различных минералов может отличаться. *К. Стенли* проводил опыты с травлением кервеллита, акантита и гессита из месторождения Бамбулла, где кервеллит образует каемки вокруг акантита в гессите. Через 45 мин. травления на акантите появляются

ся черные точки, отражение кервеллеита падает и начинает изменяться гессит. Через 90 мин. акантит становится совсем черным, кервеллеит не изменяется, в то время как гессит интенсивно изменяется на контакте с кервеллеитом. Через 24 часа травления акантит остается черным, кервеллеит становится похожим на неизмененный акантит, а гессит становится равномерно темным.

4.4.3. Методы химического анализа

Определение в минералах различных химических элементов проводится с помощью кристаллоскопических, капельных, пленочных анализов и реакции по методу отпечатков. Определение качественного химического состава руды или отдельных рудообразующих минералов возможно с помощью фазового анализа, основанного на реакциях по методу отпечатков.

Выбор реакции при проведении химических испытаний зависит от минеральной формы искомого элемента в руде, а также минеральной ассоциации. Поэтому для каждого элемента проводится не одна, а несколько специфичных реакций, чтобы подобрать наиболее подходящую реакцию.

Кристаллоскопический анализ способствует определению в испытуемом растворе одного или нескольких элементов.

Методика анализа. Минерал травят в HNO_3 , HCl или царской водке (смесь HNO_3 и HCl). Затем каплю полученного раствора переносят на предметное стекло. В раствор вводят соответствующие реактивы, вызывающие осаждение солей искомого элемента в виде кристаллов. Искомый элемент определяют по цвету и особенностям кристаллической формы.

Пример анализа на золото. Минералы золота (теллуриды) растворяют в HCl (конц.) или царской водке. Раствор пипеткой переносят на предметное стекло и выпаривают досуха, после чего накладывает капля SnCl_2 . Выпадает металлическое золото или образуется коллоидальное золото с $\text{Sn}(\text{OH})_2$.

Капельный анализ основан на различии скоростей диффузии растворенных веществ, которые адсорбируются фильтровальной бумагой, задерживаясь в ее капиллярах. Благодаря этому при нанесении капли на фильтровальную бумагу увеличивается концентрация растворенного вещества в соответствующих участках влажного пятна на фильтровальной бумаге.

Методика анализа. Каплю испытуемого раствора и реактива помещают на фильтровальную бумагу, нарезанную в виде полосок размером 2×4 см, где искомого элемент определяют по цвету пятна. Если в результате реакции образуется легкорастворимая соль искомого элемента, то последняя уносится на периферию капли, где открывается в виде кольца. В том случае, когда в растворе имеется несколько элементов, реагирующих с одним и тем же реактивом, и искомого элемент образует нерастворимую соль, искомого элемент откладывается в центре капли или на ее периферии, где после удаления легкорастворимых элементов промыванием он выступает в виде цветного пятна или кольца.

Пример анализа на никель. Крупинку никельсодержащего минерала растирают в ступке и растворяют несколькими каплями различной концентрации HNO_3 или HCl . В испытуемый раствор добавляют диметилглиоксим и NH_4OH 10%-ный. Появляется малиновое пятно или кольцо.

Пленочный анализ основан на образовании цветных пленок на поверхности минералов [Юшко, 1984]. Прокрашивание обычно проводят на пришлифованных или полированных поверхностях образца.

Методика анализа. На исследуемый минерал для окрашивания помещают каплю реактива, выдерживают необходимое для реакции время и снимают каплю фильтровальной бумагой. На месте диагностируемого минерала образуется цветная пленка вследствие образования осадка.

Пример анализа. Установление в руде англезита. На поверхность образца накладывают каплю 5%-ного KI . По истечении одной минуты каплю снимают фильтровальной бумагой. Если в шлифе присутствует англезит, на его поверхности образуется желтая пленка.

Реакции по методу отпечатков способствуют определению химических элементов и характера их распределения в пределах полированной поверхности.

Методика анализа. К полированной поверхности аншлифа прикладывают фотографическую бумагу с желатиновым слоем, пропитанную реактивом. В результате реакции зерен искомого минерала с реактивом получается цветная карта, указывающая не только на наличие и распределение отдельных зерен минерала, содержащего искомым элемент, но и нередко на его структурные особенности [Старцев, 1994].

Пример анализа на никель. Фотографическую бумагу отпускают в фарфоровую чашку с 25%-ным раствором аммиака. Через 2–3 минуты, пинцетом извлекают бумагу из чашки, промокают фильтровальной бумагой, прикладывают к поверхности полировки и помещают под пресс на 5–6 минут. По истечении времени бумагу помещают в чашку со спиртовым 1%-ным раствором диметилглиоксима. Появляется малиновое окрашивание – это отпечаток на никель.

Метод отпечатков используется и для *фазового анализа*. Фазовый анализ применяется для выявления в руде минеральной формы химических элементов. Это осуществляется путем избирательного растворения в руде одного или нескольких минералов, близких по растворимости. Наиболее широко этот метод применим для окисленных минералов меди, железа, свинца и цинка и площадей их распространения в пределах полированных поверхностей, а также при диагностике микровключений в рудных и нерудных минералах.

Методика анализа. Исследуемая площадь пропитывается растворителем, выдерживается необходимое для реакции растворения время, затем оценивается либо площадь, занятая минералами, подвергшимися растворению, либо проводится дополнительная обработка другим растворителем,

образующим цветные продукты с искомым элементом, и оценивается интенсивность окраски на отпечатке. Для того, чтобы в полированном шлифе определить с помощью отпечатка все минеральные формы, необходимо заранее экспериментальным путем подобрать растворители и «проявители» для каждого минерала.

Пример анализа на свинец. Выявление с помощью фазового анализа минералов и площадей их распространения методом отпечатка в руде, содержащей минералы свинца (галенит, англезит и церуссит). Для установления площади распространения в руде церуссита, фотобумагу пропитывают раствором HNO_3 (1:20) и приводят в контакт с полированной поверхностью руды. По истечению 2 мин. фотобумагу обрабатывают 5%-ным раствором KI , при этом проявляются участки желтого цвета, соответствующие площади распространения церуссита. При определении площади распространения англезита фотобумагу пропитывают HNO_3 (1:1), приводят в контакт с полированной поверхностью руды и по истечению 2 мин. проявляют 5%-ным раствором KI . На фотобумаге появляются участки лимонно-желтого цвета – это отпечатки англезита.

4.5. Диагностика рудных минералов

Для диагностики минералов в отраженном свете предназначены определительные таблицы, основанные на оптических, физических и химических признаках минералов [Юшко, 1984; Крейг, Воган, 1983; Чвилева и др., 1988; Вертушков, Авдонин, 1992].

Минералы в таблицах разделены на диагностические группы, в пределах каждой из них минералы подразделяются на более мелкие группы по одному из свойств. Таким образом, в определительных таблицах выделены большие и мелкие диагностические группы. Так, по характеру анизотропии выделены две большие группы – анизотропных и изотропных минералов. В каждой из них проведено деление на три группы по степени отражения: 1) минералы, показатель отражения которых больше галенита; 2) меньше галенита, но больше сфалерита; 3) меньше сфалерита. В свою очередь, в каждой из этих групп выделены минералы по цвету (цветные и бесцветные), характеру внутренних рефлексов, твердости и микротвердости минералов.

Внутри диагностических групп для каждого минерала приведены формула и сингония, условными обозначениями показаны степень анизотропии, коэффициент отражения, цвет минерала в отраженном свете, магнитность, тип двуотражения и цвет внутренних рефлексов, твердость по Мосу и микротвердость (по [Лебедева, 1963]).

Кроме того, минералы в диагностических группах сгруппированы с учетом их химического состава (минералы меди, свинца, никеля, кобальта, марганца и т. д.). Для каждого минерала в группе приведены данные диагностического травления в виде условных обозначений.

Для определения некоторых минералов бывает достаточно определить простейшие оптические свойства, иногда требуется выяснение дополнительных свойств.

Диагностика рудных минералов начинается с изучения их оптических свойств. Цвет, отражение (R) и двуотражение (ΔR) определяют наблюдением без анализатора с объективами 9^x и 21^x в зависимости от размера зерен.

Анизотропию и внутренние рефлексы изучают в скрещенных николях с теми же объективами. Для определения анизотропии слабо анизотропных минералов николи следует слегка раскрестить поворотом поляризатора. Внутренние рефлексы лучше видны при полностью скрещенных николях, с применением масляной иммерсии и объективов большого увеличения.

Определение физических свойств минералов лучше начинать с наблюдений формы зерен (кристаллов) и внутреннего строения. Минералы могут обладать спайностью. Твердость минералов оценивается по полировке, относительному рельефу, путем царапания металлическими иглами. Магнитные свойства минералов, помимо испытания с магнитной стрелкой, рекомендуется проверить нанесением магнитной суспензии.

Результаты проведенных исследований заносят в таблицу, образец которой представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Образец записи диагностических свойств рудных минералов

№ а-шлифа	Минерал, его формула	Оптические свойства					
		Цвет	Величина отражения, R, %		Двуотражение, ΔR , %	Анизотропия	Внутренние рефлексы
			Сравнительно с эталонами	R, %			

Продолжение табл. 4.6

Физические свойства				Химические свойства		
Форма, строение зерна	Твердость			Магнитность	Диагностическое травление	Качественные реакции
	Метод царапания	Метод микровдавливания	Метод Кальба			

Примечание: Данная форма записи рекомендована сотрудниками кафедры геологии месторождений полезных ископаемых геологического факультета СПбГУ [Методические..., 1989].

Ниже приведены схемы, которые позволят облегчить диагностику изучаемого минерала (табл. 4.7, 4.8).

Схема идентификации минералов в аншлифах по окраске
(по [Старцев, 1994])

ОТЧЕТЛИВО ОКРАШЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ		
Цвет минерала	Анизотропия	Минерал
Синий	Изотропный (или слабо анизотропный)	Халькозин, дигенит
	Анизотропный	Ковеллин
Желтый	Изотропный (или слабо анизотропный)	Золото, халькопирит
	Анизотропный	Халькопирит, миллерит, кубанит, макинавит, валлериит
Красно-коричневый	Изотропный (или слабо анизотропный)	Борнит, медь
	Анизотропный	Валлериит, идаит, моусонит
Розовый, пурпурный, фиолетовый	Изотропный (или слабо анизотропный)	Борнит, медь, виоларит
СЛАБО ОКРАШЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ		
Голубой	Изотропный	Тетраэдрит
	Анизотропный	Гематит, куприт, киноварь, гаусманит, прустит, пираргирит
	Анизотропный	Псиломелан
Зеленый	Изотропный (или слабо анизотропный)	Тетраэдрит, акантит
	Анизотропный	Станин
Желтый	Изотропный	Пирит, пентландит
	Анизотропный	Марказит, никелин
Красно-коричневый до коричневого	Изотропный	Магнетит, ульвошпинель
	Анизотропный	Пирротин, ильменит, энаргит
Розовый, пурпурный, фиолетовый	Изотропный	Кобальтин, линнеит
	Анизотропный	Никелин
НЕОКРАШЕННЫЕ ИЛИ ОКРАШЕННЫЕ ДО НЕКОТОРОЙ СТЕПЕНИ		
Бледно-желтый	Изотропный	Пирит, герсдорфит, скуттерудит, серебро, платина
	Анизотропный	Марказит, раммельсбергит, саффлорит, леллингит, арсенопирит, сильванит, тетрадимит
Голубоватый	Изотропный	Зигенит, ульманит, галенит, фрейбергит
	Анизотропный	Висмутин, антимонит
Лавандово-серый, голубоватый, розоватый	Изотропный	Карролит, тетраэдрит, магнетит, реальгар, теннантит
	Анизотропный	Гематит, энаргит, пираргирит, буланжерит, аурипигмент, реальгар, молибденит, пиролозит, джемсонит, штрмейерит
Синеваго-серый	Изотропный	Хромит
	Анизотропный	Сфалерит

**Схема идентификации минералов в аншлифах
в порядке снижения их отражения в белом свете (по [Старцев, 1994])**

Свойства минерала	Минерал
$R (\%) \geq 51.7$ (пирит)	
Изотропный	Пирит, герсдорфит, скуттерудит, серебро, платина, золота, алтаит, медь
Анизотропный	Марказит, раммельсбергит, саффорит, леллингит, арсенопирит, висмутин, сурьма, мышьяк, тетрадимит, силванит
$R (\%)$ от 51.7 (пирит) до 43.1 (галенит)	
Изотропный	Зигенит, галенит, фрейбергит, пентландит, кобальтин, линненит, пирит сурьмянистый и мышьяковистый
Анизотропный	Пираргирит, висмутин, антимонит, вольтскит, арсенопирит, никелин, брейтгаупит, халькопирит, молибденит
$R (\%)$ от 43.1 (галенит) до 20.0 (магнетит)	
Изотропный	Карролит, тетраэдрит, магнетит, реальгар, теннатит
Анизотропный	Гематит, энаргит, буланжерит, аурипигмент, реальгар, молибденит, пиролозит, джемсонит, штроейерит
$R (\%) < 20$ (магнетит)	
Изотропный	Сфалерит, хромит, англезит, барит
Анизотропный	Гетит, рутил, вольфрамит, церуссит, сидерит, графит

В настоящее время идентификация рудных минералов облегчается с помощью компьютерных диагностических программ, часть которых имеет INTERNET-интерфейс. Подобная разработка осуществляется в Российском государственном геологоразведочном университете (<http://www.mineragraphy.ru/>). Простейшая поисковая программа по основным свойствам рудных минералов создана в Институте минералогии УрО РАН (<http://w.ilmenu.ac.ru/ocean/codes/mgrfl.asp>).

Существуют также компьютерные системы, позволяющие проводить диагностику минералов по их оптическим спектрам. В самых первых справочных руководствах о применении спектров отражения для диагностики рудных минералов [Определение..., 1973; Вьяльсов, 1973; Безсмертная, Чвилева, 1976] содержались спектры отражения и разные варианты их систематики для 200 рудных минералов. В более поздних определителях [Шумская, 1985; Чвилева и др., 1988] число минералов с количественными

данными выросло до 500 наименований. За это время Комиссия по рудной минералогии при Международной минералогической ассоциации – COM IMA выпустила три издания, содержащих количественные данные по рудным минералам (Quantitative Data File-QDF). Последнее из них – третье издание [Criddle, Stanley, 1986] – содержит данные о 635 рудных минералах и их разновидностях, а также библиографию по современным системам идентификации, в том числе и по их компьютерным версиям.

Разработанная в СПбГУ информационная система MicroMin (**Micro**-scopic Information System for Ore **Minerals**) позволяет вычислять количественные характеристики цвета минерала [Болдырева и др., 2009]. В базе содержатся взаимосвязанные данные о минералах в виде двух таблиц: свойств минералов и спектров отражения. В эталонном банке, созданном авторами программы, содержится информация о рудных минералах. В настоящее время в нем находится информация о более чем 1000 минеральных видов и их разновидностях.

Вопросы для самопроверки

1. Отражательная способность минералов: определение, измерение, причины ошибок.
2. Дисперсия отражения: определение.
3. Цвет минерала в отраженном свете. Объективные зависимости и субъективность восприятия цвета.
4. Перечислите оптические свойства, определяемые без анализатора (николи параллельны).
5. Перечислите оптические свойства, определяемые в плоскополяризованном свете.
6. Перечислите оптические свойства, определяемые с анализатором (николи скрещены).
7. Анизотропия. Причины появления. У каких минералов бывает? Как наблюдается?
8. Какие физические величины измеряет спектрофотометр?
9. Двухотражение минералов: определение.
10. Перечислите минералы, у которых наблюдается двухотражение.
11. Внутренние рефлексы, их определение.
12. Назовите причину появления у минералов внутренних рефлексов.
13. Перечислите структурные и морфологические признаки минералов.
14. Методы определения строения минералов в плоских сечениях: перечислите, кратко охарактеризуйте.
15. Для каких минералов характерны ксеноморфные очертания?
16. Спайность и отдельность минералов: понятия, их отличия.
17. Признаки механического двойникования минералов.
18. Чем определяется зональность роста в минералах?
19. Определение твердости минералов. Кратко охарактеризуйте методы.

20. На чем основан метод определения твердости полировки?
21. В каких единицах определяется твердость по Виккерсу?
22. Твердость по Виккерсу (формула).
23. Твердость по Кнупу (формула).
24. Типы инденторов. Их применение.
25. Перечислите электрические свойства рудных минералов.
26. У каких минералов наблюдается эффект термо-ЭДС?
27. В чем заключается механизм проводимости полупроводника?
28. Перечислите магнитные свойства минералов.
29. Перечислите магнитные минералы.
30. Способы определения магнитности минералов.
31. Перечислите методы химического анализа. Кратко охарактеризуйте методы.

Глава 5. ТЕКСТУРНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ РУД

Текстурно-структурный анализ руд является крупным разделом минералогии. В отличие от текстурно-структурного анализа горных пород, который рассматривается в петрографии, *объектом* изучения в данном случае служит руда. Поскольку любая руда является закономерной частью геологических формаций и по сути дела может рассматриваться как специфическая порода, то подходы и терминология текстурно-структурного анализа руд во многом заимствованы из петрографии, но используются применительно к рудым минералам и их сростаниям. Следует отметить, что термины «структура» и «текстура» понимаются в русском и английском языках в прямо противоположном смысле. В англоязычной литературе структурой называют более крупные макроскопические элементы строения, а текстурой – относительно мелкие (часто микроскопические) элементы. Причиной разночтений являются разные критерии выделения этих элементов строения руд или пород [Толковый..., 2002]. Эти два термина не могут считаться синонимами, несмотря на то, что некоторые структуры могут быть похожи на основные текстуры.

Цель текстурно-структурного анализа руд состоит в определении текстур и структур: 1) для технологической оценки и прогноза поведения руды в процессе обогащения и 2) для определения последовательности минералообразования и генезиса руд. Структурные и текстурные особенности руд различных типов месторождений принимаются во внимание при выборе методов технологической обработки рудного сырья, так как для рационального извлечения полезного компонента, когда необходимо знать не только минеральный состав руды, но и закономерности сростания и распределения слагающих руды минералов.

Текстурно-структурному анализу руд посвящена многочисленная литература, включающая теоретические работы, атласы текстур и структур руд [Бетехтин и др., 1958; Рамдор, 1962; Исаенко, 1975; Авдонин, Сергеева, 1998 и многие другие]. Первая обстоятельная сводка структур руд принадлежит советскому ученому И.Ф. Григорьеву [1927]. Сравнивая между собой структуры руд и горных пород, он подчеркнул разнообразие и невыдержанность структурных признаков в рудах, а также отметил способность к перегруппировке рудного вещества в твердом состоянии (в современной терминологии – перекристаллизации). Схема классификации структур минеральных сростаний, составленная И. Ф. Григорьевым, актуальна до сих пор. Позднее А.Г. Бетехтин и др. [1958] разграничил структуры и текстуры. Под термином «структура» он предложил понимать способ сочетания в данном минеральном агрегате кристаллических зерен, характеризующихся теми или иными формами и размерами. А под термином «текстура» – сочетание минеральных агрегатов, слагающих руды, но отличающихся друг от друга по минеральному составу и структуре. Следует заметить, что

не имеет принципиального значения, наблюдается ли структура или текстура под микроскопом или визуально в образце. В первом случае во избежание путаницы следует добавлять приставку «микро» (микротекстура или микроструктура).

5.1. Текстуры руд

Текстурой руды называется особенность строения рудной массы, обусловленная ориентировкой и пространственным соотношением различных минеральных агрегатов, слагающих руду. Текстура отражает как особенности образования руды, так и ее последующие изменения [Шахов, 1961; Геологический..., 1978]. Морфологической единицей текстуры является минеральный агрегат. Под минеральным агрегатом, применительно к текстурно-структурному анализу руд, следует понимать скопления рудных минералов, которые по каким-либо признакам отличаются от остальной рудной массы. Чаще всего среди таких признаков рассматриваются состав руды, структура, форма, величина и взаимоотношения с другими минеральными агрегатами. Таким образом, корректнее говорить не о текстуре руды в целом, а о текстуре того или иного минерального агрегата.

По составу минеральные агрегаты можно разделить на поли- и мономинеральные. Если первые состоят из нескольких минеральных фаз и могут быть весьма сложными, то последние состоят из одной минеральной фазы. При характеристике полиминерального агрегата обычно перечисляются рудообразующие минералы от подчиненных до преобладающих количественно. Например, в пирит-халькопиритовой руде пирит является подчиненной фазой, халькопирит – преобладающей. При характеристике состава следует также учитывать присутствие нерудных фаз.

Строение минерального агрегата или его структура отражает особенности физико-химических условий рудоотложения. Этот признак будет рассмотрен ниже.

По форме можно различать удлиненные, округлые и сложные минеральные агрегаты. Удлиненные агрегаты характеризуются вытянутостью в одном или двух направлениях. Сюда относятся руды, имеющие слоистое, полосчатое, сланцеватое строение и др. Прожилки и жилы также обычно характеризуются удлиненной формой.

Округлые агрегаты в соответствии с определением имеют форму близкую к шарообразной. Это весьма широко распространенные в осадочных породах конкреции, оолиты, окатанные обломки руд.

Агрегаты сложной формы трудно описать в геометрических терминах. Эта группа наиболее разнообразна и очень часто встречается: гнезда, корки, каймы, дендриты, петли, решетки и многие другие.

По размеру минеральные агрегаты разделяются на наблюдаемые макроскопически (макротекстуры) и под микроскопом (микротекстуры). Услов-

ной границей между ними является размер 2 мм (поле зрения оптического микроскопа).

По взаимоотношениям рудных агрегатов и вмещающих пород можно выделить сингенетические и эпигенетические. Первые формируются близодновременно с породой и характерны для некоторых магматических и осадочных месторождений. Эпигенетические руды образуются после формирования вмещающей толщи в результате метасоматических процессов и/или отложения в пустотах. Сложность и многоактность процесса рудоотложения приводит к разнообразным взаимоотношениям рудных агрегатов между собой.

С.А. Вахромеев [1956] разделил важнейшие типы текстур на морфологические группы (табл. 5.1). Текстуры различных типов месторождений могут быть морфологически подобны. Так, например, массивные руды широко распространены в магматических и гидротермально-осадочных месторождениях; полосчатые руды преобладают в осадочных месторождениях, но при этом слагают пластообразные тела на гидротермально-осадочных и метаморфогенных месторождениях; колломорфные текстуры руд отмечаются в составе гидротермально-осадочных залежей и месторождений выветривания.

Ниже приводится морфологическое описание наиболее распространенных текстур.

Массивная – представляет сплошное и равномерное выполнение пространства рудными минералами без каких-либо пустот и прожилков (рис. П.10а, прил. 6).

Нодулярная и оолитовая – характеризуются наличием агрегатов овальной или округлой формы среди основной нерудной массы (рис. П.10б, прил. 6).

Вкрапленная – характеризуется наличием рассеянных зерен рудных минералов или их агрегатов в основной нерудной массе (рис. П.10в, прил. 6). По характеру вкрапленности выделяют собственно вкрапленную, гнездово-вкрапленную, рассредоточено-вкрапленную, прожилково-вкрапленную.

Пятнистая – характеризуется пятнами агрегатов одних рудных минералов в основной массе другого рудного минерала (см. рис. П.10а, прил. 6).

Жильная, или текстура пересечения представляет сочетание минеральных агрегатов, где один является вмещающей массой, другой – пересекает его в виде жил и прожилков (рис. П.10г, прил. 6).

Крустификационная – встречается в жилах выполнения и характеризуется полосчатым расположением минеральных агрегатов, демонстрирующих признаки роста в свободных условиях и трещинах (явления геометрического отбора, частичный идиоморфизм и др.) (рис. П.10д, прил. 6). На рисунке видно, что полосы минералов отлагались на стенках трещины от периферии к центру.

Классификация важнейших текстур руд (по [Вахрамеев, 1956])

Морфологические группы		Геологические (генетические) группы						Метаморфогенные
		Магматические	Контактово-метаморфические	Гидротермальные	Выветривания	Осадочные		
Однородные (равномерные)	Массивная Вкрапленная	Массивная Вкрапленная	Массивная Вкрапленная	Массивная Вкрапленная	Пористая Порошковая		Массивная (непереотложенная)	
	Полосчатая	Слоистая (реликтовая)	Полосчатая Жильная Линзовидная <i>Крустификационная</i>			<i>Слоистая</i> Линзовидная	Сланцеватая Полосчатая Реликтовая	
	Округлые <i>Нодулярная</i>		Кокардовая Колломорфная		Концентрически-зональная <i>Конкреционная</i> Оолитовая Почковидная	Оолитовая Конгломератовая	Реликтовая	
Прочие	Такситовая (шлифовая) Брекчиевидная	Пятнистая Друзовая Брекчиевидная	Пятнистая Друзовая Брекчиевидная Брекчиевая		Корковая Жеодовая Друзовая Ячеистая Петельчатая Органогенная (реликтовая)	Брекчиевая (обломочная) Органогенная (реликтовая)	<i>Плошчатая</i> Брекчиевая	

Примечание: в генетических группах курсивом выделены типоморфные текстуры.

Брекчиевая – характеризуется наличием угловатых обломков (от 10 мм до 10 см) в цементе. Обломки могут быть однородными и разнородными, и обычно они отличаются от цемента (рис. П.10е, прил. 6). Данная текстура образуется в результате разрушения ранее сформированных руд. Например, на колчеданных месторождениях брекчиевые руды образуются в результате подводного разрушения и последующей цементации. Также брекчиевые текстуры могут возникать при тектонических подвижках, и тогда крупные обломки погружены в мелкообломочный цемент такого же состава.

Брекчиевидная – характеризуется обломковидной формой рудных минералов, которые не являются обломками (рис. П.10ж, прил. 6). Брекчиевидные руды могут образовываться в результате: 1) саморастрескивания руд, которое создается из-за внутренних напряжений, возникающих при их остывании; 2) неравномерной диагенетической перекристаллизации тонкодисперсных сульфидных масс, что сопровождается сокращением их объема, растрескиванием и фрагментацией; 3) замещения обломков пирокластических пород рудными минералами.

Цементационная – проявляется в том случае, когда рудообразующие минералы цементируют обломки пород (рис. П.10з, прил. 6).

Полосчатая – характеризуется чередованием в руде полос, различающихся по структуре, цвету, крупности зерен или минеральному составу (рис. П.10и, прил. 6). По морфологическим особенностям выделяют: прямолинейно-полосчатые, линзовидно-полосчатые, тонкополосчатые, сложно-полосчатые.

Линзовидная – разновидность полосчатой текстуры. Характеризуется присутствием обособлений линзовидной формы в массе руды или вмещающей породы.

Слоистая – разновидность полосчатой, несущая генетический смысл, т.к. образуется во время осаждения осадочного материала. Различают грубослоистую (10–0,5 см), тонкослоистую (0,5 см–0,5 мм) и микрослоистую (0,5 мм и менее) текстуры. Одним из основных отличий слоистой текстуры от полосчатой является градационная сортировка материала (рис. П.10к, прил. 6).

Колломорфная – характеризуется сочетанием сферических, концентрически-зональных, ажурных и полосчатых рудных обособлений (рис. П.10л, прил. 6).

Конкреционная – характеризуется образованием конкреций или стяжений шарообразной, овальной, реже неправильной формы (рис. П.10н-о, прил. 6). В образцах с конкреционной микротекстурой отмечается радиально-лучистое строение конкреций от центра и присутствие затравки (рис. П.10о, прил. 6). Состав конкреций может различаться в зависимости от типа месторождений (пиритовый, марказитовый, карбонатный, гетитовый, пиролюзитовый, фосфоритовый).

При выщелачивании легко растворимых минералов образуются пористые текстуры, разновидностями которых являются *ячеистая* или *сотовая*, характеризующиеся присутствием пор, разделенных перегородками, оставшимися от силикатного вещества (рис. П.10п, прил. 6).

Текстуры, образованные в результате процессов метаморфизма (например, под влиянием ориентированного давления), называются метаморфическими. Среди них выделяются *сланцеватая* и *плойчатая* текстуры.

Сланцеватая — характеризуется линейным или плоскопараллельным расположением удлинённых минералов или минеральных парагенезисов. Сланцеватость может совпадать или не совпадать с направлением слоистости или полосчатости [Исаенко, 1975].

Плойчатая — разновидность сланцеватой, полосчатой и слоистой текстур, которая характеризуется наличием тонких полосок или прослоек, смятых в мелкие складки (рис. П.10р, прил. 6). Иногда прослойки или полоски разорваны и смещены.

5.2. Структуры руд

Структура объединяет особенности строения минеральных агрегатов, обусловленные формой, размерами и способами сочетания минеральных индивидов (зерен), слагающих данный агрегат [Бетехтин и др., 1958]. Таким образом, основное различие между текстурой и структурой заключается в «уровне организации» минерального вещества. Если для текстуры морфологической единицей является минеральный агрегат или срастание минералов, то для структуры — это минеральный индивид.

Изучение структур проводится на макро- и микроуровне. Структуры, сложенные крупнозернистыми индивидами (5–10 мм) определяют невооруженным глазом в штуфах, керне или шлифовках. Структуры из среднезернистых (2–5 мм), мелкозернистых (0,5–2 мм), тонкозернистых (0,1–0,5 мм) и скрытокристаллических (< 0,5 мм) минеральных индивидов изучают в шашках и аншлифах в отраженном свете под микроскопом.

По относительной величине кристаллических зерен структуры разделены на равномернозернистые и неравномернозернистые. Равномернозернистые структуры обладают примерно одинаковыми размерами зерен, тогда как неравномернозернистые структуры характеризуются разными размерами зерен.

Форма минеральных индивидов уже рассматривалась в разделе 4.2. В минераграфии, как и в петрографии, минералы, прежде всего, различаются по степени идиоморфизма. Соответствующие структуры называются идиоморфнозернистой, гилидоморфнозернистой и аллотриоморфнозернистой. Перечисленные структуры характеризуются простым примыканием округлых или угловатых зерен минералов друг к другу. Границы между зернами могут быть как прямолинейными, так и сильно извилистыми.

Идиоморфнозернистая структура характеризует минеральные индивиды совершенной кристаллической формы (идиоморфные или эвгдральные кристаллы) (рис. П.11а, прил. 6). Специфической разновидностью этой структуры является *скелетная структура*, которая характеризуется наличием скелетных кристаллов в виде елочки, снежинки или рыбьего скелета (рис. П.11б, прил. 6), рост которых осуществляется соответственно в вершинных и приреберных участках. Скелетные кристаллы формируются при умеренном и большом пересыщении растворов и преобладании диффузионного процесса роста [Краснова, Петров, 2007; Булах и др., 2008]. Разновидностью скелетных кристаллов являются футляровидные.

Гипидиоморфнозернистая структура характеризует минеральные индивиды с частично развитыми кристаллическими гранями (гипидиоморфные, или субгдральные кристаллы (рис. П.11в–г, прил. 6). Разновидностью гипидиоморфнозернистой является *гранозернистая структура*, при которой индивиды характеризуются изометричной формой зерен, отсутствием у них коррозии и примерно одинаковым размером зерен (рис. П.11д, прил. 6). Появление таких структур отмечается в результате интенсивной перекристаллизации минеральных индивидов. В отличие от гипидиоморфнозернистой структуры характерной особенностью гранозернистой структуры является плоскогранно-полиэдрическая форма зерен [Жабин, 1979].

Аллотриоморфнозернистая структура характерна для минерального индивида, не обладающего собственными кристаллическими формами (рис. П.11е, прил. 6). Форма зерен носит название ксеноморфной или ангдральной. Одной из разновидностей аллотриоморфнозернистой структуры является *сидеронитовая*, для которой характерен ксеноморфизм поздних рудных минералов относительно силикатов (оливин, пироксены, амфиболы, плагиоклазы). Данная структура характерна для руд магматических месторождений.

Разновидностью кристаллически-зернистых структур является скрытокристаллическая структура, минеральные индивиды которой различимы только под микроскопом при больших увеличениях. Наиболее распространенными представителями таких структур являются *метаколлоидные*. Метаколлоидными называются кристаллические агрегаты сферической, гроздьевидной, натечной и фестончатой формы, сложенные мельчайшими индивидами (1 мкм–0,1 мм) (рис. П.12а–б, прил. 6). Такие структуры разделяются на следующие морфологические виды: гелевую, сферолитовую, шариковую, радиально-лучистую, концентрически-зональную, колломорфно-метаколлоидную [Юшко, 1984].

Минеральные индивиды часто встречаются в виде обломков зерен. Обломки хрупких минералов обладают угловатыми очертаниями (пирит, арсенопирит), мягких и ковких минералов – имеют сплюснутый вид и сглаженные контуры (золото, серебро, медь и др.). Обломки минералов с резко выраженной спайностью в одном направлении имеют вид чешуек или пла-

стинок (пирротин, молибденит, графит, сфалерит, антимонит, халькопирит). Наиболее характерны следующие виды деформационных структур.

Катакластическая – характерна для твердых и хрупких минералов, подвергшихся динамическим воздействиям. В результате образуются трещины и остроугольные обломки (рис. П.13а–б, прил. 6).

Структура смятия характеризуется деформацией (смятием) мягких и пластичных минералов, не сопровождающейся существенным нарушением целостности (рис. П.13в–г, прил. 6).

Различают структуры равномернозернистые и неравномернозернистые. В отличие от первых (см. рис. П.11д, прил. 6), вторые характеризуются разными размерами зерен в различных участках аншлифа или шашки (см. рис. П.11в–г, прил. 6). Их разновидностями являются *порфировая и порфировидная* структуры, имеющие сходные морфологические признаки, но разные причины образования. Они характеризуются неравномерным распределением крупных зерен минералов среди основной массы мелких, но в первом случае роль порфировых вкрапленников играют метакристаллы (рис. П.14а, прил. 6), а во втором – перекристаллизованные кристаллы или порфиробласты (рис. П.14б, прил. 6).

Одним из определяющих элементов структуры являются *взаимоотношения рудных индивидов*, слагающих минеральный агрегат. Наиболее распространенной группой структур являются те, которые характеризуют присутствие включений одного минерала в другом. В зависимости от природы включений различают 1) пойкилитовые включения, 2) включения, образовавшиеся в результате распада твердого раствора.

1) Включения минералов, захваченные в процессе роста кристаллов, называются пойкилитовыми (см. рис. П.11г, прил. 6), а описывающая их структура – *пойкилитовой*. В пойкилитовой структуре отмечается беспорядочное расположение мельчайших включений окружающих минералов в той ориентировке и с такой крупностью зерна, которые они имели до начала процесса перекристаллизации. Захваченные растущим кристаллом инертные зерна удлинены или уплощены обычно параллельно грани, а не перпендикулярны, как это бывает в случае совместного роста индивидов [Краснова, Петров, 2007].

2) С включениями, образовавшимися вследствие распада твердого раствора, связаны разнообразные структуры распада. При понижении температуры после отложения руд, первоначально однородные минеральные соединения распадаются на две и более компоненты, обычно с закономерно ориентированными кристаллическими решетками (решетчатые и графические структуры). В другом случае формируются незакономерные вставки чужеродного минерала в виде мирмекитов или пламенивидных включений.

Структуры распада характеризуются следующими морфологическими признаками: 1) определенной кристаллографической ориентировкой включений по отношению к вмещающему минералу; 2) одинаковой ориенти-

ровкой включений во всех пирамидах нарастания вмещающего кристалла; 3) равномерным распределением включений в объеме матрицы; 4) сужением и выклиниванием пластинок минералов, не соприкасающихся друг с другом [Рамдор, 1962; Чесноков, 1974; Попов, 1984]. Только по наличию набора всех признаков можно сделать вывод о распадном происхождении структур. Некоторые морфологические разновидности распадных структур приведены ниже.

Эмульсионная структура характеризуется рассеянием мельчайших, обычно округлых включений одного рудного минерала в другом, иногда с заметной ориентировкой по направлениям спайности или приуроченностью к границам зерен. Эмульсионная структура характерна для сростаний халькопирит+сфалерит, пирротин+сфалерит, халькопирит+станнин [Юшко, 1984]. Ранее ассоциация халькопирит+сфалерит интерпретировалась как результат распада твердых растворов [Бетехтин и др., 1958; Ramdohr, 1975; Schneiderhon, 1978], но детальные исследования руд, дополненные экспериментальными данными, свидетельствуют о том, что эмульсиевидные, пылевидные включения халькопирита в сфалерите, возникли путем эпитактического роста во время образования сфалерита, либо путем замещения сфалерита халькопиритом [Barton, 1978; Крейг, Воган, 1983; Бортников, Евстигнеева, 2003].

Графическая (субграфическая) структура характеризуется прорастанием двух минералов (рис. П.15а, прил. 6). Наиболее характерен этот тип структур для сростаний халькопирит+борнит, халькозин+штроейерит, дигенит+халькозин [Юшко, 1984].

Решетчатая структура характеризуется расположением пластинок одного минерала по двум взаимно перпендикулярным направлениям, отвечающим спайности другого минерала (рис. П.15б, прил. 6). Типичной особенностью решетчатой структуры, возникшей при распаде твердого раствора, является сужение пластинок решетки в местах их пересечения. Такая структура характерна для сростаний халькопирит+борнит, ильменит+магнетит, ильменит+гематит, кубанит+пирротин, халькопирит+пирротин [Юшко, 1984].

Пластинчатая структура является разновидностью решетчатой структуры, при которой один минерал имеет вид веретенообразных пластинок, приуроченных к спайности другого минерала (рис. П.15в, прил. 6). Границы между образующимися минералами ровные, без следов коррозии. Пластинчатая структура характерна для сростаний пирротин+пентландит, кубанит+халькопирит, ильменит+магнетит и др. [Юшко, 1984].

Пламеневидная структура характеризуется удлиненными выделениями одного минерала по периферии зерен или вдоль трещин спайности другого минерала в виде язычков пламени (рис. П.15г, прил. 6). Такая структура характерна для сростаний пирротин+пентландит [Юшко, 1984].

Замещение одного минерала другим, с формированием коррозионных структур, происходит в результате: 1) растворения и последующего повторного отложения, 2) окисления, 3) диффузии в твердом состоянии [Бетехтин и др., 1958].

Коррозионные структуры характерны для:

Рецептура приготовления реактивов для травления рудных минералов
(по [Кринов, Ефимов, 2008])

Наименование состава	Процентный состав	Последовательность приготовления	Примечание
1	2	3	4
Щелочной раствор перманганата калия (KMnO ₄)	На 0,1 л дистиллированной воды 0,5 г КОН и 0,05 г KMnO ₄	В дистиллированной воде разводится сначала перманганат калия, а затем вводятся гранулы едкого калия	Для наилучших результатов раствор должен быть выдержан не менее месяца перед применением. Хранить в темной пластиковой таре
Кислый раствор перманганата калия	На 0,1 л воды 3 г серной кислоты марки «хч» (химически чистой) или «охч» (очень химически чистой) и 0,05 г перманганата калия	Кислота вводится в раствор перманганата	Хранить в стеклянной темной таре
Смесь молотого флюорита и концентрированной азотной кислоты (HNO ₃)	Избыточное количество азотной кислоты + тонкомолотый порошок флюорита в небольших количествах	В полиэтиленовой или фторопластовой (тефлоновой) посуде порошок вводят непосредственно перед травлением	Разложение идет достаточно активно с выделением H ₂ F ₂ в активной форме. Осторожность и работа под вытяжкой!
Раствор хлорида натрия (NaCl)	На 1 л воды растворяется 12 г хлорида натрия марки «хч» или «охч» или пищевая поваренная соль без добавок	Раствор готовится в любом варианте и не требует особых предосторожностей	
Раствор аммиака (NH ₄ OH)	На 1 л воды необходимо 2–5 мл бытового нашатырного спирта	Раствор готовится путем вливания нашатырного спирта в дистиллированную воду	Из-за неустойчивости раствор следует готовить непосредственно перед применением

1	2	3	4
Нитол	20 г концентрированной азотной кислоты на 100 г этилового спирта	В переохлажденный этиловый спирт с помощью одноразового шприца вводится кислота. Охлаждение спирта производить до отрицательных температур (-20 ... -30 °С) жидким азотом, сухим льдом или в морозильной камере холодильника	Огнеопасная и при нагреве взрывчатая жидкость! Хранить в эксикаторах в бюксах в вытяжном шкафу
Глифоген	В готовый раствор нитола вводится 0,1 г азотнокислого серебра марки «хч», а после полного растворения соли – 140 мл дистиллированной воды	Так же, как при приготовлении нитола	Раствор разбавленный, а поэтому не огнеопасный. Осторожность, как с разбавленной кислотой. При хранении на свету серебро окисляется и выпадает в осадок. Дистиллят должен быть чистым от хлора
Азотнокислое серебро (AgNO ₃)	0,1 г азотнокислого серебра на 100 мл дистиллята	Не требует особых приготовлений	При хранении на свету серебро окисляется и выпадает в осадок. Дистиллят должен быть чистым от хлора
Трихлористый хром (Cl ₃ CrH ₁₂ O ₆)	В концентрированную соляную кислоту марки «хч» или «охч» вводится порошок хромового ангидрита с активным перемешиванием вплоть до появления незначительного оттенка	Смешивание и реакцию проводить при охлаждении на водяной бане комнатной температуры в вытяжном шкафу. Каждая порция фиолетового хромового ангидрита приводит к кратковременному	В результате приготовления раствор становится относительно химически пассивным. При испарении жидкости получившуюся соль разбавляют дис-

1	2	3	4
	фиолетового цвета при основном зеленом цвете раствора	появлению такого оттенка, который по мере прохождения реакции сменяется зеленым. В конце приготовления травителя избыток фиолетового цвета оттитровать концентрированной соляной кислотой	тиллированной водой. Канцероген!
Окислитель Шильмана	100 мл дистиллированной воды, 10 мл 20 % перекиси водорода, 10 мл концентрированной серной кислоты	В воду вводится кислота, а после прекращения термической реакции – перекись водорода	Высокая опасность едких жидкостей! Работа строго в очках, плотных резиновых перчатках, под вытяжкой! Хранить в вытяжном шкафу в кислотоупорном боксе!
Раствор йодистого калия (KI)	Аптечный раствор йода разбавляется этиловым спиртом в соотношении 1:3–1:5	Спирт вливают в темную посуду с раствором йода	Хранить в темноте и темной посуде
Раствор ПАВ	Средство для мытья посуды (жидкое мыло) отечественного производства без отдушек растворяют в отношении 1:100 с дистиллированной водой	Не имеет значения	Хранить в пластиковой посуде
Раствор жирных кислот натрия	Хозяйственное мыло отечественного производства растворяют в теплой воде в отношении 1:200	Не имеет значения	Хранить в пластиковой посуде

Технология травления сульфидных минералов
(по [Кринов, Ефимов, 2008])

Реактив	Способ травления	Список минералов	Результаты травления
1	2	3	4
Щелочной раствор перманганата калия	Препараты погружаются в раствор или смачиваются сверху и экспонируются до позеленения раствора. После этого промываются в проточной воде и сушатся в вертикальном положении. При продолжительном хранении на воздухе появляются нюансы внутреннего строения. Сроки окисления – не более суток, а срок работы с препаратом – не более недели.	Пирит, марказит, арсенопирит, сфалерит	Осцилляторная и грубая зональность (ростовые формы) и выявление реликтов ранних минералов. Не изменяет структуры и состава поверхности.
Кислый раствор перманганата калия	То же, что и со щелочным перманганатом. Особенностью является двойственность реакций: свежеприготовленный раствор травит теннантит, тетраэдрит и ряд сульфосолей, а окисленный раствор – пирит и арсенопирит. Готовность к травлению сульфидов определяется началом выпадения хлопьев окислов марганца черного цвета.	Пирит, марказит, арсенопирит, сфалерит, теннантит, тетраэдрит	Осцилляторная и грубая зональность (ростовые формы) и выявление реликтов ранних минералов. Не изменяет структуры и состава поверхности.
Смесь молотого флюорита и концентрированной азотной кислоты	В парах, в вытяжном шкафу. Лучше всего травить короткими сеансами с постепенным вытравливанием. После травления моментально необходима промывка проточной водой.	Пирит, марказит, арсенопирит, кварц, окислы железа	Осцилляторная и грубая зональность, границы индивидов.

1	2	3	4
Раствор хлорида натрия	Применяется при электролитическом травлении. Обычные параметры травления – от 1.5 до 4.5 В. при токах стабилизации 0.1 до 0.3 А. соответственно. Экспозиция травления определяется визуально при травлении под бинокляром или микроскопом	Пирит, марказит, арсенирит, кварц, окислы железа, сфалерит, минералы золота и платины	Для сульфидов – осцилляторная и грубая зональность, границы индивидов. Для самородных и интерметаллидов – грубая зональность и границы индивидов.
Раствор аммиака	То же, что и для NaCl		
Нитол	Травление производится путем нанесения ватным тампоном раствора на поверхность образца. После травления необходима промывка водой	Практически все самородные металлы и их соединения, окислы железа	Тонкая и грубая зональность и границы индивидов.
Глифоген	Травление производится путем нанесения раствора на поверхность или погружением образца в раствор. С целью улучшения травления необходимо подбирать концентрацию рабочего раствора с разбавлением базового раствора дистиллированной водой. Процесс травления наблюдается в виде потемнения поверхности. После травления необходима промывка проточной водой.	Халькопирит, кубанит, изокубанит, сфалерит, окислы железа и урана	Тонкая и грубая зональность и границы индивидов.
Азотнокислое серебро	То же, что и для глифогена	Сульфиды железа и меди, сульфосоли	Выявление грубой зональности.
Треххлористый хром	То же, что и для глифогена	Халькопирит, кубанит, сфалерит, сульфосоли	Фазовое и структурное травление.

1	2	3	4
Окислитель Шильмана	То же, что и для глифогена	В различной степени все сульфиды и оксидные минералы	Границы зерен всегда, ростовая зональность в некоторых случаях.
Раствор иоди-стого калия	Препараты погружаются в раствор или намачиваются сверху и экспонируются. Экспозиция подбирается опытным путем. После этого промываются в проточной воде и сушатся в вертикальном положении. При продолжительном хранении на воздухе появляются детали внутреннего строения. Сроки окисления – не более суток, работы с препаратом – около недели.	Самородное железо, окислы железа	Фазовое и структурное травление железосодержащих минералов. Избирательное травление с большим количеством артефактов.
Раствор ПАВ и раствор жирных кислот натрия	То же, что и для KI. Срок окисления – не более суток, работы с препаратом – около 2 суток.	Практически все сульфидные минералы	Тонкая и грубая зональность и границы индивидов. Обнаружение мелких деталей внутреннего строения. Продолжительность травления может достигать 4–5 часов.

Примечание. В большинстве случаев, если один из реагентов не дает результата, то применение второго способа результативно.

Протекание структурного травления можно сопоставить с проявлением фотографической пластинки в минеральном агрегате, когда сначала появляются лишь общие черты будущего рисунка. С течением времени отдельные зерна, наиболее благоприятно ориентированные для травления, начинают растворяться и покрываться налетом различной интенсивности. При получении наибольшего контраста между зернами, слагающими мономинеральный участок, травление необходимо прекратить, иначе все зерна

станут похожи друг на друга. При структурном травлении необходимо уловить время наступления наибольшего контраста в рисунке. Иногда достаточно и нескольких секунд, в других случаях время травления может достигнуть нескольких минут.

Основным условием успешного проведения структурного травления является отличное качество полировки. При травлении плохо доведенных или, наоборот, заполированных аншлифов, выявляются трещины, которые ранее не были видны, что может ввести исследователя в заблуждение. Необходимый реактив нужно готовить непосредственно перед процессом травления, чтобы разложение реактивов не создавало ложной пленки на поверхности минерала.

После травления аншлиф следует промыть водой и высушить путем осторожного прикладывания фильтровальной бумаги. При монтировании шлифа на его поверхность нужно положить бумагу, чтобы рисунок не размазался.

Главными методами структурного травления являются:

1. Наиболее простой капельный метод сводится к нанесению капли реагента на испытуемый участок аншлифа. Достоинство этого метода заключается в том, что за ходом процесса можно наблюдать в микроскоп и вовремя прекратить эксперимент. Этот способ не пригоден в случае крупнозернистого строения агрегатов, так как капля может попасть на границу двух зерен, и мы не получим достоверных сведений о размерах и способах сочетания зерен, слагающих агрегат. Это означает, что капля реагента должна быть больше чем исследуемое зерно.

2. Метод сплошного протравливания заключается в полном смачивании поверхности аншлифа реагентом. Достоинством метода является то, что структура выявляется по всему образцу и, можно легко увидеть закономерности ее изменения, если таковые существуют. К недостатку метода относится трудность определения момента наилучшей протравы. Приходится время от времени брать аншлиф и определять начало травления на глаз (по легкому помутнению поверхности шлифа).

3. Метод травления в парах реагента. Для проведения анализа кислота наливается в колбу. Шлиф кладется на колбочку, частично его поверхность прикрывается. Пары реагента поднимаются вверх, образуя на полированной поверхности налет (пленку) различной интенсивности в зависимости от ориентировки зерен. Достоинством метода является наиболее ровное травление, сохранение рельефа и химизма поверхностей. Пленки легко удаляются перед подготовкой для локальных методов исследования путем очистки полированной поверхности на сукне. К недостаткам следует отнести поливариантность травления (необходимость многократного травления в различных растворах и подбор концентраций и экспозиций).

Для получения высокого качества фотографий изучаемой поверхности после проведения травления в парах реагента можно напылить образцы,

как при подготовке к рентгеноспектральным исследованиям. Трудоемкость, фактор времени и сложность удаления напыления – ограничивающие условия использования этих методов.

4. Травление электрическим током – наиболее трудоемкий и дорогостоящий метод. Но он значительно ускоряет процесс травления. Для этого используется батарейка, положительный полюс которой с помощью стальной иглы приводится в контакт с полированной поверхностью рудного минерала за пределами капли реагента, а отрицательный полюс соединяется с платиновой проволокой и вводится внутрь капли. При низких токах и напряжениях происходит активное вытравливание по границам между зонами роста проводящих или полупроводниковых минералов. Сравнительный анализ результатов локальных рентгеноспектральных определений состава минералов до и после такого травления показал их полную идентичность. Необходимым условием этого способа является сплошная поверхность рудного материала. Для вкрапленных руд этот способ не подходит.

С точки зрения использования полированного препарата для дальнейших аналитических исследований эти методы не годятся. Во-первых, происходит вытравливание и искажение химического состава поверхностного слоя. Во-вторых, искаженный рельеф поверхности минерала не позволяет применять локальные методы исследований, а при переполровке препаратов происходит смещение границ зон неоднородностей минералов, и привязка анализов теряет смысл.

Положительные результаты структурного травления пирита, халькопирита и самородного золота представлены на рис. П.17а–г, прил. 6.

В некоторых случаях при структурном травлении, возникают ложные рисунки или кажущиеся детали, что нужно учитывать при формулировке выводов. Некоторые примеры ложных эффектов приведены в работе [Бетехтин и др., 1958]. Возникновение таких рисунков объясняется, преимущественно, неправильным применением структурного травления (сильно концентрированный или слишком разбавленный реагент) или не соответствием препаратов требованиям к качеству полированной поверхности (см. табл. 3.1).

Начинающему исследователю не всегда удается уловить время, необходимое для нормального проявления структуры. На практике указанное в справочниках время иногда приходится менять, т.е. увеличивать или уменьшать в зависимости от хода реакции травления. В результате неправильного проведения травления могут возникнуть пятнистые, кольцеобразные или петельчатые рисунки. Они проявляются в одиночку или распространены в пределах зерна хаотично, в отличие от фигур травления, которые отражают рост отдельного зерна.

Некоторые примеры неоднозначных структур, выявленных при травлении, показаны на рис. П.17, прил. 6. Подобные рисунки можно объяснить

наличием радиоактивных дворигов (рис. П.17д, прил. 6) или перекристаллизацией сфалерита и наложением деформационных процессов, приведших к двойникованию (рис. П.17е, прил. 6). Для большей достоверности полученных результатов, необходимо проведение повторного травления.

При положительном результате травления часто удается установить внутреннее строение кристаллических зерен, закономерности распределения продуктов распада твердых растворов, определить наличие и состав реликтовых минералов и наложенной минерализации.

Частным случаем применения результатов структурного травления является создание трехмерной модели минеральных индивидов [Кринов, Ефимов, 2008]. Разработанная указанными авторами методика сводится к следующему: в первый момент появления зерна на поверхности полировки после травления его зарисовывают или фотографируют. Затем на поверхность препарата наносят три укола пирамидкой твердомера (нагрузка 20–50 г) и вычисляют их глубины. После этого препарат перешлифовывают до исчезновения следов пирамидки. После дополировки измеряется размер оставшихся следов. По разнице глубин определяется глубина среза и возможное отклонение плоскостей от истинной параллели. Затем операция повторяется до тех пор, пока интересующие индивиды исследуемого минерала не исчезают окончательно. В результате получают серии сечений с различной анатомией кристаллов. При совмещении полученных плоских изображений с помощью графических пакетов в единое трехмерное изображение получается объемная модель кристалла.

5.4. Методы и подходы изучения текстур и структур

При проведении текстурно-структурного анализа руд, впрочем, как и многих других видов геологических работ, важно определиться с масштабом исследования, который должен соответствовать поставленным задачам. Процесс исследования принято разбивать на три основных этапа: 1) полевые работы; 2) лабораторные работы; 3) интерпретация результатов полевых и лабораторных работ.

Полевое изучение включает в себя документацию естественных и искусственных обнажений, керн буровых скважин. Описание должно сопровождаться зарисовками и фотодокументацией взаимоотношений типов руд, пород, а также отбором образцов для изготовления полированных шлифов и аншлифов (рис. 5.1). Так как стенки забоев часто загрязнены, перед документацией целесообразно их очистить водой. Оптимальными являются систематические наблюдения по регулярной или близкой к ней сети. Количество образцов диктуется задачами исследования и степенью изменчивости руд. При работе с текстурно-ориентированными рудами необходимо фиксировать элементы залегания. На образце пишется маркировка и указывается плоскость распила.

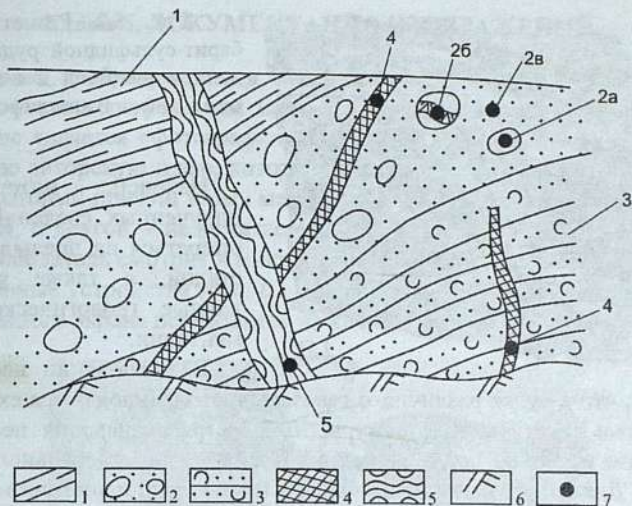


Рис. 5.1. Схематическая зарисовка обнажения гипотетического колчеданного месторождения, отражающая взаимоотношения между различными типами руд:

1 – полосчатые руды; 2 – обломочные руды: крупные обломки пород (2а) и руды (2б) в мелкообломочном сульфидном цементе (2в); 3 – неяснополосчатые руды; 4 – полиметаллические жилы; 5 – кристификационные сульфидные жилы; 6 – подстилающие породы; 7 – точки отбора образцов

Лабораторные работы предваряются систематизацией собранного в поле материала. После предварительной группировки, например, по текстурному или минералогическому признаку, отбираются наиболее характерные штуфы для распиловки и шлифовки. На препарированной поверхности детали строения читаются значительно лучше, чем на необработанных образцах. Очень важным моментом является правильный выбор сечения для распиловки. Для полосчатых, слоистых руд сечения должны быть ориентированы перпендикулярно ориентировке текстуры. Наиболее важные в генетическом и практическом отношении текстуры необходимо зарисовывать или фотографировать. Иногда перед фотографированием при помощи химических реагентов проводят выборочное окрашивание некоторых минералов.

Для выяснения деталей строения и минерального состава выделенных минеральных агрегатов на штуфе намечаются участки, из которых следует изготовить полированные и прозрачные шлифы (рис. 5.2). При выявлении структур рудных минералов, как правило, необходимо применять структурное травление (см. выше).

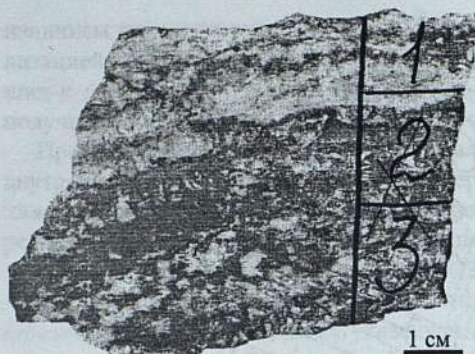


Рис. 5.2. Разметка штуфа барит-сульфидной руды с выделением участков для изготовления шлифов и аншлифов

Наконец, интерпретация полученных сведений должна опираться на предыдущие две стадии, а также учитывать данные геологической документации.

В заключении необходимо отметить, что в рудах различного генезиса часто наблюдаются сходные по морфологии текстуры и структуры. Для их распознавания необходимо тщательное изучение формы, строения и изменения минерального зерна и агрегата. Для определения последовательности кристаллизации минералов в агрегатах необходимо применять объемный морфологический анализ структур с использованием приемов онтогении минералов [Григорьев, Жабин, 1975; Жабин, 1979]. Онтогенический анализ минерального агрегата заключается в восстановлении истории его образования на основании изучения анатомии, поверхностей минеральных индивидов, их ориентировки, размещения в пространстве [Попов, 1985].

Вопросы для самопроверки

1. Чем определяется текстура руды?
2. Чем определяется структура руды?
3. Чем могут быть обусловлены включения в минералах?
4. Чем могут быть обусловлены кристаллические структуры?
5. Практическое применение результатов травления.

Глава 6. ДОКУМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Зарисовка изображения под микроскопом до недавних пор являлась наиболее часто используемым *методом документации изображений*. Зарисовка не является «фотографическим» изображением объекта, а содержит некую авторскую идею, которая далеко не всегда правильна. Субъективизм, который присущ этому методу, является с одной стороны его достоинством, с другой – недостатком. Зарисовка производится «с натуры», когда наблюдатель смотрит в микроскоп. Кроме того, можно использовать проекционные устройства (рис. 6.1). В этом случае изображение объекта с проекционного экрана переводится на кальку.

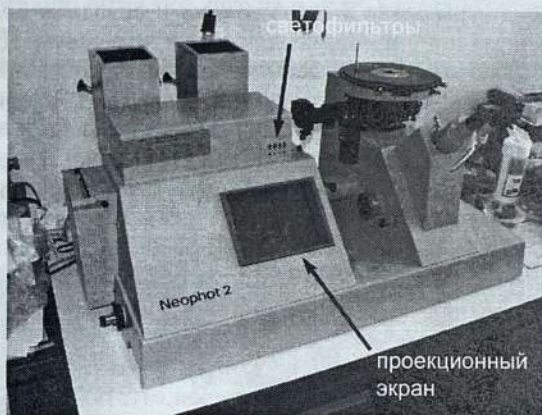


Рис. 6.1. Микроскоп Neophot 2 (Zeiss) оснащенный проекционным экраном. Оборудование Института минералогии УрО РАН

В то время как зарисовка содержит элемент интерпретации, *фотография* почти лишена этого элемента. В самом простом случае можно приставить фотоаппарат к окуляру и произвести съемку. Объектив фотоаппарата тогда выполняет функции хрусталика глаза, и плоскость фото пленки или фотографической матрицы – сетчатки. Но из-за недостаточного оптического согласования, фотографии, полученные таким способом, будут иметь плохое качество. Поэтому на современных микроскопах предусмотрен специальный тубус для фотокамеры. Согласование изображений осуществляется с помощью фотообъектива и фотоокуляра.

Еще до недавних пор для получения фотографических изображений с микроскопических объектов использовалась пленочная фотография, основанная на фотохимических процессах. Камера, используемая для микрофотографии, может быть обычным зеркальным фотоаппаратом, который

крепится посредством адаптера к микроскопу. Однако, зеркальная камера имеет ряд конструктивных недостатков: сотрясения, вызванные срабатыванием тросика или затвора, ухудшают резкость деталей на изображении. Удобные микрофотокамеры, используемые для получения высококачественных снимков, выпускались рядом фирм, специализирующихся на производстве микроскопов. Например, устройства серии «МС» фирмы Carl Zeiss.

Взрывной рост цифровых технологий привел к тому, что пленочная фотография практически изжила себя. Цифровые камеры, скомбинированные с компьютерным программным обеспечением (рис. 6.2), позволяют создавать изображения, сопоставимые по качеству с традиционной фотографией. Цифровые камеры легче в эксплуатации и обладают большей гибкостью для манипуляций с изображениями и их хранением. Цифровые изображения почти мгновенны. Их легко скопировать, сохранить, передавать посредством e-mail для консультаций и дискуссий, вводить в другие цифровые документы, экспортировать в системы анализа изображений. Большинство цифровых камер снабжены LCD экраном, который позволяет рассмотреть изображение до того, как оно будет передано на персональный компьютер.



Рис. 6.2. Микроскоп Olympus BX51 с цифровой камерой. Оборудование Института минералогии УрО РАН

Изображение в цифровой камере формируется линзами на сенсоре вместо пленки. Свет собирается крошечными элементами на экране – пикселями (pixel). Каждый пиксель определяет количество света, которое на него попало. Чем больше пикселей на единицу площади, тем выше разрешение. Это, возможно, наиболее важный параметр при выборе камеры.

Размер изображения может быть описан пикселями как, например, 1500×1700 или общим количеством пикселей, в приводимом примере, 2,55 млн. Разрешение также часто пишется как размер CCD (charged coupled device – прибор с зарядовой связью, ПЗС), который является числом пикселей на чип.

Когда свет попадает в камеру, он проходит через фильтры, которые разделяют пиксели на красный, зеленый и голубой тона. Световые лучи направляются в CCD, который является специализированным полупроводником, трансформирующим световые лучи в электрический заряд. Интенсивность электрического заряда пропорциональна интенсивности света, проходящего через объект. Таким образом, значения, сохраненные в цифровом изображении, отражают яркость и цвета каждого пикселя.

Для различных приложений в микроскопии можно использовать разные виды камер. Аналоговые 1CCD (одноматричные) и 3CCD (трехматричные) телевизионные цветные или черно-белые камеры в комплекте с платами оцифровки сигнала (фреймграбберами) обеспечивают получение изображений достаточно высокого качества, прежде всего за счет широких возможностей настройки по цвету, яркости и т.д. 3CCD (трехматричные) цветные камеры обеспечивают превосходные результаты при съемке микроскопических объектов на большом увеличении. Передача цветовых характеристик максимально соответствует оттенкам, наблюдаемым в микроскоп, а высокое разрешение системы ввода позволяет видеть все тонкие структуры объектов на захваченных изображениях при работе с большими увеличениями, что важно при исследовательской работе. Однако, аналоговые камеры такого качества достаточно дороги, да и, в целом, аналоговые системы ввода постепенно вытесняются цифровыми телевизионными системами.

Развитие цифровых телевизионных цветных или черно-белых систем ввода изображений началось в 90-х годах XX века. Профессиональные цифровые системы ввода, в том числе и для микроскопии, производят такие европейские и американские фирмы, как Baumer Optronik, Jenoptic Laser, Optik, Systeme GmbH, Soft Imaging Company (Германия), Diagnostic Instruments, Pixera, Roper Scientific Inc. (США), PixeLINK, Qimaging (Канада) и другие. Отличаясь по разрешению и, соответственно, ценовым характеристикам, все эти системы ввода обеспечивают возможности настройки по цвету, передачу изображения на монитор компьютера в режиме «живого» видео, большинство из них обладает также способностью работать в режиме накопления сигнала, а это значит, что их использование незаменимо в условиях слабой освещенности объектов. Все основные фирмы – производители микроскопов (Zeiss и Leica, Германия, Olympus и Nikon, Япония) – ориентируются именно на цифровые системы ввода для комплектации своего оборудования. Аналогично, все основные производители программ для работы с изображениями стремятся обеспечить поддержку

наиболее популярных систем ввода, чтобы управление ими и захват изображений производился напрямую из программы.

И наконец, третья группа систем ввода изображений – это цифровые фотоаппараты. Использование цифровых фотоаппаратов вполне оправдано при макросъемке с передачей полученных снимков в компьютер. Цифровые фотоаппараты также можно использовать при съемке со стереомикроскопов. В таких случаях цифровой фотоаппарат обеспечивает получение изображений достаточно высокого качества по разрешению и цвету. Однако использование цифровых фотоаппаратов не всегда целесообразно при съемке изображений препаратов, наблюдаемых в световой микроскоп, особенно при работе с большими увеличениями (объективы $40\times$ – $100\times$).

Важно понимать, что качество изображения, будь то пленочная или цифровая фотография, зависит от качества изображения в микроскопе. Плохо отъюстированное освещение микроскопа, грязная оптика, перпендикулярность плоскости препарата оптической оси микроскопа не позволят получить изображение удовлетворительного качества. Более того, незамеченные в окуляре недостатки юстировки будут прекрасно видны на фотографии.

Неудовлетворительное воспроизведение цветов на изображении и недостаточную контрастность можно значительно улучшить программными методами (например, с использованием программного пакета Adobe Photoshop) либо изменяя спектральный состав света с помощью светофильтров (см. главу 2). Процедура графической коррекции также может включать в себя поворот, обрезку, изменение размера и разрешения изображения.

Необходимым при документации изображения является фиксирование масштаба, при котором был сделан снимок. В специализированной аппаратуре масштаб на снимке отображается автоматически. Если это не предусмотрено, то масштаб можно определить с помощью измерительных окуляров и объект-микрометра (см. гл. 7.3). Важной деталью документации изображений является подпись диагностированных минералов. Для этого лучше использовать устоявшиеся аббревиатуры (см. прил. 1).

Глава 7. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Прежде всего, следует отметить, что микроскопист работает не с реальными объектами, а с их увеличенными изображениями, поэтому все наблюдения под микроскопом сводятся к анализу этих изображений.

Методические указания, изложенные выше, в основном, касались способов диагностики минералов и качественного описания морфологических особенностей минеральных индивидов и их агрегатов. Однако для использования результатов минераграфического изучения в целях технологического прогноза и при исследовании продуктов переработки, помимо качественного описания, нужны также количественные характеристики. Наиболее важными для руд являются размер зерен и количественные соотношения между различными минералами. При изучении продуктов технологического передела необходимо также количественное определение соотношения мономинеральных зерен и сростков. Геометрические характеристики руд и минералов важны для разработки и совершенствования схем переработки минерального сырья и лучшего понимания происхождения руд.

Количественный анализ изображений состоит в измерении геометрических особенностей двумерных изображений плоских сечений консолидированных руд или препаратов, изготовленных из разрозненных частиц минералов, технологических продуктов и др. Полученные геометрические характеристики (линейные и/или площадные) могут быть соотнесены с характеристиками реальных зерен (объемными) при соблюдении ряда методических требований.

При вычислении химического состава руды по данным количественного минералогического анализа можно пользоваться справочными данными о содержаниях металлов в минералах.

Осуществляя анализ изображений, необходимо учитывать многочисленные операционные ограничения. Ошибки могут быть связаны с 1) недостаточным пространственным разрешением оптических систем; 2) неправильной диагностикой; 3) неправильной записью результатов; 4) неправильным обчетом результатов. Кроме операционных ошибок возникают и статистические. Эти ошибки (в отличие от операционных) можно оценить и поддерживать в определенных пределах, проводя необходимое количество независимых наблюдений.

Количественные измерения и анализ наблюдаемых изображений может быть ручным или автоматизированным. Ручные измерения целесообразно использовать для исследования небольшого числа сложных и необычных материалов. Когда задача состоит в проведении большого числа измерений на сравнительно простых и обычных образцах, лучше использовать автоматизированные системы [Джонс, 1991].

7.1. Ручные измерения

7.1.1. Измерения линейных размеров зерен под микроскопом

Ручное измерение линейных размеров зерен под микроскопом осуществляется с помощью измерительного окуляра или окуляр-микрометра.

Измерительный окуляр представляет собой обычный окуляр Гюйгенса с установленной в поле зрения шкалой или сеткой. Шкалой пользуются для линейных измерений, а сеткой – для площадных. Для того чтобы пользоваться измерительным окуляром, необходимо знать цену одного деления линейной шкалы (или сетки).

Цена деления определяется отдельно для каждого объектива. Для этого на столик микроскопа кладется объект-микрометр и на него фокусируется микроскоп. Один из штрихов объект-микрометра совмещается с началом линейной шкалы (или сетки) окуляра. Определяется, сколько делений объект-микрометра укладывается в линейной шкале (или сетке) окуляра при объективах различного увеличения.

Цена деления шкалы (или сетки) окуляра вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = ZT/A, \quad (17)$$

где ε – цена деления шкалы или сетки окуляра, мм; Z – число делений объект-микрометра; T – цена деления объект-микрометра; A – число делений шкалы (или сетки) окуляра.

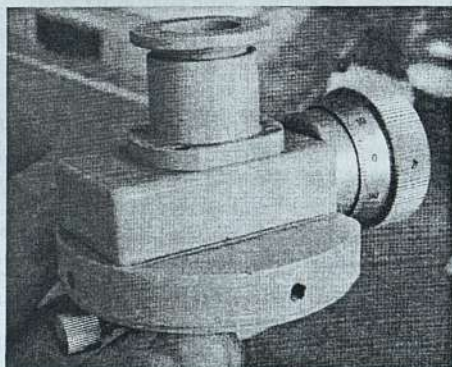


Рис. 7.1. Окулярный винтовой микрометр (Zeiss). Оборудование Института минералогии УрО РАН

Измерительный окуляр может оснащаться микрометрическим винтом (рис. 7.1), что делает измерения более точными.

При описании руд обычно указываются пределы измерений размера зерна и преобладающие величины. Изометричные зерна характеризуются величиной поперечного сечения, для удлиненных указывается длина и ширина. Не следует забывать, что мы имеем дело с сечениями зерен, при этом максимальный линейный размер сечения достигается далеко не во всех зернах, попавших в плоскость среза.

7.1.2. Измерение количественных соотношений между минералами

Площадной метод

Первое упоминание о количественной методике получения данных при анализе изображений относится к 1848 г. Французский минералог М. Делесс установил объемное содержание (в %) определенного минерала в породе, измерив площадь, занимаемую этим минералом в произвольном сечении породы. Он предложил очень трудоемкий способ измерения площадных соотношений: очертания измеряемого минерала переносят на кусок промасленной просвечивающей материи той же площади, что и поверхность образца, затем наклеивают материю на листок фольги той же площади, вырезают ножницами те части, которые соответствуют зернам интересующего минерала, взвешивают их и получают «аналитический баланс». Отношение массы частей листочка фольги, представляющих данный минерал, к общей массе листочка фольги дает довольно точную площадную оценку количества минерала на измеряемой поверхности. Далее М. Делесс предположил, что площадное соотношение эквивалентно объемному соотношению минерала в образце в случае, если:

- 1) Измеряемая площадь представляет собой случайное сечение породы;
- 2) Измеряемая площадь сечения много больше отдельных зерен данного минерала;
- 3) Случайное сечение достаточно велико, чтобы получить статистически достоверное число измеряемых зерен.

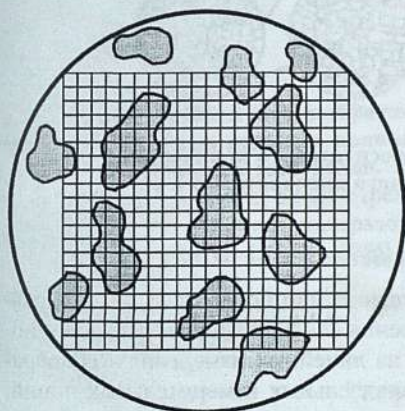


Рис. 7.2. Схематичное изображение препарата в микроскопе. Сеткой обозначена площадь сечений минералов в плоскости шлифа. По [Юшко, 1966]

Позднее метод М. Делесса был опробован на зарисовках петрографических шлифов и микрофотографиях [Войтеховский, 2009]. Принцип измерений, заложенный в методе, лег в основу планиметрического метода и использован в современных автоматизированных системах анализа изображения.

При ручном подходе в фокальную плоскость окуляра вставляется стеклянная пластинка с квадратной сеткой. Далее подсчитывают количество клеток, покрывающих каждый минерал, при этом соединяют и дополняют «на глаз» неполные клетки до целых (рис. 7.2). После подсчета всех минералов, наблюдаемых в преде-

лах квадратной сетки, передвигают шлиф с помощью препаратоводителя на новый участок. Чем большая площадь шлифа охвачена подсчетом, тем точнее цифры, характеризующие количественные соотношения минералов в шлифе.

Для получения объемных соотношений подсчитанного слоя, его толщина условно принимается равной единице. При этом предполагается, что количественные соотношения минералов в пределах слоя те же, что были установлены в плоскости шлифа.

Упрощенный прием оценки площадей минералов в шлифе был предложен *С. А. Вахромеевым* и получил название как метод стандартного препарата. Количественные содержания минералов в шлифе устанавливаются при визуальном сравнении с эталонной диаграммой (рис. 7.3).

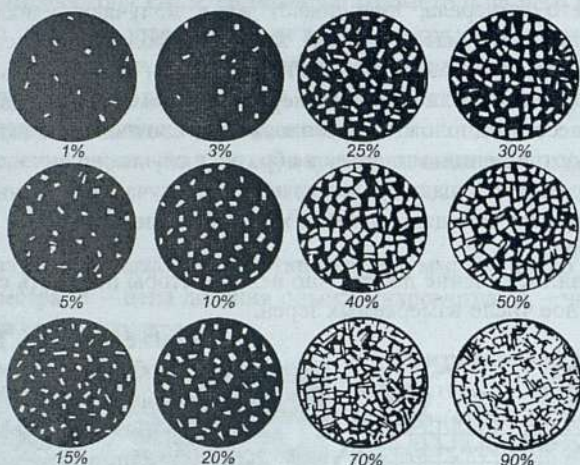


Рис. 7.3. Определение относительного количества минералов методом стандартного препарата. По [Юшко, 1966]

Линейный метод

В 1898 г. *А. Розиваль* разработал существенно более простой, по сравнению с методом Делесса, метод измерения соотношений минералов в породе, основанный не на площадных, а на линейных измерениях. На образец накладывается диффузная сетка параллельных измерительных линий; процент от общей длины этих линий, попадающий на измеряемый минерал, дает линейное отношение этого минерала:

$$L_A/L_T = \text{линейное отношение минерала } A, \quad (18)$$

где L_A – общая длина отрезков линий, попадающих на минерал A , L_T – общая длина линий, пересекающих измеряемое сечение.

Линейное отношение минерала эквивалентно его объемному содержанию в породе. Эквивалентность сохраняется, когда:

- 1) Измеряется случайное сечение образца породы;
- 2) Сечение достаточно велико и включает достаточное число зерен интересующего минерала;
- 3) Измеряемая линия имеет длину большую по сравнению с «линейными» размерами измеряемых зерен;
- 4) Каждое зерно пересекается не более, чем одной измеряемой линией;
- 5) Ориентировка линий не совпадает с линейными или текстурными особенностями образца.

При количественном минералогическом подсчете линейным методом используют окуляр-микрометр (рис. 7.4), а также интеграционный столик Андина, который помещается на столик микроскопа.

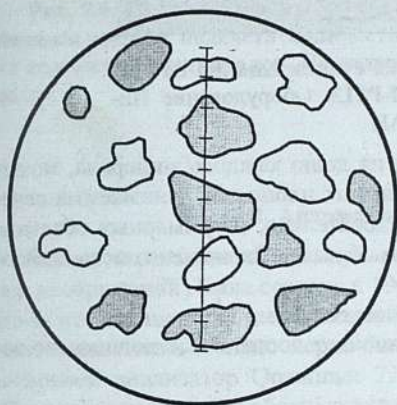


Рис. 7.4. Схематическое изображение линейного метода подсчета количественного содержания минералов. Подсчитывается суммарная длина отрезков, пересекающих сечения минералов в плоскости шлифа. По [Юшко, 1966]

дому минералу, определяется по разности отсчетов на соответствующем измерительном барабане.

Интеграционный столик состоит из металлической рамы, на которой смонтированы шесть измерительных барабанов, снабженных винтами (рис. 7.5). С помощью каждого из них шлиф может быть перемещен в одном направлении. Прибор устанавливается так, чтобы движение производилось параллельно нитям окулярного креста. Затем с точкой пересечения креста нитей совмещают границу зерна и вращают один из винтов с измерительным барабаном до совмещения с этой точкой, следующей по ходу границы этого зерна. То же делается и с другими минералами при вращении винта другого барабана и т. д. После окончания подсчета суммарная длина отрезков, отвечающих каж-

Точечный метод

Система точечного анализа для определения соотношений минералов была предложена в 1930 г. А. А. Глаголевым и независимо от него Е. Томпсоном. Метод основан на следующем положении: если в плоскости шлифа равномерно расположить некоторое количество точек (порядка 1000), то со-



Рис. 7.5. Интеграционный столик Андина на станции микроскопа ПОЛАМ-Р113. Оборудование Института минералогии УрО РАН

отношение чисел точек, пришедшихся на долю каждого минерала, может быть приравнено к соотношению суммарных площадей, занимаемых сечениями этих минералов в шлифе, а, следовательно, и суммарных объемов, занимаемых зернами этих минералов в образце. Эквивалентность соблюдается при условии, что:

1. Измерения проводятся на случайном сечении;
2. Сечение достаточно велико и включает достаточное количество зерен измеряемого минерала;
3. Число промежутков в сетке велико;
4. Ориентировка сетки произвольна по отношению к любой линейной характеристике образца.

При этом

$$V_A = P_A/P_T, \quad (19)$$

где P_A – число измеряемых точек, попадающих на минерал A ; P_T – общее число измеряемых точек; V_A – объемное отношение минерала A .

Техника подсчета точечным методом заключается в следующем. С помощью одного из винтов препаратоводителя шлиф передвигается скачками, равными среднему диаметру зерен, и ведется подсчет зерен минералов, попадающих на крест нитей (рис. 7.6). Таким образом, зондируется вся поверхность шлифа. Результаты подсчета выражаются в процентах содержания каждого минерала в шлифе.

По Глаголеву, точность количественного минералогического анализа, произведенного точечным методом, определяется по формуле:

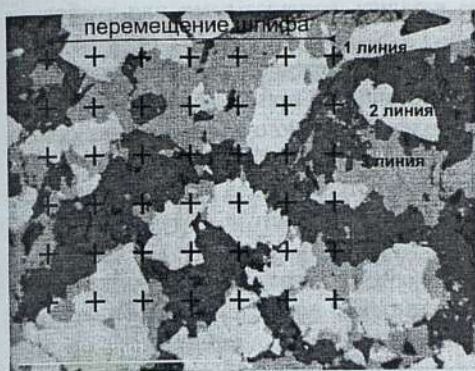


Рис. 7.6. Схематическое изображение точечного метода подсчета количественного содержания минералов. По материалам авторов

$$\beta = 0.67\sqrt{(100-\alpha)/n}, \quad (20)$$

где β – вероятная погрешность в определении объемного содержания компонента (в % к сумме анализа, принимаемой за 100 %), α – истинное содержание (в об. %) компонента, n – общее число равномерно расположенных в шлифе точек.

Для автоматической регистрации минералов при просмотре шлифа А. А. Глаголевым был сконструирован специальный прибор – пуш-интегратор, состоящий из счетчика-регистратора и препаратоводителя.

7.2. Автоматизация измерений

Первая *компьютерная система анализа изображений* (или анализатор изображений) была создана в 1968 г. компанией Baush & Lomb (США). Из-за несовершенства компьютерной техники того времени система позволяла захватывать только черно-белые изображения. Вскоре после этого цифровой анализатор Quantimet 720 был произведен компанией Imasco (Великобритания). Он обеспечивал оцифровку изображений в 64 градациях серого. Однако, оцифрованные изображения не могли быть сохранены или как-либо обработаны. В 1974 г. радикальный прорыв в технологии совершила западногерманская фирма Leitz, представившая систему, которая была основана на принципах «текстурного анализа и математической морфологии».

В 1980–81 гг. западногерманская фирма Kontron и английская Cambridge Instruments (купившая компанию Imasco), каждая отдельно, создали анализаторы изображений с программным обеспечением. Эти системы обеспечивали хранение полноформатных изображений в памяти компьютера. Стала возможной разработка алгоритмов фильтрации изображений и некоторых других операций. С этого времени развитие анализаторов изображений пошло стремительными темпами. Постоянно совершенствовалась аппаратная часть анализаторов (системы ввода изображений, компьютеры) и программное обеспечение. Анализатор изображений сегодня – это автоматизированное компьютерное рабочее место, позволяющее специалисту

выполнять задачи, которые вчера казались нерешаемыми или требовали огромных затрат сил и времени.

Полученное каким-либо способом изображение плоского сечения изменяется автоматически методами, аналогичными применяемым для анализа сходных изображений в ручном методе. В первую очередь интересующий минерал диагностируется наиболее удобным способом среди сопутствующих ему минералов. Затем изображение готовится для анализа. Конечной целью такой подготовки является наиболее корректное выделение интересующей фазы.

Наиболее простым и часто используемым методом выделения объектов является выделение по яркостным характеристикам. При использовании этого метода выделения объектов или фаз производится выбор всех точек изображения, попадающих в определенный интервал яркости. Такой отбор осуществляется по гистограмме яркости для данного изображения. Оцифрованное изображение представляет собой набор точек, яркость которых (для 8-битных изображений) лежит в интервале от 0 (абсолютно черный цвет) до 255 (абсолютно белый). Гистограмма яркости изображения показывает процентное содержание точек определенной яркости. Выделение объектов по яркости обычно производится методом установки пороговых значений яркости, и все точки изображения, лежащие в пределах данных значений, будут выделены на изображении как маски объектов, которые и будут затем измеряться.

Реже в минералогической практике используется выделение объектов по цвету (применяется для объектов с одинаковыми яркостными характеристиками, отличающимися по цвету), выделение по текстурным особенностям (объект распознается по внешним признакам или текстурным особенностям), наконец, ручное выделение объектов, когда пользователь системы указывает ей, что считать объектом, а что – нет.

В заключении проводится анализ изображения с определением интересующих параметров (содержание фазы, морфологические особенности частиц и т. д.). Морфологические параметры зерен можно анализировать как в полуавтоматическом, так и в автоматическом режиме. Для измерений в полуавтоматическом режиме не требуется выделять объекты изображения. Измеряя линейные размеры объекта или структуры, пользователь системы указывает на изображении начальную и конечную точку отрезка прямой или кривой линии, получая в таблице или непосредственно на изображении информацию о длине отрезка. Аналогичным образом осуществляется измерение углов или радиуса окружности. Простой подсчет объектов также может проводиться методом нанесения меток.

Наибольший интерес для специалиста, использующего анализатор изображений, представляют автоматические измерения выделенных объектов или фаз. Современный анализатор позволяет получить точную количественную информацию по десяткам и сотням объектов изображения за доли

секунды, что далеко превосходит возможности человека. Предлагаемый разными фирмами-производителями набор параметров варьирует, однако, в любом случае измеряемые параметры могут быть сгруппированы следующим образом:

- площадные;
- размерные (линейные);
- описывающие форму;
- характеризующие положение и ориентацию объектов;
- денситометрические или оптические.

В настоящее время на рынке присутствует множество программных продуктов для анализа изображений. К наиболее известным фирмам, системы которых широко используются, относятся:

– Leica Microsystems (www.leica-microsystems.com, Германия), производящая универсальные и специализированные системы для различных применений;

– Leco (www.leco.com, США) и Buehler (www.buehler.com, США) – компании ориентированные на материаловедение и металлографию;

– Media Cybernetics (www.mediacy.com, США), фирма, которую можно назвать лидером в данной области, с ее продуктом Image Pro;

– Clemex (www.clemex.com, Канада), специализирующаяся, главным образом, на программном обеспечении для анализа изображений в применении к решению материаловедческих задач;

– Noesis (www.noesis.fr, Франция), предлагающая универсальное программное обеспечение для анализа изображений.

Из российских разработчиков известна компания ВидеоТест (<http://www.videotest.ru/>), занимающаяся разработкой программ анализа изображения, в том числе и в области материаловедения.

Помимо коммерческих систем можно найти и свободно распространяемые программные пакеты, которые, возможно, уступают в функциональности, но также могут быть использованы. Например, программа ImageTool (<http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>).

Приведенные ниже примеры базируются на анализе арсенопиритовой руды с помощью программы ImageTool. На подготовленном изображении арсенопирит выделен черным цветом, нерудный цемент – белый. Подсчет черных и белых пикселей привел к следующим результатам: арсенопирит – 68.89 площадных %, нерудная фаза – 31.11 % (рис. 7.7).

Программа ImageTool позволяет определять различные геометрические характеристики – площадь (Area, S), периметр (Perimeter, P), длина большой оси (Major axis, a_{max}), длина малой оси (Minor axis, a_{min}), приближенность к кругу (Roundness), удлиненность (Elongation), компактность (Compactness).

Приближенность к кругу (Roundness) рассчитывается как $4\pi S/P^2$. Результат варьирует от 0 до 1 (круг имеет коэффициент 1).

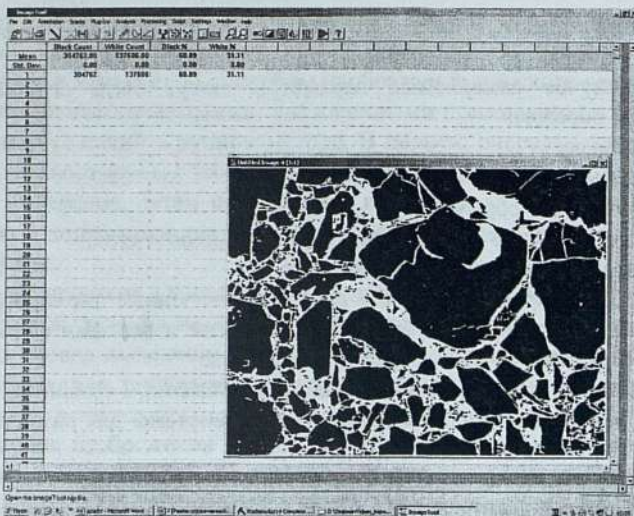


Рис. 7.7. Анализ содержаний арсенипирита (черный) с помощью программы ImageTool. По материалам авторов

Удлиненность (Elongation) – отношение длин большой и малой осей a_{\min}/a_{\max} . Результат варьирует от 0 до 1. Если коэффициент равен 1, то объект круглый или квадратный (изометричный). При уменьшении коэффициента, он становится более удлиненным.

Ферет диаметр (Feret diameter) – диаметр круга, имеющего ту же площадь, что и объект. Рассчитывается как $\sqrt{(4S/\pi)}$.

Компактность (Compactness) – рассчитывается как $\sqrt{(4S/\pi)}/a_{\max}$. Также характеризует приближенность к кругу и варьирует от 0 до 1. Чем менее округлый объект, тем меньше единицы компактность.

Длина большой оси – длина самой длинной линии, которую можно провести на объекте.

Длина малой оси – длина линии, которую можно провести на объекте перпендикулярно большой оси.

Определение морфологических параметров зерен можно осуществлять как в полуавтоматическом, так и автоматическом режиме.

После того, как измерения проведены, становится возможной статистическая обработка результатов анализа, а также, при необходимости, классификация объектов по любому из измеренных признаков или комплексу признаков. Анализ морфологических особенностей той же арсенипиритовой руды позволяет выделить на рассматриваемом снимке 365 частиц, провести полный морфологический анализ и рассчитать статистику измерений (рис. 7.8).

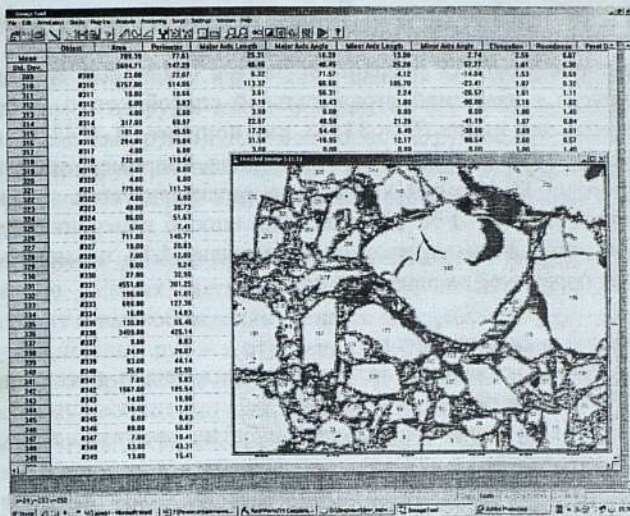


Рис. 7.8. Результаты анализа морфологии частиц арсенопирита в программе ImageTool. По материалам авторов

Также с помощью программы ImageTool возможно получение оптических характеристик объекта. Следующий пример демонстрирует оценку отражательной способности кверцеллита из месторождения Мургул, Турция (рис. 7.9). Процедура измерения должна предваряться градуировкой изобра-

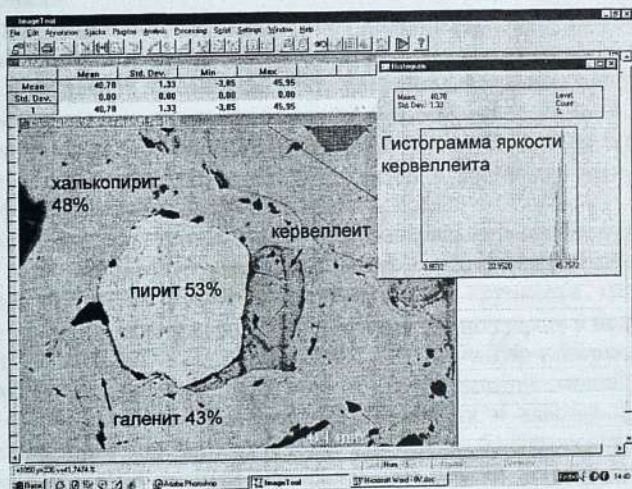


Рис. 7.9. Оценка отражательной способности кверцеллита с помощью программы ImageTool. По материалам авторов

жения по оптической плотности. Яркость каждого пикселя оцифрованного изображения варьирует от 0 до 255. Градуировка, в сущности, сводится к приведению имеющихся значений яркости к 100 %. Для этого используются минералы с известной отражательной способностью. В рассматриваемом случае, это пирит ($R = 53\%$), халькопирит ($R = 48\%$) и галенит ($R = 43\%$). Далее можно проводить измерения, например, построив гистограмму яркости. Изучаемый кервеллеит характеризуется отражательной способностью, равной 41 %. Приведенный способ измерений конечно же не заменяет микрофотометрирование (см. главу 4.1), но может успешно служить для первичной экспрессной оценки.

Вопросы для самопроверки:

1. Что понимается под анализом изображения в практике геолого-минералогических исследований?
2. Способы подсчета минералов в плоских сечениях, перечислите и охарактеризуйте.
3. Укажите наиболее предпочтительную методику подсчета минералов в плоских сечениях, в чем ее преимущества?

Глава 8. РУДНАЯ МИКРОСКОПИЯ И ПЕРЕРАБОТКА РУД

Обогащение – процесс извлечения ценных минералов из природных руд. Лишь немногие руды могут обходиться без обогащения (например, некоторые железные руды). Для большинства руд содержание полезного компонента варьирует от нескольких % (цветные металлы) до нескольких г/т (благородные металлы). Большинство операций обогащения состоит из двух стадий:

1. Уменьшение размера кусков добываемой руды до размеров приблизительно равных металлсодержащему компоненту. Измельчение приводит к высвобождению ценных минералов из рудной массы, а в случае сложных руд – к отделению их друг от друга. Для высвобождения размер частиц доводится до нескольких сотен микрометров, и поэтому необходимо дробление и истирание.
2. Разделение минералов, в результате которого получают концентрат (где накапливаются ценные минералы), а остаток уходит в хвосты обогащения. Разделение основано на различиях в физических, химических, поверхностных свойствах рудных и жильных минералов.

Решение задач технологической минералогии требует применения комплекса методов, среди которых рудная микроскопия играет важную роль. С ее помощью осуществляется определение ценных минералов и минералов, препятствующих обогащению или металлургическому переделу, контроль процессов измельчения и разделения. Она позволяет получать информацию о размере частиц, природе их сростаний и характере границ между зернами.

На стадии поисково-оценочных работ на месторождении минералогическое изучение производится для характеристики природных разновидностей руд, и включает в себя оценку структурно-текстурных особенностей, минерального состава, параметров раскрытия основного рудного минерала [Технологическая..., 1990]. Кроме того, изучается баланс распределения полезного компонента по минералам, состав и свойства главных минеральных форм полезного компонента.

На стадии предварительной разведки минеральный состав руды изучается для прогнозирования технологических свойств природных типов и разновидностей. В частности, исследуют классы крупности, гранулометрический состав рудных вкраплений и нерудных минералов в недробленной и стадияльно дробленной руде, определяют их удельную поверхность, степень раскрытия руды при измельчении, распределение типов сростков, границы сростаний рудных минералов в сростках и классах крупности, форму нахождения полезных компонентов в руде, баланс основных и сопутствующих элементов по рудным минералам. На стадии детальной разведки осуществляется технологическая оценка минералогических параметров руды на основе изучения полупромышленной пробы.

В целом, задачи прикладных минераграфических исследований и методы их решения охарактеризованы в таблице 8.1.

Таблица 8.1

Методы решения задач прикладных минераграфических исследований
(по [Технологическая..., 1990])

Задача	Расшифровка задачи	Методы
Диагностика минералов руд	Определение промышленных, непромышленных, неметаллических промышленных и жильных минералов	Микроскопия отраженного света, рентгеновский анализ, электронная микроскопия, микронзондовый и термический анализ и др.
Количественная оценка содержаний минералов	Количество промышленных, непромышленных, неметаллических промышленных и жильных минералов	Микроскопия отраженного света, рентгенофазовый анализ
Определение свойств минералов руд	Определение твердости, магнитности, электропроводности, растворимости, поверхностно-активных свойств, плотности и др.	Микроскопия отраженного света, методы изучения электрических свойств (термо-ЭДС, электропроводность), магнитности (магнитная порошковая графия), микротвердости
Текстурно-структурный анализ руд	Определение текстур и структур рудных и нерудных минералов со специфической информацией о типах прорастаний (включая такие данные, как побежалость, пленки, прожилки и т.д.), пористости и ямчатости	Микроскопия отраженного света, электронная микроскопия
Классификация частиц в промпродуктах	Определение относительного размера частиц, сростаний, количества сростаний и отдельных минералов в частицах, представленных прорастаниями	Микроскопия отраженного света

Диагностика минералов руд является первоочередной задачей при технологической оценке. Рудообразующие минералы принято разделять на четыре группы:

1. Промышленные;
2. Минералы-носители полезных примесей;
3. Минералы-носители вредных примесей;
4. Непромышленные.

Ценность руды определяется, главным образом, концентрациями промышленных минералов и минералов, содержащих полезные примеси. Минералы, содержащие вредные примеси, могут ухудшить качество конечного продукта, поэтому их диагностика также важна. Примером такого рода может служить присутствие в золотых рудах, подготавливаемых для цианирования, сульфидов железа, антимонита, сульфидов меди. Диагностика непромышленных минералов имеет важное значение для обогащения. Одни нерудные минералы могут представлять экономический интерес, другие – затрудняют обогащение. При изучении минерального состава руды в основе лежит комплекс методов рудной микроскопии и петрографии. Рентгеновский и термический анализ используют для характеристики агрегатов высокодисперсных фаз, глинистой или слюистой жильной массы; методы локального химического анализа – для уточнения диагностики минералов, изучения их химического состава. Для анализа рентгеноаморфных и аморфных фаз используется ИК-спектроскопия, минералов железа – ЯГР-спектроскопия. Так же как и определение схемы разделения минералов после их диагностики, эффективность разделения может контролироваться исследованием продуктов, получаемых на различных стадиях обогащения (рис. П.18, прил. 6). Поэтому необходимо тщательно изучать как концентраты, так и «хвосты». Диагностика и характеристика рудных минералов важны также для последующей металлургической переработки концентратов.

Количественная оценка содержаний минералов для технологических целей, как в исходных рудах, так и продуктах обогащения базируется на количественных измерениях. В продуктах обогащения руды определяют количество и размеры минеральных сростков, а также свободных частиц рудных и нерудных минералов. Это могут быть минеральные включения, зерна или мономинеральные агрегаты (вкрапленность, прожилки, полоски, каемки).

Для количественной оценки используются как «ручные» методы измерений, так и компьютерные системы анализа изображений (см. главу 7). Совмещение последних с моторизованными моделями микроскопов позволяет почти полностью автоматизировать анализ и увеличить его экспрессность. Световая микроскопия позволяет анализировать частицы, размер которых более 3–5 мкм. Частицы меньшего размера, как правило, не участвуют в разделении и образуют шлам.

Определение свойств минералов руд. Разделение минералов основано на различиях в их физических и химических свойствах, отсюда вытекает важность определения свойств минералов, которые могут повлиять на процесс переработки. Минеральные фазы даже одного вида могут вести себя в процессе обогащения по-разному. Это связано с тонкими различиями в их свойствах, обусловленных разными условиями рудообразования. С другой стороны, присутствие в рудах промышленных и непромышленных мине-

ралов с близкими свойствами может привести к загрязнению концентрата. В минераграфической практике различия в физических свойствах минералов выявляются методами изучения электрических свойств (термо-ЭДС, электропроводность), магнитности (магнитная порошкография), микротвердости (см. главу 5).

Текстурно-структурные особенности руды являются одним из важнейших признаков минерального сырья, оказывающих решающее влияние на его обогатимость. Их изучение позволяет прогнозировать и контролировать поведение руды в процессе измельчения, определить оптимальный размер зерен для эффективного высвобождения. Недостаточное дробление может привести к потерям промышленных минералов, а переизмельчение — к дополнительному расходованию энергии и шламообразованию. Эффективность измельчения и обогащения также нужно контролировать изучением продуктов дробления, концентратов, промпродуктов и хвостов в полированных препаратах.

Классификация частиц в промпродуктах. При измельчении руды для ее дальнейшего обогащения физико-механическими способами обычно невозможно обеспечить полное освобождение частиц всех ценных компонентов, т. е. раскрытие всех сростков. Поэтому измельчение ведется до крупности, определяемой, в основном, экономическими соображениями. Определение оптимальной крупности измельчения — важная задача. Ее основной метод решения — выявление характерных минеральных сростаний, содержащих ценные компоненты, определение типичных размеров минеральных выделений, статистическая обработка полученных данных. Это позволит определить экономически оптимальную крупность измельчения, которая всегда значительно больше, чем требующаяся для полного раскрытия всех частиц.

По крупности зерен руды принято разделять на пять групп (табл. 8.2): 1) крупнозернистые с величиной зерен в диаметре 20–2 мм; 2) среднезернистые — 2–0,2 мм; 3) мелкозернистые — 0,2–0,02 мм; 4) тонкозернистые — 0,02–0,002 мм; 5) субмикроскопические — 0,002–0,0002 мм; 6) коллоидно-дисперсные с величиной частиц менее 0,0002 мм.

Особенно важным параметром для технологии является характеристика сростаний минералов, т.к. этим критерием определяется полнота разделения. Грубое подразделение по данному признаку позволяет определить два типа: 1) минеральные агрегаты с гладкими и ровными границами сростаний; 2) минеральные агрегаты со сплошными границами сростаний.

Первый тип более благоприятен для обогащения. Легко обогащаются зернистые и кристаллобластические структуры. Колломорфные руды обогащаются с небольшими потерями только в том случае, если промышленные минералы слагают крупные мономинеральные агрегаты с однородным строением, которые легко освобождаются от непромышленных минералов.

Таблица 8.2

Классификация минеральных выделений по размеру и способы их извлечения из руд (по [Юшко, 1966])

Величина минеральных выделений	Размер выделений	Условия наблюдения и измерения	Технологические процессы, обычно применяемые для извлечения минеральных выделений из руд
Крупные	20–2 мм	Отчетливо наблюдаются невооруженным глазом; размеры определяются непосредственным измерением	Осадка: обогащение в тяжелых средах (суспензиях); иногда сухая магнитная сепарация в сильном или слабом магнитном поле; отчасти – гидрометаллургические процессы; извлечение путем перколяционного выщелачивания
Средние	2–0.2 мм	Наблюдаются невооруженным глазом; размеры определяются непосредственными измерениями и отчасти измерениями под лупой	Концентрация на столах (песковых и шламовых); иногда макромагнитная сепарация в слабом или сильном магнитном поле (также обогащение в тяжелых средах); электростатическое обогащение; гидрометаллургические процессы извлечения; перколяционное или агитационное выщелачивание
Мелкие	0.2–0.02 мм	Различимы при помощи лупы или микроскопа; размеры определяются измерениями под микроскопом	Флотация; в редких случаях концентрация на специальных шламовых столах; иногда процессы статического отмучивания; при гидрометаллургическом извлечении – выщелачивание при агитации
Тонкие	0.02–0.002 мм	Наблюдаются и измеряются только под микроскопом	Статическое отмучивание в присутствии электролитов глинистых и других руд; в редких случаях – флотация или гидрометаллургическое извлечение
Субмикроскопические	0.002–0.0002 мм	Видны в обыкновенный микроскоп при самых больших увеличениях; измеряются специальными методами	Не извлекаются методами механического обогащения; обычно перерабатываются совместно с компонентами вмещающей породы; раздельное извлечение требует разработки специальных методов
Коллоидно-дисперсные	<0.0002 мм	Не различаются при наблюдении в световом микроскопе даже при самых сильных увеличениях; требуют специальных методов наблюдения и измерения (например, электронный микроскоп и др.)	

В случае сростаний второго типа избежать потерь удастся не всегда. В эту группу объединяются сложные по рисунку коллоидные и метаколлоидные, цементные и другие типы минеральных агрегатов. Некоторые из них (коллоидные, метаколлоидные, цементные, коррозионные, каркасные) могут быть благоприятными для процессов выщелачивания (химического и бактериального), т.к. обуславливают повышенную неоднородность минерального состава, физических и химических свойств руды, пористость, большую поверхность коррозионных границ.

При рассмотрении проблем высвобождения рудных минералов полезна простая классификация текстур и структур, основанная на возможных потерях ценного компонента (табл. 8.3, 8.4).

Таблица 8.3

Значение морфологических типов структур при обогащении руд
(по [Юшко, 1966])

Форма минерального зерна	Группы структур руд в зависимости от потерь ценного компонента при обогащении		
	Без потерь (I)	Потери минимальные (II)	Потери максимальные (III)
Идиоморфная	Идиоморфнозернистая	Идиоморфнометазернистая	
Аллоотриоморфная	Аллоотриоморфнозернистая, гипидиоморфнозернистая, порфиrowидно-зернистая, сидеронитовая, ориентированно-зернистая	Гипидиоморфнометазернистая, пойкилитометазернистая, пойкилитобластическая	
Коллоидно-дисперсная		Концентрически-зональная	Гелевая, колломорфно-метаколлоидная
Эмульсионная (рис. П.19, прил. 6)			Эмульсионная
Пластинчатая	Катакластическая		Пластинчатая, решетчатая, петельчатая, зональная
Реликтов-остаточная		Скелетная, реликтов-остаточная, разьедания	
Осколки	Дробления		
Обломки	Порфиrowкlastическая, ориентированно-кlastическая		

Значение морфологических типов текстур при обогащении руд
(по [Юшко, 1966])

Форма минерального агрегата	Группировка текстур руд в зависимости от потерь ценного компонента при обогащении		
	Без потерь (I)	Потери минимальные (II)	Потери максимальные (III)
Минеральные образования удлиненной формы (полоски, прослой и др.)	Полосчатая, слоистая, линзовидная, крустификационная, сланцеватая, плейчатая, гнейсовидная	Полосчатая, слоистая, линзовидная	
Прожилки и дендриты	Прожилковая и просечковая	Прожилковая, нитеобразная, пестельчатая, решетчатая, графическая, субграфическая	
Цементная		Цементная	
Минеральные образования округлой формы (почки, оолиты, нодулы и др.)	Нодулярная, оолитовая, очковая, секреторная, конкреционная, кокардовая и жеодовая	Вкрапленная, пятнистая, кокардовая	Эмульсионная

Текстурно-структурный анализ руд выполняется, как при полевой стадии исследований (макротекстуры, наблюдаемые непосредственно в керне скважин или в обнажениях), так и в камеральный период (изучение пришлифованных штуфов и полированных шлифов). При этом измеряются линейные размеры выделений, в рудах со слоистой текстурой измеряют нормальные или истинные мощности слоев, с вкрапленной – размеры вкрапленников или участков, не содержащих рудные минералы. При работе с технологическими пробами наиболее представительные данные могут быть получены при измерениях всех кусков пробы, что возможно только для небольших (20–40 кг) лабораторных проб. Для получения надежных статистических данных общее число единичных измерений должно быть не менее 300 для каждой разновидности руды [Технологическая..., 1990]. Число штуфов, которые необходимо измерить по технологической пробе для различных размерных типов текстур, зависит от размера текстурного элемента (табл. 8.5).

Данные измерений текстуры руд обобщают по следующим классам крупности: +25; –25 + 10; –10 + 5; –5 + 3; –3 + 1; –1 мм. Для количественной оценки текстурно-структурных особенностей руды в полированных шлифах

Необходимое число штuffов для определения текстуры
(по [Технологическая..., 1990])

Преобладающий размер текстурного элемента, мм	0–5	0–10	0–25
Максимальное число штuffов	25	60	150

в его плоскости намечают три линии. Расстояние между линиями должно в 3–4 раза превышать размер максимальных сечений. По выбранным линиям измеряют сечения рудных и нерудных выделений и относят к размерным классам: $-0,2$; $+0,1 - 0,2$; $+0,074 - 0,1$; $+0,045 - 0,074$; $+0,03 - 0,03$; $-0,03$ мм. Гранулометрический анализ дает распределение минеральных частиц в руде по классам крупности. Основные методы гранулометрического анализа – ситовой и микроскопический.

Форма представления результатов минераграфических исследований, выполненных в технологических целях, приведена в приложении 4.

Вопросы для самопроверки:

1. Суть процесса обогащения.
2. Перечислите основные стадии процесса обогащения.
3. Как можно использовать результаты микроскопических наблюдений при обогащении руды?
4. Верно ли, что руды с зернистыми структурами полезных компонентов благоприятны для обогащения?
5. Перечислите основные факторы, благоприятно влияющие на переработку руды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, Ф.И. Микроскопические исследования руд в отраженном свете / Ф.И. Абрамов. – Л.: Науч. хим.-технич. изд-во: ВСЕХИМПРОМ ВСНХ СССР, 1930. – 134 с.

2. Авдонин, В.В. Текстуры и структуры руд (ведущих геолого-промышленных типов месторождений цветных металлов) / В.В. Авдонин, Н.Е. Сергеева. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 176 с.

3. Безсмертная, М.С. Определитель рудных минералов в отраженном свете / М.С. Безсмертная, Т.Н. Чвилева. – М.: Недра, 1976. – 71 с.

4. Бергнер, Гельбке, Мелисс. Практическая микрофотография / пер. с нем. – М.: Мир, 1977. – 320 с.

5. Берри, Л. Минералогия / Л. Берри, Б. Мейсон, Р. Дитрих. – М.: Мир, 1987. – 592 с.

6. Бетехтин, А.Г. Текстуры и структуры руд / А.Г. Бетехтин, А.Д. Генкин, А.А. Филимонова, Т.Н. Шадлун. – М.: Госгеолтехиздат, 1958. – 436 с.

7. Бетехтин, А.Г. Определение рудных минералов под микроскопом / А.Г. Бетехтин, Л.В. Радугина. – ОНТИ, 1933. – 220 с.

8. Богданович, К.И. Рудные месторождения / К.И. Богданович. – СПб., 1912. – 486 с.

9. Болдырева, М.М. MicroMin, компьютерная информационная система для идентификации рудных минералов и расчета цветовых характеристик: учебное пособие / М.М. Болдырева, Д.А. Киселев, И.В. Романовский. – СПб., 2009. – 40 с.

10. Бортников, Н.С. Кристаллохимия, устойчивость и условия образования сульфидов со сфалеритоподобной кристаллической структурой / Н.С. Бортников, Т.Л. Евстигнеева // Геология рудных месторождений. – 2003. – Т. 45, № 2. – С. 152–171.

11. Булах, А.Г. Общая минералогия / А.Г. Булах, В.Г. Кривовичев, А.А. Золотарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 416 с.

12. Вахромеев, С.А. Руководство по минераграфии / С.А. Вахромеев. Иркутск: Иркутское книжное изд-во, 1956. – 264 с.

13. Вертушков, Г.Н. Таблицы для определения минералов по физическим и химическим свойствам: Справочник / Г.Н. Вертушков, В.Н. Авдонин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1992. – 489 с.

14. Войтеховский, Ю.Л. Технологическая минералогия и модальный анализ горных пород под микроскопом / Ю.Л. Войтеховский // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. – Петрозаводск: Институт минералогии КарНЦ, 2009. – С. 16–20.

15. Вольнский, И.С. Определение рудных минералов под микроскопом, в 2 т. / И.С. Вольнский. – М.: Госгеолтехиздат, 1947. – 263 с.

16. Вьяльсов, Л.Н. Спектры отражения рудных минералов в отраженном свете / Л.Н. Вьяльсов. – М.: Изд-во ИГЕМ, 1973. – 67 с.
17. Галопен, Р. Исследование непрозрачных минералов под микроскопом / Р. Галопен, Н. Генри. – М.: Мир, 1975. – 364 с.
18. Геологический словарь. Т. I. – М.: Недра, 1973. – 487 с.
19. Геологический словарь. Т. II. – М.: Недра, 1973. – 458 с.
20. Грабовский, М.А. Исследование рудных минералов методом магнитной порошкографии / М.А. Грабовский, О.Н. Жерденко // Геология рудных месторождений. – 1963. – Т. 5, № 1. – С. 99–104.
21. Григорьев, И.Ф. Исследование руд алтайских месторождений в отраженном свете / И.Ф. Григорьев. – Л.: Изд-во Геологического комитета, 1927. – 34 с.
22. Григорьев, Д.П. Онтогения минералов: Индивидуы / Д.П. Григорьев, А.Г. Жабин. – М.: Наука, 1975. – 340 с.
23. Джонс, М.П. Прикладная минералогия. Количественный подход / М.П. Джонс. – М.: Недра, 1991. 391 с.
24. Дитчберн, Р. Физическая оптика / Р. Дитчберн. – М.: Наука, 1965. – 631 с.
25. Жабин, А.Г. Онтогения минералов: Агрегаты / А.Г. Жабин. – М.: Наука, 1979. – 275 с.
26. Зайков, В.В. Рудно-формационный и рудно-фациальный анализ колчеданных месторождений Уральского палеоокеана / В.В. Зайков, В.В. Масленников, Е.В. Зайкова, Р. Херрингтон. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2001. – 315 с.
27. Иванов, С.Н. Изучение зон роста пирита в колчеданных месторождениях Урала / С.Н. Иванов // Записки Всероссийского минералогического общества. – 1950. – Ч. 79. Вып. 2. – С. 113–126.
28. Исаенко, М.П. Определитель текстур и структур руд / М.П. Исаенко. – М.: Недра, 1975. – 229 с.
29. Краснова, Н.И. Генезис минеральных индивидов и агрегатов / Н.И. Краснова, Т.Г. Петров. – СПб.: СПбГУ, 1997. – 228 с.
30. Крейг, Дж. Рудная микроскопия и рудная петрография / Дж. Крейг, Д. Воган. – М.: Мир, 1983. – 423 с.
31. Кринов, Д.И. Особенности подготовки препаратов и методы травления рудных минералов // Уральский минералогический сборник № 15 / Д.И. Кринов, А.В. Ефимов. – Миасс-Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 105–116.
32. Кэмерон, Ю.Н. Рудная микроскопия / Ю.Н. Кэмерон. – М.: Мир, 1966. – 308 с.
33. Лебедева, С.И. Определение микротвердости минералов / С.И. Лебедева. – М.: АН СССР, 1963. – 124 с.
34. Масленников, В.В. Колчеданоносные палеогидротермальные поля окраинно-океанических структур Урала (классификация, рудные фации,

модель развития) / В.В. Масленников, В.В. Зайков. – Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. – 92 с.

35. Масленников, В.В. Метод рудно-фациального анализа в геологии колчеданных месторождений: учебное пособие / В.В. Масленников, В.В. Зайков. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 224 с.

36. Методические указания по курсу «Рудная микроскопия». – Л.: ЛГУ, 1989. – 11 с.

37. Определение рудных минералов в полированных шлифах по спектрам отражения и твердости / Под ред. М.С. Безсмертной, Т.Н. Чвилевой, Э.М. Спиридонова и др. – М.: Недра, 1973. – 222 с.

38. Попов, В.А. Практическая кристалломорфология минералов / В.А. Попов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. – 190 с.

39. Попов, В.А. К морфологическому анализу структур минеральных агрегатов / В.А. Попов // Проблемы онтогении минералов. – Л.: Наука, 1985. – С. 46–60.

40. Рамдор, П. Рудные минералы и их сростания / П. Рамдор. – М.: Иностранная литература, 1962. – 1132 с.

41. Розова, Е.В. К методике измерения коэффициента термоэлектродвижущей силы рудных минералов // Некоторые методы диагностики минералов и определения их физических свойств / Е.В. Розова. – М.: ЦНИГРИ, 1970. – С. 45–57.

42. Рудницкий, В.Ф. Палеогеографические условия образования южноуральских колчеданных месторождений / В.Ф. Рудницкий // Литология полезных ископаемых. – 1988. № 2. – С. 109–121.

43. Рябева, Е.Г. Характеристики рудных минералов в отраженном свете / Е.Г. Рябева, Т.Н. Шадлун // Записки Всероссийского минералогического общества. – 1990. – Ч. 119. Вып. 5. – С. 91–95.

44. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

45. Старцев, Г.Н. Лабораторный практикум по минераграфии / Г.Н. Старцев. – Екатеринбург: УГГА, 1994. – 152 с.

46. Татарский, В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод исследования минералов / В.Б. Татарский. – М.: Недра, 1965. – 306 с.

47. Тесалина, С.Г. Александринское медно-цинково-колчеданное месторождение (Восточно-Магнитогорская палеоостровная дуга, Урал) / С.Г. Тесалина, В.В. Масленников, Т.Н. Сурин. – Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. – 228 с.

48. Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья: Справочник / под ред. П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1990. – 272 с.

49. Толковый словарь геологических терминов / Отв. ред. русского перевода Н.В. Межеловский. – М.: МЦК «Геокарт», ГЕОС, 2002. Т. 2. – 664 с.

50. Чвилёва, Т.Н. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете / Т.Н. Чвилёва, М.С. Безсмертная, Э.М. Спиридонов и др. – М.: Недра, 1988. – 504 с.
51. Чвилева, Т.Н. Цвет рудных минералов в отраженном свете / Т.Н. Чвилева, В.Е. Клейнбок, М.С. Безсмертная. – М.: Недра, 1977. – 189 с.
52. Чесноков, Б.В. Относительный возраст минеральных индивидов и агрегатов / Б.В. Чесноков. – М.: Недра, 1974. – 105 с.
53. Шахов, Ф.Н. Текстуры руд / Ф.Н. Шахов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 180 с.
54. Шорт, М.Н. Микроскопическое определение рудных минералов / М.Н. Шорт. – М.: ОНТИ НКТП СССР, 1934. – 200 с.
55. Шумская, Н.И. Определение рудных минералов по спектральным кривым отражения / Н.И. Шумская. – Л.: Недра, 1985. – 230 с.
56. Шумская, Н.И. Минераграфические исследования руд с применением микроскопов-спектрофотометров: методическое руководство / Н.И. Шумская, В.Д. Ляхницкая. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1993. – 55 с.
57. Элементарный учебник физики / под ред. Г.С. Ландсберга. – М.: Наука, 1986. Т. III. – 656 с.
58. Юшко, С.А. Методы лабораторного исследования руд / С.А. Юшко. – М.: Недра, 1966. – 320 с.
59. Юшко, С.А. Методы лабораторного исследования руд / С.А. Юшко. – М.: Недра, 1971. – 344 с.
60. Юшко, С.А. Методы лабораторного исследования руд / С.А. Юшко. – М.: Недра, 1984. – 390 с.
61. Barton, P.B. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe Mine, Akita Prefecture, Japan // *Mining Geology*, 1978. № 28. – P. 293–300.
62. Campbell, W. A microscopic examination of the cobalt-nickel arsenides and silver deposits of Temiskaming / W. Campbell, C.W. Knight // *Economic Geology*. – 1906. № 1. – P. 767–776.
63. Criddle, A.J. The quantitative data file for ore minerals of the Commission on Ore Microscopy of the IMA / A.J. Criddle, C.J. Stanley. – London: British Museum (Natural History), 1986. – 196 p.
64. Davy, W. Microscopic examination of the ore minerals / W. Davy, C. Farnham. – New York, 1920. – 154 p.
65. Murdoch, J. Microscopical determination of the opaque minerals / J. Murdoch. – New York, 1916. – 165 p.
66. Piller, H. Colour Measurements in Ore Microscopy / H. Piller // *Mineralium Deposita*. – 1966. V. 1. – P. 175–192.
67. Schneiderhöhn, H. Lehrbuch der Erzmikroskopie / H. Schneiderhöhn, P. Ramdohr. – Berlin, 1931. V. 2. – 336 p.
68. Stephens, M. Effect of light on polished surfaces of silver minerals / M. Stephens // *American Mineralogist*. – 1931. V. 16. – 532 p.

69. Talmage, S.B. Quantitative standards for hardness of the ore minerals / S.B. Talmage // Economic Geology. – 1925. V. 20. – P. 535–553.

70. Veen, R.W. Mineragraphy and ore deposition / R.W. Veen. – The Hague, 1925. – 167 p.

Ресурсы интернета

www.mineragraphy.ru – электронная определительная таблица минералов в отраженном свете

Fmm.ru – минералогический музей им. Ферсмана

Mindat.org – наиболее признанная мировая минералогическая база данных

Catalogmineralov.ru – большой каталог минералов и драгоценных камней

Rusmineral.ru – русские минералы

Geo.web.ru – геовикипедия

Mandate.ru – минералы России (авторский сайт К. Клопотова)

<http://w.ilmeny.ac.ru/ocean/codes/mgrf1.asp> – поисковая программа по основным свойствам рудных минералов, созданная в Институте минералогии УрО РАН (автор К.А. Новоселов)

<http://refractiveindex.info/> – база данных по коэффициентам преломления веществ

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/> – Education in Microscopy and Digital Imaging.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

**Символы для обозначения основных
рудо- и породообразующих минералов***

Минерал, формула	Сим- вол	Минерал, формула	Сим- вол
Антимонит Sb_2S_3	Ant	Макинавит $(Fe,Ni)S$	Mkv
Арсенопирит $FeAsS$	Apy	Малахит $(Cu_2(CO_3)(OH)_2)$	Mlh
Аурипигмент – As_2S_3	Aur	Марказит FeS_2	Mc
Барит $BaSO_4$	Brt	Медь самородная Cu	Cu
Борнит Cu_3FeS_4	Bn	Молибденит MoS_2	Mlb
Вюртцит $(Zn,Fe)S$	Wus	Никелин NiAs	Nic
Галенит PbS	Gln	Пентландит $(Fe,Ni)_9S_8$	Pn
Гематит Fe_2O_3	Hem	Пирротин $Fe_{1-x}S$	Po
Гетит $FeO(OH)$	Gt	Пирит FeS_2	Py
Графит C	Gr	Рутил TiO_2	Rut
Золото самород- ное Au	Au	Сидерит $FeCO_3$	Sd
Ильменит $FeTiO_3$	Ilm	Сфалерит ZnS	Sph
Кварц SiO_2	Qtz	Теннантит $(Cu,Ag)_{10}(Zn,Fe,Cu,Hg)_2(As,Sb)_4S_{13}$	Tn
Кобальтин $CoAsS$	Cbt	Тетраэдрит $(Cu,Ag)_{10}(Fe,Zn,Cu,Hg,Cd,Mn)_2(Sb,As)_4S_{13}$	Td
Киноварь HgS	Cnv	Халькозин Cu_2S	Cc
Ковеллин CuS	Cov	Халькопирит $CuFeS_2$	Chp
Кубанит $CuFe_2S_3$	Cub	Хлорит	Chl
Куприт Cu_2O	Cpr	Хромит $FeCr_2O_4$	Chr
Магнетит Fe_3O_4	Mgt	Штромейерит $CuAgS$	Stt

Примечание. *Представленные символы используются при публикациях в журнале «Canadian Mineralogist».

Основные свойства рудных минералов в аншлифах

Курсом лабораторных работ по минераграфии предусматривается изучение довольно распространенных рудных минералов и их свойств. В приложении приводятся диагностические свойства минералов, имеющиеся в лабораторной коллекции.

Антимонит (Sb_2S_3)

Сингония: ромбическая

Цвет в отраженном свете: белый, по сравнению с галенитом слегка голубоватый

Максимальное отражение для белого света: 58–59

Минимальное отражение для белого света: 48–37

Двуотражение: сильное

Плеохроизм: от белого галенитоподобного с голубовато-зеленоватым оттенком до умеренного, близкого с блеклой рудой

Анизотропия: сильно анизотропен с цветовыми эффектами в синевато-серых, желтоватых, розовато-коричневых тонах

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 42–165

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ реальгара и аурипигмента, $<$ бертьерита, бурнонита, полируется хорошо.

Форма выделений: зернистые, радиально-лучистые агрегаты, призматические, длиннопризматические, игольчатые кристаллы, ксеноморфные выделения, войлокоподобные массы.

Ассоциация: широко распространен в низкотемпературных гидротермальных сурьмяных минеральных ассоциациях в месторождениях многих типов: Sb-Hg, Au, Ag; ассоциации: Pb, Ag, Cu, Hg сульфосоли, пирит, сфалерит, киноварь, реальгар, сурьма, бертьерит. Запрещенные парагенезисы – с галенитом (но не с сурьмянистым галенитом), бурнонитом, пирротинном, медистым тетраэдритом.

Арсенопирит ($FeAsS$)

Сингония: триклинная

Цвет в отраженном свете: белый (с пиритом), кремово-розоватый (с галенитом)

Отражение для синего света: 48,2–52,4

Отражение для зеленого света: 51,3–53

Отражение для оранжевого света: 52,6–54

Отражение для красного света: 53,1–54

Двуотражение: несильное, легче обнаруживается в зернистых агрегатах

Плеохроизм: от кремовато-розоватого до чисто белого, слегка голубоватого

Анизотропия: отчетливо анизотропен с цветовыми эффектами в синих, красноватых тонах

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 720–1190

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ леллингита, пирротина, магнетита; полируется медленно, необходимо долгое тонкое шлифование

Форма выделений: призматические кристаллы, сростки кристаллов, в том числе звездчатые, нередко скелетные; шестоватые, радиально-лучистые, зернистые агрегаты, отдельные зоны в зональных выделениях сульфоарсенидов Fe-Co-Ni.

Ассоциация: один из наиболее распространенных рудных минералов; ассоциирует с сульфидами, оксидами, арсенидами, сульфоарсенидами, сульфосолями в широком круге месторождений от высокотемпературных до приповерхностных низкотемпературных. Является хорошим осадителем золота из гидротермальных растворов: часто содержит микровростки золота.

Аурипигмент (As₂S₃)

Сингония: моноклиная

Цвет в отраженном свете: серый

Отражение для синего света: 21,4–33,3

Отражение для зеленого света: 18,7–29,1

Отражение для оранжевого света: 18,1–27,6

Отражение для красного света: 18–27,2

Двуотражение: сильное

Плеохроизм: от светло-белого до матово-серого с красноватым оттенком, в иммерсии появляется сильно-красный оттенок

Анизотропия: сильно анизотропен

Внутренние рефлексы: обильные, светло-желтые, лимонно-желтые

Микротвердость, кг/мм²: 22–58

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ реальгара, полируется быстро, но остается много царапин

Форма выделений: зернистые, радиально-лучистые, пластинчатые агрегаты, таблитчатые кристаллы, ксеноморфные выделения

Ассоциация: в продуктах вулканических возгонов, сольфатарно-фумарольной деятельности, в отложениях горячих источников, в вулкано-генных и телетермальных месторождениях As, Sb-Hg, барита в ассоциации с реальгаром, антимонитом, мышьяком, арсенопиритом, клейофаном, энаргитом.

Борнит (Cu_5FeS_4)

Сингония: ромбическая

Цвет в отраженном свете: насыщенный коричневато-розовый, розовато-коричневый до оранжевого, иногда пурпурно-розовый.

Отражение для синего света: 17,3–17,7

Отражение для зеленого света: 18,9–21,7

Отражение для оранжевого света: 23,2–26

Отражение для красного света: 26,2–31,8

Двуотражение: едва заметно в иммерсии

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен, очень слабо анизотропен

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 83–135

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ халькопирита; $>$ халькозина, галенита; полируется исключительно хорошо

Форма выделений: плотные массы, зернистые агрегаты, каемки обрастания и замещения халькопирита, пластинчатые и решетчатые сростания с халькопиритом, субграфические сростания с халькозином, дигенитом, галенитом, блеклой рудой, энаргитом

Ассоциация: широко распространен в многих типах месторождений: 1) в поздних ассоциациях в экзоконтактовых рудах Cu-Ni месторождений вместе с халькопиритом, пентландитом, талнахитом, миллеритом, хизлевудитом, халькозином, галенитом, минералами Pt металлов; 2) в верхних частях гипогенных руд медно-порфировых месторождений в ассоциации с халькозином, халькопиритом, блеклой рудой; 3) в поздних ассоциациях медно-колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений с пиритом, теннантитом, сфалеритом, баритом, халькопиритом, галенитом, моусонитом, реньеритом, германитом, колуситом, бриартитом; 4) в телетермальных месторождениях типа «медистых песчаников» в ассоциации с халькозином, дигенитом, сфалеритом, галенитом, бетехтинитом, джезказганитом, халькопиритом; 5) в зоне цементации сульфидных месторождений с халькозином. В подчиненных количествах во многих иных типах гипогенных месторождений, в частности, в месторождениях Au, где в борните нередко сконцентрированы вроски Au и теллуридов Au; в отложениях современных гидротерм на дне океанов. Известен в базальтах Луны в ассоциации с тропилитом и железом.

Вюртцит ((Zn,Fe)S)

Сингония: гексагональная

Цвет в отраженном свете: серый с фиолетовым оттенком

Отражение для синего света: 20,9–22,3

Отражение для зеленого света: 19,7–20,1

Отражение для оранжевого света: 19,3–19,6

Отражение для красного света: 19,1–19,3

Двуотражение: наблюдается с трудом в иммерсии.

Плеохроизм: светло-серый до темно-серого

Анизотропия: слабо анизотропен

Внутренние рефлексы: обильные

Микротвердость, кг/мм²: 145–265

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h \sim$ сфалериту; полируется как сфалерит

Форма выделений: радиально-лучистые, зернистые агрегаты, изредка удлинённые кристаллы, прослойки в концентрических слоях почковидных сфалеритов, тонкие сростания со сфалеритом, марказитом, грейгитом, пиритом, галенитом (часто ритмично-зональные). При травлении выявляется характерная структура «ледяных узоров».

Ассоциация: широко развит в неметаморфизованных вулканогенных колчеданных месторождениях; в отложениях гидротерм на дне океанов; в вулканогенных Sn-Ag, Sn-Ag-Bi месторождениях; в карбонатных толщах низкотемпературных Pb-Zn месторождений; в ряде осадочных месторождений (в мергелях и сидеритах). Часто в значительной степени замещен сфалеритом. Особенно разнообразны подтипы вюртцита в осадочных месторождениях.

Галенит (PbS)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: нейтральный белый

Отражение для синего света: 46,5–49,3

Отражение для зеленого света: 43,4–44,6

Отражение для оранжевого света: 42,7–43

Отражение для красного света: 42,6–42,8

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен, иногда аномально анизотропен, что объясняется динамометаморфизмом или высокими содержаниями в галените Bi, Sb или As.

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 60–110

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ халькопирита, блеклой руды; \sim бурнониту, халькозину; в тонкозернистых агрегатах полируется хорошо, в крупнозернистых наблюдается выкрашивание мельчайших зернышек с царапанием поверхности

Форма выделений: зернистые до тонкозернистых агрегаты, прожилки; субграфические и мирмекитовые сростания с различными сульфосолями, сульфотеллуридами и сульфидами. Отмечались пластинчатые двойники как результат динамического воздействия.

Ассоциация: очень широко распространенный минерал, известен практически во всех генетических типах месторождений, наиболее характерен в гидротермальных месторождениях средних и низких T , где ассоциирует с широким кругом сульфидов (пиритом, халькопиритом, арсенопиритом, сфалеритом), сульфосолей, с селенидами, теллуридами, золотом или серебром. Галениты низкотемпературных парагенезисов, в т.ч. образовавшиеся в зоне цементации, как правило, содержат лишь микропримеси.

Гематит (Fe_2O_3)

Сингония: тригональная

Цвет в отраженном свете: голубоватый

Отражение для синего света: 27,6–32,6

Отражение для зеленого света: 26,7–30,8

Отражение для оранжевого света: 24,1–29,3

Отражение для красного света: 22,5–27

Двуотражение: несильное.

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: отчетливая, сильно анизотропен в блеклых синевато-серых, коричневатых-серых тонах.

Внутренние рефлексы: густые рубиново-красные; в иммерсии повсеместны.

Микротвердость, кг/мм²: 740–1110

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ магнетита, ильменита, $<$ пирита; после основательной предварительной шлифовки полируется отлично

Форма выделений: таблитчатые, пластинчатые, радиально-лучистые, порошковые выделения, зернистые агрегаты; сростания с ильменитом, рутилом, псевдобрукитом, сидеритом; псевдоморфозы по магнетиту (мартит). Характерны пластинчатые двойники простые и сложные, иногда по нескольким направлениям

Ассоциация: широко распространен в верхней части земной коры: во многих типах осадочных пород, в корах выветривания, в осадочных месторождениях Fe, в бокситах; в скарновых месторождениях Fe, Cu; во многих типах низкотемпературных гидротермальных месторождений в ассоциации с пиритом, халькопиритом, магнетитом, сидеритом, уранинитом, селенидами, медью. Главный минерал железистых кварцитов. Характерный минерал вулканических возгонов.

Гетит ($FeO(OH)$)

Сингония: ромбическая

Цвет в отраженном свете: серый с голубоватым оттенком

Отражение для синего света: 16,5–21,3

Отражение для зеленого света: 15–18,2

Отражение для оранжевого света: 14,4–16

Отражение для красного света: 14–15,8

Двуотражение: умеренное, маскируется внутренними рефлексами

Анизотропия: отчетливо анизотропен с цветовыми эффектами от серовато-синего или серовато-желтого до коричневатого

Внутренние рефлексы: коричневатые, красновато- или желтовато-коричневатые

Микротвердость, кг/мм²: 590–710

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ ильменита, $<$ гематита, пирита; способность к полировке различная в зависимости от величины зерен

Форма выделений: игольчатые и пластинчатые кристаллы и их агрегаты, псевдоморфозы (пористые) по пириту, натечные агрегаты

Ассоциация: низкотемпературный гидротермальный минерал в колчеданных месторождениях; широко развит в зоне выветривания сульфидных месторождений, в осадочных породах.

Графит (С)

Сингония: гексагональный

Цвет в отраженном свете: светло-коричнево-серый

Отражение для синего света: 6,8–20

Отражение для зеленого света: 7–21,4

Отражение для оранжевого света: 7–22

Отражение для красного света: 7–24,2

Двуотражение: очень высокое

Плеохроизм: умеренный от коричневатого-серого или белесо-коричневого до синевато-серого или серовато-черного

Анизотропия: сильно анизотропен со светло-коричнево-желтыми цветовыми эффектами

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 7–16

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ молибденита, валлериита; полируется плохо, крайне мягкий с низким рельефом

Форма выделений: отдельные чешуйки, пластинки, агрегаты чешуек, радиально-лучистые и тонкозернистые (плотные)

Ассоциация: распространенный минерал регионально метаморфизованных и контактово-метасоматических образований; относительно высокотемпературных гидротермально-метасоматических образований (серпентинитов, кварцевых жил и т.п.); долеритов, базальтов, гранитоидов, контактирующих с угленосными толщами. Ассоциирует с пирротинном, пиритом, магнетитом, когенином.

Золото (Au)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: насыщенно желтый

Отражение для синего света: 37–53,9

Отражение для зеленого света: 66,5–79,1

Отражение для оранжевого света: 82,6–85

Отражение для красного света: 86,5–90,6

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексы: отсутствуют, но в скрещенных николях отчетливый царапины

Микротвердость, кг/мм²: 50–90

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h \sim$ халькопириту, < блеклой руды, сфалерита, > галенита; полируется хорошо, но практически всегда сохраняются царапины, точечные дефекты полировки

Форма выделений: ксеноморфные выделения, микропрожилки, пленки, зернистые агрегаты, реже – дендриты или кристаллы – октаэдры, ромбододекаэдры и более сложные формы. Гипергенное золото, образовавшееся при разложении теллуридов, стибитотеллуридов, пломботеллуридов Au, Au-Ag, Au-Cu-Fe, ауристита, мальдонита, представлено агрегатами тончайших округлых, пластинчатых, проволочных выделений

Ассоциация: пирит, арсенопирит, халькопирит, пирротин, галенит, висмутин, соли Bi, теллуриды, селениды. Распространенный минерал рудных месторождений, как правило, поздний; в разнообразных формах замещает и обрастает другие рудные и жильные минералы. Установлено в возгонах вулканов.

Ильменит (FeTiO₃)

Сингония: тригональная

Цвет в отраженном свете: светло-серый

Отражение для синего света: 16,9–20,7

Отражение для зеленого света: 16,8–19,8

Отражение для оранжевого света: 16,8–19,8

Отражение для красного света: 17–19,8

Двуотражение: заметное (с магнетитом)

Плеохроизм: от светло-голубовато-серого до темно-бурого

Анизотропия: анизотропен в блеклых тонах

Внутренние рефлексы: темнобурые

Микротвердость, кг/мм²: 505–1000

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ магнетита и < гематита; полируется хорошо

Форма выделений: пластинчатые, таблитчатые зерна, скелетные выделения, пластинчатые и решетчатые сростания с магнетитом и гематитом

Ассоциация: магнетит, рутил, гематит, шпинель, хромит, халькопирит. При Р 32 ГПа разлагается на вюстит и рутил. Часто замещается титанитом, реже перовскитом. Ильменит обычно в той или иной степени замещен мелкозернистыми агрегатами рутила (лейкоксена), гематита, псевдобрукита. В Cu-Ni ликвационных месторождениях ассоциирует с пирротинитом, пентландитом и гематитом. В гидротермально-измененных изверженных породах превращается в лейкоксен. Иногда крупные кристаллы в сиенитовых пегматитах.

Киноварь (HgS)

Сингония: тригональная

Цвет в отраженном свете: светло-серый с голубоватым оттенком

Отражение для синего света: 26,2–32,3

Отражение для зеленого света: 24,7–30,6

Отражение для оранжевого света: 24–29

Отражение для красного света: 23,5–28,2

Двуотражение: умеренное

Плеохроизм: чисто-белый до синевато-белого

Анизотропия: сильно анизотропен

Внутренние рефлексы: повсеместно сильные кроваво-красные

Микротвердость, кг/мм²: 40–135

Относительный рельеф, склонность к полировке: h очень низкий; << антимонита; ≥ метациннабарита; мономинеральные агрегаты полируются хорошо

Форма выделений: ксеноморфные выделения, зернистые агрегаты, кристаллы, корочки

Ассоциация: в низкотемпературных гидротермальных и газо-гидротермальных Hg, Sb-Hg, Sb-W, Au-Ag месторождениях в ассоциации с антимонитом, ртутистыми блеклыми рудами, метациннабаритом, марказитом, рутью. В отложениях горячих источников и в возгонах вулканов; рассеянная киноварь в ореолах нефтегазовых месторождений; в россыпях.

Кобальтин (CoAsS)

Сингония: кубическая (высокий – структура типа пирита) и ромбическая (низкий). Природные образцы соответствуют низкому кобальтину

Цвет в отраженном свете: розовато-белый, иногда с фиолетовым оттенком

Отражение для синего света: 46,8–47,7

Отражение для зеленого света: 48,3–49

Отражение для оранжевого света: 49,2–50

Отражение для красного света: 49,7–50,1

Двуотражение: для низкого кобальтина

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен (высокий) до отчетливо анизотропного (низкий) с блеклыми цветовыми эффектами в голубовато-серых, коричневатых тонах

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 890–1370

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ большинства обычных сульфидов и арсенидов; $<$ пирита; требует основательной шлифовки и длительной полировки

Форма выделений: зернистые агрегаты, кубические и октаэдрические кристаллы, отдельные зоны в зональных выделениях сульфоарсенидов Co-Ni и Co-Fe

Ассоциация: довольно широко распространен в месторождениях Co-Ni-As 5-элементной формации, железорудных скарновых; встречается также в полиметаллических, медноколчеданных, Cu-Ni, Au. Ассоциирует с очень многими рудными минералами.

Ковеллин (CuS)

Сингония: гексагональная

Цвет в отраженном свете: голубой

Отражение для синего света: 11,7–30,4

Отражение для зеленого света: 5,5–25,7

Отражение для оранжевого света: 2,5–21

Отражение для красного света: 2,5–22,8

Двуотражение: сильное

Плеохроизм: ярко-голубой до индигово-синего с фиолетовым оттенком и светло-голубовато-белого цвета

Анизотропия: исключительно сильно анизотропен – огненно-оранжевый, ярко-медно-розовый

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 59–138

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ акантита; полируется прекрасно

Форма выделений: пластинки, лучистые агрегаты; спайность по базису совершенная

Ассоциация: обилен в зоне цементации медных месторождений; в поздних гидротермальных ассоциациях с энаргитом, борнитом, дигенитом, теннантитом и др. Селенистый ковеллин встречен в рудах с настураном, селенидами, теллуридами Vi.

Кубанит (CuFe₂S₃)

Сингония: ромбическая, кубическая

Цвет в отраженном свете: желтоватый, кремово-розовый с коричневым оттенком; кубический – более насыщенный

Отражение для синего света: 29,7–36

Отражение для зеленого света: 39,1–40,2

Отражение для оранжевого света: 40,7–42

Отражение для красного света: 41,8–43,4

Двуотражение: отчетливое

Плеохроизм: от светло-желтого до коричневатого

Анизотропия: сильно анизотропен с цветовыми эффектами в коричневатых и голубоватых тонах; кубический – изотропный

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 220–290

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ халькопирита; << пирротина, пентландита; полируется очень хорошо

Форма выделений: зернистые агрегаты, часто пластинчатые; пластинчатые и таблитчатые ламеллы в зернах халькопирита, талнахита, моихукита (продукты распада твердого раствора) иногда пластинки кубанита пересекаются под углом 60°, образуя решетчатую структуру, отдельные пластинки представляют собой обычно сростки сложных пластинчатых двойников. Кубический кубанит образует каймы замещения и микропрожилки в низком кубаните. Характерна совершенная спайность

Ассоциация: широко распространенный минерал Cu-Ni месторождений, один из ведущих сульфидов в месторождениях титаномагнетита, скарновых месторождениях Cu, Sn, Au, залегающих в породах базитового состава; в подчиненных количествах – во многих типах гидротермальных месторождений в базитах: в Cu-колчеданных, золото-кварцевых в ассоциации с халькопиритом, троилитом, пирротинитом, пентландитом, талнахитом, моихукитом, путоранитом, магнетитом, сидеритом, хлоритом. Неустойчивый минерал под воздействием поздних гидротермальных растворов с повышенной фугитивностью кислорода и/или серы, легко и часто полностью замещается тонко- и мелкозернистыми агрегатами: а) пирита; б) пирита и халькопирита; в) пирита, магнетита и халькопирита; г) пирита и ковеллина; при этом нередко сохраняется характерная для кубанита пластинчатая отдельность. Кубанит – типоморфный минерал современных гидротермальных отложений на дне океана.

Куприт (Cu₂O)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: светло-коричневато-серый с голубоватым оттенком

Отражение для синего света: 30,6–31,4

Отражение для зеленого света: 25,8–28,3

Отражение для оранжевого света: 23,8–24,9

Отражение для красного света: 22,8–23,8

Двуотражение: ясно заметно

Плеохроизм: слабый в зеленовато-серых тонах

Анизотропия: аномально анизотропен с цветовыми эффектами в чернильно-синих и зелено-оливковых тонах

Внутренние рефлексы: интенсивные, красные

Микротвердость, кг/мм²: 190–210

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ халькопирита, меди; при тщательной обработке полируется довольно хорошо

Форма выделений: зернистые и землистые агрегаты, сростания с медью, малахитом, лимонитом. Иногда наблюдается спайность

Ассоциация: с минералами зоны окисления (самородной медью, халькозином, лимонитом, малахитом, азуритом) Cu месторождений, в гипогенных рудах медно-цеолитовой формации.

Магнетит (FeFe₂O₄)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: коричневато-серый, титаномагнетит более серый без коричневого оттенка, темно-серый (с пиритом)

Отражение для синего света: 20,6–20,8

Отражение для зеленого света: 20,5–20,7

Отражение для оранжевого света: 20,7–20,8

Отражение для красного света: 20,8–21,1

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 550–620

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ пирротина, ильменита, гематита, пирита; после основательной предварительной шлифовки полируется отлично

Форма выделений: изометричные, округлые выделения, октаэдрические кристаллы, пластинчатые и решетчатые сростки с ильменитом, ульвошпинелью, мирмектовые сростания с пиритом (по пирротину, троилиту), радиально-лучистые агрегаты, внешние зоны зональных выделений хромшпинелидов, псевдоморфозы по пластинчатому гематиту (мушкетовит)

Ассоциация: магнетит в магматических месторождениях среди базитов богат Ti и Al; в карбонатах – Mg, Nb, Ta; в скарнах – с малым количеством примесей, иногда обогащен Al и Mg; в железистых кварцитах – с малым количеством примесей. Магнетиты из месторождений различных генетических типов различаются по характеру структур распада твердого раствора и по их составу.

Макинавит ((Fe,Ni)₉S₈)

Сингония: тетрагональная

Цвет в отраженном свете: от светлого кремново-желтого до светло-серого или коричневатого-серого

Отражение для синего света: 20,2–41,7

Отражение для зеленого света: 20,7–46,3

Отражение для оранжевого света: 21,1–48

Отражение для красного света: 21,5–48,8

Двуотражение: исключительно сильное

Плеохроизм: от светло-желтовато-белого с буровато-розоватым оттенком до светло-серого, близкого к сфалериту

Анизотропия: очень сильно анизотропен с цветными эффектами в синевато-серых, голубоватых, коричневатых и белых тонах

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 20–95

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h \sim$ пирротину; полируется хорошо

Форма выделений: чешуйки и чешуйчатые агрегаты, часто изогнутые подобно графиту и молибдениту; каймы замещения, червеобразные и пластинчатые выделения

Ассоциация: широко распространенный минерал низкотемпературных ассоциаций Cu-Ni, хромитовых, титаномагнетитовых месторождений, где замещает пентландит, кубанит, троилит и пирротин, халькопирит; во многих скарных медных и регионально метаморфизованных медноколчеданных месторождениях, где замещает троилит, кубанит, пирротин; в оруденелых серпентинитах, серпентинизированных кимберлитах; в современных осадках и черных илах, отложениях минеральных источников. Установлен как позднее новообразование по троилиту в породах Луны.

Малахит (Cu₂(CO₃)(OH)₂)

Сингония: моноклиная

Цвет в отраженном свете: серый с розоватым оттенком

Максимальное отражение для белого света: 8

Минимальное отражение для белого света: 6

Двуотражение: сильное

Плеохроизм: от бесцветного до темно-зеленого

Анизотропия: анизотропен

Внутренние рефлексы: зеленые

Микротвердость, кг/мм²: 124–156

Относительный рельеф, склонность к полировке: полируется хорошо

Форма выделений: колломорфные образования, часто с радиально-лучистым строением, мелкие волокнистые кристаллы

Ассоциация: лимонит, азурит, др. минералы зоны окисления медьсодержащих месторождений.

Марказит (FeS₂)

Сингония: ромбическая

Цвет в отраженном свете: желтовато-белый

Отражение для синего света: 43,6–53,2

Отражение для зеленого света: 48,4–57

Отражение для оранжевого света: 50,1–56

Отражение для красного света: 49,7–55,4

Двуотражение: сильное

Плеохроизм: от желтовато-зеленоватого до бледно-желтовато-кремового.

Анизотропия: сильно анизотропен с цветовыми эффектами в насыщенных желтых, ярко-зеленых, фиолетово-серых тонах

Внутренние рефлексии: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 760–1680

Относительный рельеф, склонность к полировке: h ~ пириту; полируется трудно, как и пирит

Форма выделений: кристаллы копьевидной и таблитчатой форм, конкреции, почковидные и сферолитовые, радиально-лучистые, «колломорфные» агрегаты, отдельные зоны в зональных агрегатах пирита, сфалерита, галенита, а также псевдоморфозы по пирротину (структуры типа «птичьего глаза») и т.п.)

Ассоциация: широко распространенный минерал осадочных пород, осадочных и гидротермально-осадочных месторождений в ассоциации с пиритом, смайитом, грейгитом. Характерный минерал зоны выветривания месторождений, первичные руды которых богаты моносульфидами Fe, Fe-Ni. Встречается в низкотемпературных ассоциациях многих гидротермальных месторождений: Pb-Zn, Au-Ag, Ag-Sn, медноколчеданных, Cu, колчеданно-полиметаллических и др.; в отложениях гидротермальных источников на дне океана в ассоциации с пиритом, сфалеритом, вюртцитом, галенитом, халькопиритом, кубанитом, борнитом, халькозином, ковеллитом, миллеритом.

Медь (Cu)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: насыщенный густо-розовый

Отражение для синего света: 48,6–51

Отражение для зеленого света: 55,5–65

Отражение для оранжевого света: 77–91

Отражение для красного света: 90,8–94

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 48–143

Относительный рельеф, склонность к полировке: >> халькозина, халькопирита, < куприта, окислов железа; полируется трудно, царапин и точечных дефектов избежать трудно

Форма выделений: ксеноморфные выделения, прожилки, зернистые агрегаты, реже дендриты и кристаллы

Ассоциация: гипогенная ассоциация с халькозином, арсенидами меди, аваруитом, карбонатами, пренитом; гипергенная – с купритом, гидроксидами Fe, карбонатами Cu и др.

Молибденит (MoS₂)

Сингония: гексагональная

Цвет в отраженном свете: ярко-белый до серого

Отражение для синего света: 53,4–54,7

Отражение для зеленого света: 45,2–48,4

Отражение для оранжевого света: 44,3–48

Отражение для красного света: 45,1–49,5

Двуотражение: исключительно сильное

Плеохроизм: ярко-белый до серого

Анизотропия: исключительно сильно анизотропен в темно-серых, черных, ярко-белых тонах

Внутренние рефлексы: отсутствуют, в тонких частицах просвечивает зеленым

Микротвердость, кг/мм²: 16–84

Относительный рельеф, склонность к полировке: h > галенита, халькопирита, но < графита; вследствие незначительной твердости полируется плохо

Форма выделений: обычно тонкие, нередко изогнутые пластинки, таблички, тонкопластинчатые, чешуйчатые агрегаты с весьма совершенной спайностью по базису. Наблюдается полисинтетическое двойникование

Ассоциация: распространенный минерал; генетически связан с гранитоидными интрузивами; концентрируется преимущественно в грейзеновых, контактово-метасоматических и гидротермальных месторождениях в ассоциации с вольфрамитом, касситеритом, арсенипиритом, пирротином, висмутином, шерлом, бериллом, а также с сульфидами Cu, Pb, Zn. Кроме того, в U-Mo месторождениях (иордизит), в возгонах вулканов.

Никелин (NiAs)

Сингония: гексагональная

Цвет в отраженном свете: насыщенный желтовато-розовый

Отражение для синего света: 36,5–46,5

Отражение для зеленого света: 43,3–53,5

Отражение для оранжевого света: 52,8–59

Отражение для красного света: 57,3–64

Двуотражение: заметное

Плеохроизм: от розовато-коричневого до голубовато-белого

Анизотропия: сильно анизотропен с яркими цветовыми эффектами в розовато-желтых, зеленовато-голубых тонах

Внутренние рефлексы: отсутствуют

Микротвердость, кг/мм²: 305–535

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h \sim$ брейтгауптиту, пирротину; $>$ халькопирита; прекрасно полируется в любом сечении

Форма выделений: зернистые, почковидные, радиально-лучистые и дендритовидные агрегаты, сложные сростки, изредка таблитчатые или призматические кристаллы

Ассоциация: в месторождениях: 5-элементной формации, никелин-хромитовых, медистых сланцев и медистых песчаников, скарновых Fe и Fe-Mn. В последних ассоциирует с поздними гидротермальными выделениями арсенидов и сульфидов. В карбонатных жилах обычно ассоциирует с никельскуттерудитом, скуттерудитом, раммельсбергитом, парараммельсбергитом, Ni-сод. сафлоритом, маухеритом, герсдорфитом, брейтгауптитом, ульманитом. В небольших количествах в зоне гипергенеза: в Fe-Mn конкрециях на дне океана (за счет Ni тэнита-камасита космической пыли), в бокситах, в конкрециях глинистых толщ с сульфидами меди, коффинитом, минералами V.

Пентландит ((Fe,Ni)₉S₈)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: светло-кремовый до розовато-кремового

Отражение для синего света: 42–47,7

Отражение для зеленого света: 51,6–54

Отражение для оранжевого света: 54,9–57

Отражение для красного света: 56,6–58,7

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропный

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 175–305

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ халькопирита; \sim пирротину; полируется прекрасно

Форма выделений: округлые зерна от 0,1 мм до 5 см, ксеноморфные выделения, полосы, прожилковидные выделения в промежутках зерен

пирротина, пластинчатые выделения вдоль отдельности и пламеневидные по трещинкам и границам зерен пирротина

Ассоциация: в виде редких микроскопических выделений широко распространен в магматических породах основного, ультраосновного, щелочно-ультраосновного состава; ведущий минерал Cu-Ni месторождений в ассоциации с пирротин, халькопиритом, магнетитом, троилитом, кубанитом, моихукитом, борнитом. Замещается хизлевудитом, миллеритом, годлевскимитом, виоларитом, никелистым пиритом, медистым пентландитом, макинавитом, валлериитом. Характерный минерал ряда скарновых месторождений Cu и участков Cu-Mo порфириновых месторождений, залегающих в породах основного состава. Ассоциирующие минералы: 1) моноклинный пирротин+халькопирит; 2) промежуточный пирротин; 3) промежуточный пирротин+троилит; 4) троилит+халькопирит; 5) троилит. Наиболее никелистый пентландит ассоциирует с моноклинным пирротин, наиболее железистый – с троилитом. Для пентландитов, бедных Co, показательна величина Ni/Fe, возрастающая по мере перехода от ассоциации троилит – промежуточный пирротин – халькопирит к ассоциации моноклинный пирротин – миллерит – хизлевудит – борнит.

Пирит (FeS₂)

Сингония: Кубическая

Цвет в отраженном свете: желтовато-белый, соломенно-желтый, кремовато-желтый. Пирит с незначительными (< 1%) примесями Ni и Co не отличается по цвету от чистого пирита. Никелистый пирит – серый, коричневатый с фиолетовым или сиреневатым оттенком; никелистый (с Co) пирит – розовато-фиолетовый, розовато-коричневый. Цвет медистого пирита розовато-кремовый, коричневатый-серый

Отражение для синего света: 41–48,4

Отражение для зеленого света: 52,8–54,5

Отражение для оранжевого света: 54,9–55

Отражение для красного света: 55,2–56,8

Двуотражение: иногда у Cu-пирита

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен, нередко заметно анизотропен

Внутренние рефлексии: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 890–2400

Относительный рельеф, склонность к полировке: > кобальтина и арсенопирита, ~ с марказитом; полируется плохо и остается всегда пористым

Форма выделений: зернистые агрегаты, кристаллы в форме куба, октаэдра, пентагондодекаэдра, агрегаты кристаллов, радиально-лучистые, колломорфные агрегаты, фрамбонды, каймы замещения, мирмекитовые и графические сростки с магнетитом (псевдоморфозы по пирротину). Травлением выявляется зональное строение

Ассоциация: самый распространенный сульфид верхней части земной коры, широко развит в осадочных породах и рудах, в метаморфических породах фации зеленых сланцев и амфиболитовой фации, практически во всех типах гидротермальных месторождений. Никелистый и кобальтистый пирит широко распространен в гидротермальных месторождениях, залегающих в породах основного состава, один из ведущих минералов: 1) гидротермальных и гипергенных парагенезисов Cu-Ni месторождений (особенно богаты им Cu-Ni месторождения, залегающие в коматиитах); 2) метаморфизованных гидротермально-осадочных Cu-Co месторождений. Ni-пирит иногда образует каемки на конкрециях пирита в осадочных породах. Cu-пирит характерен для неметаморфизованных вулканогенных медноколчеданных и Ag-Sn-Bi месторождений. Se-пирит известен в неметаморфизованных медноколчеданных месторождениях; Se-пирит и Ni-пирит – в телетермальных и гидротермально-осадочных U-Se месторождениях.

Пирротин (Fe_{1-x}S)

Сингония: моноклинная

Цвет в отраженном свете: кремово-розовый

Отражение для синего света: 29,1–36

Отражение для зеленого света: 32,8–39,9

Отражение для оранжевого света: 35,7–42

Отражение для красного света: 37,4–44

Двуотражение: отчетливое

Плеохроизм: от коричневатого-кремового до розовато-коричневого (красновато-коричневого).

Анизотропия: сильно анизотропен с цветовыми эффектами в желтовато-серых, зеленоватых, серых, красновато-коричневых тонах

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 245–410

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ халькопирита, сфалерита, пентландита, но $<$ сфалерита, арсенопирита, пирита; полируется отлично

Форма выделений: ксеноморфные выделения, зернистые и пластинчатые агрегаты, каймы замещения и ламеллы в промежуточном пирротине

Ассоциация: широко распространен в контактово-метаморфических роговиках, метаморфических породах фации зеленых сланцев; ведущий сульфидный минерал многих месторождений: Cu-Ni в ассоциации с промежуточным пирротинном, пентландитом, халькопиритом; титаномагнетитовых, скарновых и магнезиально-скарновых магнетитовых, медных, гидротермальных сульфидно-касситеритовых, ряда колчеданных и колчеданно-полиметаллических, золоторудных, шеелитовых и др. Ассоциирует с пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, стanniном, халькостибитом. Замещает промежуточный пирротин. Легко замещается более поздними

гидротермальными минералами – пиритом, бертьеритом, джемсонитом, валлериитом, теллуридами Au-Ag, Pb, Fe, Ni, золотом.

Реальгар (AsS)

Сингония: моноклинная

Цвет в отраженном свете: тускло-серый со слабым сиреневатым или голубоватым оттенком

Отражение для синего света: 20,3–23,6

Отражение для зеленого света: 18,5–21,7

Отражение для оранжевого света: 18–19,7

Отражение для красного света: 17,8–19,5

Двуотражение: серо-белое с красноватым или синеватым оттенком

Плеохроизм: от серого с розоватым оттенком до серого с голубоватым оттенком

Анизотропия: сильно анизотропен, маскируется внутренними рефлексами

Внутренние рефлексы: обильные, яркие розовато-желтые и оранжевые

Микротвердость, кг/мм²: 47–65

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ аурипигмента, антимонита; вследствие хрупкости при низкой твердости полируется плохо

Форма выделений: зернистые агрегаты, ксеноморфные выделения, кристаллы, сростания с антимонитом

Ассоциация: довольно широко распространен среди продуктов фумарольно-сульфатарной деятельности и в отложениях горячих источников современных вулканов, в эпитермальных месторождениях Sb, Sb-Hg, Hg, As, барита в ассоциации с аурипигментом, киноварью, антимонитом, пиритом, мышьяком, теннантитом, Pb-As, Pb-As-Sb сульфосолями. Среди возгонов угольных пожаров.

Рутил (TiO₂)

Сингония: тетрагональная

Цвет в отраженном свете: серый с бледно-голубоватым оттенком

Отражение для синего света: 21–26

Отражение для зеленого света: 19,8–23,7

Отражение для оранжевого света: 19,3–22,8

Отражение для красного света: 19–22,4

Двуотражение: заметное по границам зерен

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: анизотропен

Внутренние рефлексы: повсеместно; светло-коричневатые, желтовато-коричневатые, белесые.

Микротвердость, кг/мм²: 980–1190

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ ильменита, < гематита, пирита; полируется довольно хорошо

Форма выделений: кристаллы – короткопризматические (нередко округлые), длиннопризматические до игольчатых; псевдоморфозы по ильмениту, титаниту и перовскиту; ламеллы в ильмените, гематите, шпинели. В крупных выделениях отмечается спайность в одном направлении

Ассоциация: в различных генетических типах руд и вмещающих породах. Ассоциирует с магнетитом, ильменитом, ильменорутилом, касситеритом, вольфрамитом, арсенопиритом, кварцем и т.д. Типичен для метаморфических пород. В виде мельчайших новообразований встречается в осадочных породах, богатых гидроокислами Fe, Al и Si.

Сидерит ($FeCO_3$)

Сингония: тригональная

Цвет в отраженном свете: очень темный, темно-серый

Максимальное отражение для белого света: 9

Минимальное отражение для белого света: 5

Двуотражение: ясное в воздухе, очень сильное в иммерсии, часто завуалировано внутренними рефлексами

Анизотропия: сильно анизотропен

Внутренние рефлексы: бесцветные, желтоватые, зеленоватые бурые

Микротвердость, $кг/мм^2$: 369–465

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h \sim$ сфалерита; полировка прекрасная

Форма выделений: аллотриоморфные выделения, иногда ромбические формы; часто колломорфные образования; зерна с полисинтетическими двойниками

Ассоциация: в жильных Pb-Zn и Cu сульфидных рудах ассоциирует с халькопиритом, пирротинном, анкеритом, железистыми хлоритами. Иногда наблюдаются самостоятельные жилы и линзы. В осадочных месторождениях имеет оолитовое строение. В метаморфизованных осадочных месторождениях образуется за счет магнетита или железистых хлоритов. При окислении переходит в гидроокислы Fe.

Сфалерит ($(Zn,Fe)S$)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: серый до темно-серого с еле заметным синеватым, чаще с коричневатым оттенком

Отражение для синего света: 21,2–22,9

отражение для зеленого света: 19,1–19,9

отражение для оранжевого света: 18,4–18,8

отражение для красного света: 18,1–18,4

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексы: обильные: у маложелезистых белые, желтоватые, у более железистых – светлые и темно-коричневые

Микротвердость, кг/мм²: 130–310

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ пирротина, магнетита, ильменита, пирита;

$>$ халькопирита; мелкозернистые агрегаты чистого сфалерита полируются хорошо, грубозернистые выкальваются

Форма выделений: зернистые агрегаты, ксеноморфные выделения, звездчатые, пластинчатые, псевдоизометричные ламелли в халькопирите, станнине, решетчатые структуры распада твердого раствора с халькопиритом, станнином, галлитом, бриартитом, мирмекитовые сростания с галенитом, бурнонитом. Как правило, содержит включения халькопирита, пирротина (реже), станнина (изредка).

Ассоциация: Широко распространен во многих типах месторождений: от Cu-Ni до осадочных. Темноокрашенные железистые сфалериты ранних генераций из руд любого типа месторождений обогащены In, особенно много In (в среднем 0,1 %) в сфалеритах сульфидно-касситеритовых месторождений; Sn-сфалерит ассоциирует со станнином, богатый In с рокезитом. Наиболее богаты Ge (в среднем 170 г/т) сфалериты низкотемпературных Pb-Zn месторождений в карбонатных породах. Hg-сфалерит слагает вставки в киновари и метациннабарите. Mn-сфалерит развит в ассоциации с алабандином в жильных и пластовых месторождениях Mn и в вулканогенных Ag-Sn месторождениях (с альбандином, бенавидеситом).

Теннантит ((Cu,Fe)₁₂As₄S₁₃)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: светло-серый со слабым зеленоватым оттенком

Отражение для синего света: 28,5–29,7

Отражение для зеленого света: 26,8–27,8

Отражение для оранжевого света: 24,3–26

Отражение для красного света: 23,3–24,3

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 350–420

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ галенита, антимонита, сульфосолей Pb, Ag; $> \sim$ халькопирита, отличная полировка

Форма выделений: ксеноморфные выделения, прожилки, каймы обрастания и замещения, зернистые агрегаты, вростки в других рудных минералах, кристаллы тетраэдрического облика

Ассоциация: наиболее распространенный минерал группы блеклых руд, развит в колчеданных Cu-Zn, колчеданно-полиметаллических, барит-полиметаллических, Sb-Hg, Bi и других гидротермальных месторождениях; слагает количественно преобладающие (обычно) ранние генерации блеклых руд месторождений Au, а иногда и поздние генерации блеклых руд в составе их продуктивных ассоциаций (сульфиды и сульфосоли, арсениды, сульфоарсениды, теллуриды).

Тетраэдрит ((Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: светло-серый со слабым коричневатым оттенком.

Отражение для синего света: 30,7–31,1

Отражение для зеленого света: 30,7–30,9

Отражение для оранжевого света: 29,9–30,9

Отражение для красного света: 27–29,9

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен

Внутренние рефлексy: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 19–340

Относительный рельеф, склонность к полировке: h > галенита, антимонита, сульфосолей Pb, Ag; > ~ халькопирита; отличная полировка

Форма выделений: ксеноморфные выделения, прожилки, каймы обрастания и замещения, зернистые агрегаты, вростки в др. рудных минералах, кристаллы тетраэдрического облика

Ассоциация: широко распространен в гидротермальных месторождениях Pb, Cu, Ag, Au, Bi, Hg, Sb, Sn; как правило, слагает поздние генерации блеклых руд, чаще и в большей степени, чем теннантит, концентрирует Ag, Hg, Cd, Mn, Te, Se.

Халькозин (Cu₂S)

Сингония: моноклиная

Цвет в отраженном свете: светло-серый с голубоватым, иногда розоватым оттенком

Отражение для синего света: 35,8–36,7

Отражение для зеленого света: 32,2–34,1

Отражение для оранжевого света: 30,2–31,3

Отражение для красного света: 29,3–30,2

Двуотражение: очень слабое

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: очень слабо анизотропен, иногда с розоватыми, зеленоватыми цветовыми эффектами

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 58–100

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ виттихенита, $<$ борнита, \sim дигениту; полируется довольно легко

Форма выделений: кристаллы призматические. Характерны мирмециты с борнитом, галенитом, виттихенитом, штрмейеритом, ковеллином, клаусталитом, гематитом

Ассоциация: образуется в условиях дефицита S и Fe и (или) высокого окислительного потенциала, когда Fe преимущественно связывается в оксиды. Широко распространен в месторождениях многих генетических типов, особенно характерен для зоны цементации и вторичного сульфидного обогащения медно-порфировых и колчеданных руд, где образует промышленные концентрации. Встречен в отложениях гидротерм на дне океанов, в осадочных Cu, Cu-Co, Cu-U-V месторождениях. Ассоциации: борнит, магнетит, джарлеит, дигенит, халькопирит, энаргит, блеклые руды, сфалерит, акантит, галенит, станнин. Крайне нестабильная фаза.

Халькопирит (CuFeS₂)

Сингония: тетрагональная

Цвет в отраженном свете: насыщенно желтый, зеленовато-желтый; темно-серый, зеленовато-серый (с золотом); розовато-коричневатый

Отражение для синего света: 27,9–39,8

отражение для зеленого света: 46,7–49,1

отражение для оранжевого света: 49,7–50

отражение для красного света: 49,1–50

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: слабо анизотропен с цветовыми эффектами в серых, голубовато-серых, желтовато-зеленоватых полутонах

Внутренние рефлексы: не наблюдаются

Микротвердость, кг/мм²: 165–260

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h <$ пирита, сфалерита; \sim блеклой руде; $>$ галенита; полируется легко

Форма выделений: зернистые агрегаты, ксеноморфные выделения, почковидные агрегаты, прожилки, каймы обрастания и замещения, мирмецитовые срастания с станнином, тетраэдритом, магнетитом, пирротинном, карролитом, решетчатые срастания с кубанитом, борнитом, станноидитом, макинавитом, кристаллы тетраэдрической формы. Часто наблюдаются простые или полисинтетические двойники, нередко содержит «звездочки» сфалерита

Ассоциация: один из наиболее широко распространенных рудных и аксессуарных минералов: в магматических породах, прежде всего, основного и щелочного состава, в метаморфических породах всех фаций, в осадочных породах, чаще в углеродсодержащих фациях; в месторождениях любых типов от магматических Cu-Ni до осадочных Co-Cu, медистых сланцев, медистых песчаников; ассоциирует практически со всеми рудными минералами, чаще всего с пиритом, сфалеритом, галенитом, пирротитом, молибденитом, магнетитом, пентландитом, арсенопиритом; нередко замещается блеклой рудой, в зоне выветривания – ковеллином. Железистый халькопирит известен в Cu-Ni месторождениях в кубанитовых рудах. Ассоциация халькопирита с борнитом характерна для отложений современных гидротермальных источников на дне океана и образуется при повышенной фугитивности S в присутствии самородной серы.

Хромит ($FeCr_2O_4$)

Сингония: кубическая

Цвет в отраженном свете: зеленовато-серый

Отражение для синего света: 14,2–14,4

Отражение для зеленого света: 13,6–13,9

Отражение для оранжевого света: 13,2–13,4

Отражение для красного света: 13–13,2

Двуотражение: незаметно

Плеохроизм: незаметен

Анизотропия: изотропен, слабо аномально анизотропен

Внутренние рефлексы: нередко; красновато-буроватые

Микротвердость, кг/мм²: 1100–1480

Относительный рельеф, склонность к полировке: $h >$ магнетита; $<$ гематита; полируется очень медленно

Форма выделений: изометричные и округлые зерна, октаэдрические кристаллы, ламеллы в ромбическом пироксене

Ассоциация: широко распространенный минерал базитов и гипербазитов, ультраосновных и щелочных пород. Ассоциирует с оливином, пироксеном, серпентином, платиной, магнетитом. В базальтах Луны широко распространены твердые растворы хромит-ульвошпинель, в т.ч. титановый хромит.

Пример описания рудных минералов (или руды) в аншлифе

Шлиф №..... Медноколчеданная руда (Ишкининское месторождение, Южный Урал).

Руда характеризуется массивной текстурой. Структура мелкозернистая. Макроскопически руда состоит из пирротина (40 %), халькопирита (30 %), пирита (20 %), магнетита и хромита (10 %). Пирротин образует сплошные агрегаты, пирит – жилки мощностью от 1 до 5 мм. Халькопирит развивается в виде ксеноморфных агрегатов до 5 мм, иногда присутствует в жилках вместе с пиритом. Магнетит образует жилки мощностью до 1–2 мм. Хромит представлен октаэдрическими кристаллами размером до 1 мм.

Обычны следующие структуры: аллотриоморфнозернистая (пирротина), идиоморфнозернистая (хромита), замещения (пирротина пиритом – структура «птичьего глаза», пирротина и пирита халькопиритом, хромита магнетитом), пересечения (жилки пирита, магнетита в пирротине).

Пирротин является основным минералом, его содержание составляет 40 %. Цвет минерала кремово-розовый, с умеренным отражением. Двухотражение отчетливое с изменением цвета от коричневатого-кремового до розовато-коричневого. Анизотропия сильная с цветовыми эффектами в желтовато-синих тонах.

Наблюдаются две полиморфные разновидности пирротина: гексагональный (немагнитный) и моноклинный (магнитный) по магнитной порошковой диаграмме. Гексагональный пирротин (пирротин-I) образует крупнопластинчатые агрегаты размером до 0,3 мм. Моноклинный пирротин представлен тремя морфологическими разновидностями. Первая – это пластинчатый пирротин-II, который замещает гексагональный в основной массе, и, чаще всего, между ними наблюдаются размытые границы. Вторая разновидность моноклинного пирротина – это гранозернистый пирротин-III. Он образует мелкозернистые агрегаты размером 0,05–0,1 мм, напоминающие гранулы, скрепленные в цепочки. Третьей разновидностью моноклинного пирротина является пирротин-IV, образующий жилки в пирите мощностью до 0,025–0,05 мм.

Халькопирит – минерал насыщенного желтого цвета с умеренным отражением. Слабо анизотропен с цветовыми эффектами в серых, голубовато-серых, желтовато-зеленоватых тонах. В ксеноморфных зернах халькопирита размером до первых мм в скрещенных николях отмечаются полисинтетические двойники. Халькопирит является сквозным минералом, замещающим пирротин и пирит.

Пирит – желтовато-белый, соломенно-желтый, с высоким отражением, изотропен. В изучаемых полировках представлен тремя генерациями. Пирит-I развит по трещинам спайности пирротина-I, II и гранозернистого

пирротина, замещая целые пирротиновые пластины и зерна и сохраняя спайность замещаемого минерала. Его отличительными свойствами являются низкое отражение и шагреновая поверхность. Постоянно наблюдаются овальные зерна тонкозернистого агрегата пирит+марказит, так называемые структуры «птичьего глаза». Пирит-II образует в пирротиновой массе жилы из крупных гипидиоморфных кристаллов, достигающих 0,3 мм, часто раздробленных. Эта генерация пирита пронизывается сетью магнетитовых, пирротиновых (пирротина-III) и пиритовых (пирита-III) прожилков. Пирит-III развивается в трещинах пирита-II.

Хромит характеризуется зеленовато-серым цветом, изотропен, отмечаются красновато-бурые внутренние рефлексy. Отражение низкое, ниже, чем у магнетита. Представлен идиоморфными кристаллами октаэдрического габитуса размером до 0,2 мм, которые замещаются магнетитом.

Магнетит – коричневатo-серый, в контакте с пиритом – темно-серый. Отражение умеренно низкое, изотропен. Как и халькопирит, магнетит является сквозным минералом. Он образует тонкие жилки и ксеноморфные выделения размером 0,1–0,2 мм и развивается в пирротине, пирите и халькопирите по спайности, замещает хромит. Минерал определяется с помощью метода магнитной порошкографии и тем самым отличается от сходного по цвету сфалерита.

В результате микроскопических наблюдений рудные минералы были подразделены на минеральные ассоциации, формирование которых происходило последовательно: 1) хромит-магнетит → 2) гексагональный пирротин-I → моноклинный пирротин-II, пирит-I, магнетит → 3) халькопирит → 4) магнетит → пирит-II, халькопирит, пирротин-III → пирит-III, пирротин-IV → магнетит.

Примечание. Описание различных морфологических разновидностей минералов и их возрастных соотношений с другими рудными и нерудными минералами следует сопровождать микрофотографиями. Возможно добавление информации о замерах показателя отражения, микротвердости и данных химического анализа.

Рекомендации по составлению отчета о минераграфических исследованиях

Результатом минераграфических исследований на месторождении должен быть минераграфический очерк (отчет), включающий в себя:

- описание различных типов руд, их распространение в контуре рудного тела, взаимоотношения, структурно-текстурные особенности;
- кадастр минералов (рудные – главные, второстепенные и редкие, а также жильные), их описание, выявление генераций и морфологических разновидностей. С.А. Юшко (1966) рекомендует использовать следующую схему описания:
- название минерала, его формула, диагностические свойства, признаки;
- форма проявления и количество его в различных типах руд;
- морфогенетические особенности минеральных выделений;
- описание типоморфизма различных генераций минерала и характерных для каждой из них минеральной ассоциации;
- структура и текстура руд;
- минеральная характеристика отдельных типов и сортов руд;
- характеристика фиксации и степень распространения отдельных элементов в рудах;
- составление схемы последовательности минералообразования в рудах и описание выделенных этапов и стадий минерализации и масштабов их проявления в рудах.

В зависимости от задач исследования, выводы должны содержать генетическую интерпретацию и/или технологический прогноз. Оценке генетических особенностей минералообразования способствует парагенетический анализ минералов, заключающийся в выявлении порядка образования минералов в рудном агрегате. Для определения возрастной последовательности необходимы изучение морфологии кристаллических зерен и взаимоотношения их общих границ, колломорфной полосчатости и зональности роста, взаимоотношения пересечений, установление минералов, находящихся в виде остроугольных обломков и цементирующей массы, а также выявление вторичных минералов замещения.

Оформление результатов минералогического исследования руд и продуктов их переработки для решения технологических задач

В отличие от описательной минераграфии, которая дает преимущественно качественную характеристику руды, решение задач технологической минералогии требует количественного подхода и привлечения статистических методов.

Для постановки рациональной схемы отработки руды следует знать преобладающие размеры скоплений или отдельных рудных минералов, которые необходимо получить в виде концентратов, освобожденных от сопутствующих минералов, а также количественные соотношения между различными минералами, характер их сростаний между собой и т.д. (табл. П.1).

Количественные измерения в полированных препаратах из продуктов переработки руд (концентратов, хвостов и пр.), производятся по меньшей мере для 500 частиц из каждой фракции. Чем меньше концентрация полезного минерала во фракции, тем большее количество зерен требуется подсчитывать. Для всех минералов измеряются площадные соотношения, которые приводятся потом к 100 % (табл. П.2).

Пересчет площадных соотношений на элементный состав позволяет видеть, сколько процентов элемента приходится на тот или иной минерал (табл. П.3). Значительных расхождений данных химического и минералогического анализов быть не должно.

Степень раскрытия минералов документируется таблицами различной формы (табл. П.4) и иллюстрируется зарисовками или фотографиями.

Цветные иллюстрации



Рис. П.1. Электромагнитный спектр (а) и интервалы длин волн в видимой области света (б). По [Крейг, Воган, 1983]

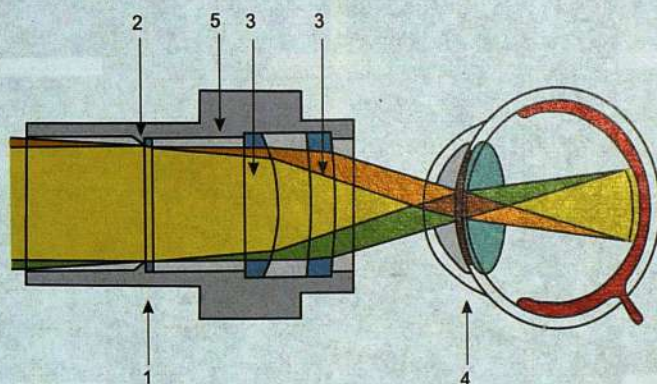


Рис. П.2. Разрез окуляра. По [<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu>]:
 1 – положение промежуточного изображения; 2 – ограничение полезного поля зрения; 3 – окулярная оптика; 4 – положение зрачка окуляра – зрачок глаза наблюдателя; 5 – фокусирующее кольцо

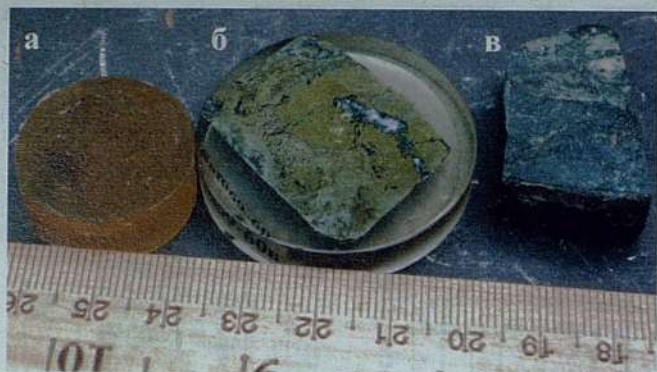


Рис. П.3. Препараты для минераграфических исследований:
 а) шашка с концентратом руды (брикет); б) шашка с образцом сульфидной руды; в) аншлиф из сульфидной руды

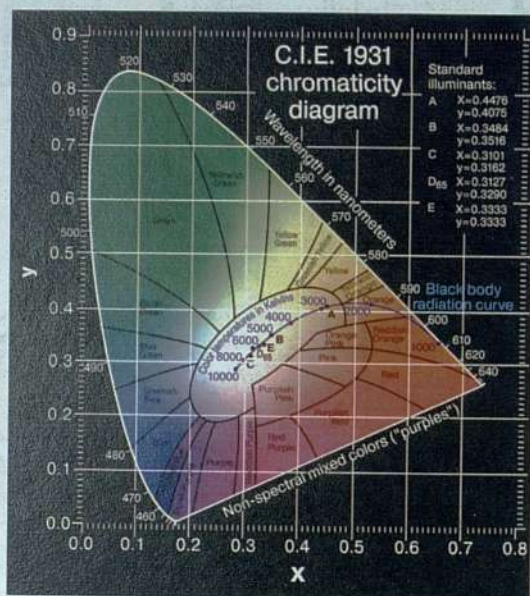


Рис. П.4. Хроматическая диаграмма.

По [Чвилева и др., 1977]

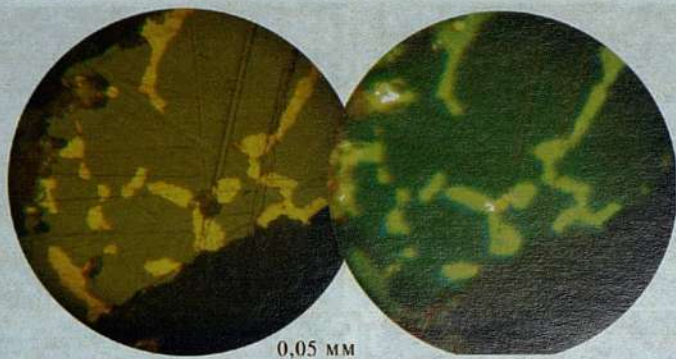


Рис. П.5. Неполное погасание золота (желтое) в теннантите (серое). Слева – николи параллельны, справа – скрещены, масляная иммерсия. Бабарыкинское рудопоявление, Южный Урал

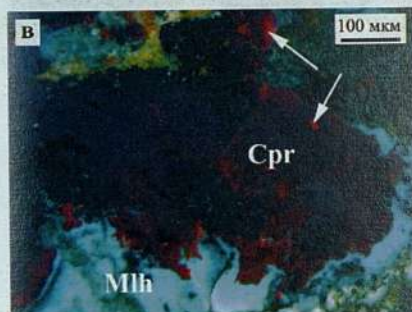
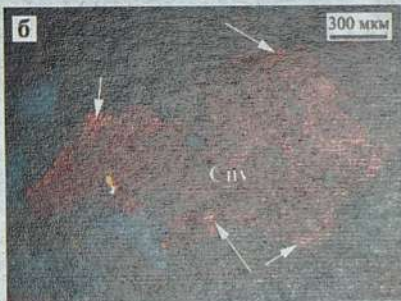
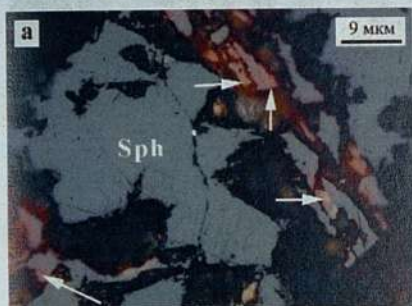


Рис. П.6. Внутренние рефлексы в минералах (николи скрещены): а) красно-бурые рефлексы сфалерита; б) кроваво-красные внутренние рефлексы киновари; в) красные рефлексы куприта и голубовато-зеленоватые малахита; г) желто-зеленые рефлексы аурипигмента.

Символы, обозначающие минералы, приведены в приложении 1

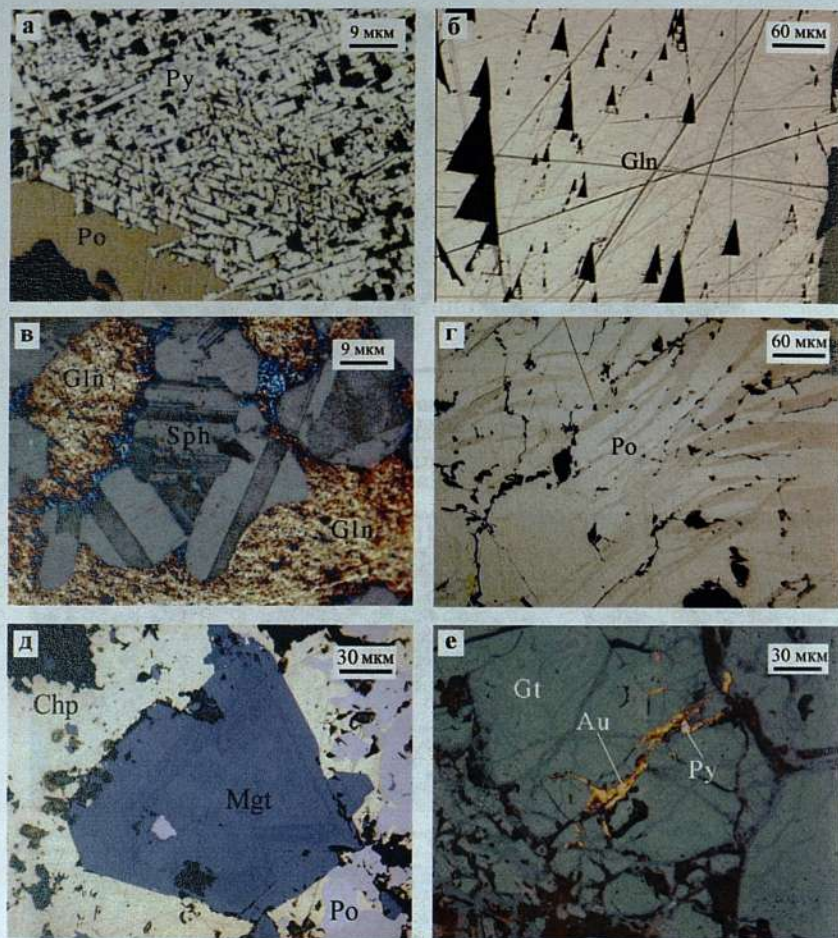


Рис. П.7. Структурные и морфологические признаки сульфидных минералов:
 а-б) проявление отдельности и спайности в сульфидных минералах: а) пластинчатая отдельность пирита; б) треугольники выкрашивания в галените. Рудопоявление Западное, Полярный Урал; в) двойникованные зерна сфалерита, сцементированные галенитом. Протравлено в парах царской водки. Месторождение Сафьяновское, Средний Урал; г) двойникованные разноориентированные пластинки пирротина. Рудопоявление Западное, Полярный Урал; д) кристалл магнетита с зональностью роста и включением пирротина, захваченным при росте. Протравлено в конц. HCl. Месторождение Сибайское, Южный Урал; е) прожилок золота (Au) в гетите. Месторождение Ганеевское, Южный Урал.

Отраженный свет. Николи параллельны

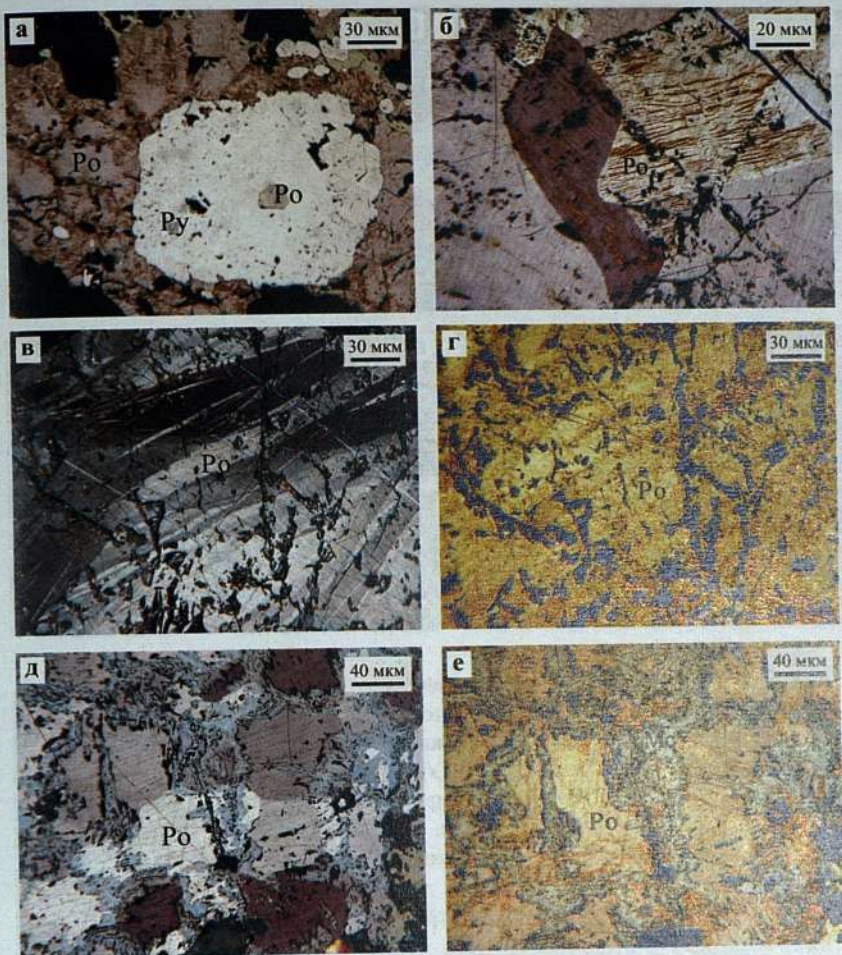


Рис. П.8. Порошковые рисунки пирротина:

а) включение немагнитного пирротина в агрегате пирита, окруженном немагнитным пирротинном с каймой магнитного (коричневое). Месторождение Маукское, Южный Урал, параллельные николи; б) сращения различно ориентированных пластин пирротина. Месторождение Ивановское, Южный Урал, скрещенные николи; в-г) деформированные пластинки пирротина. Западное рудопроявление, Полярный Урал: в) без эмульсии, скрещенные николи; г) осаждение магнитного порошка на светлых полосах, частично – на темных, параллельные николи; д-е) зернистый пирротин в ассоциации с марказитом. Месторождение Оттраваара, Финляндия: д) без эмульсии, скрещенные николи; е) осаждение магнитного порошка по пластинкам в пирротине, параллельные николи. Отраженный свет

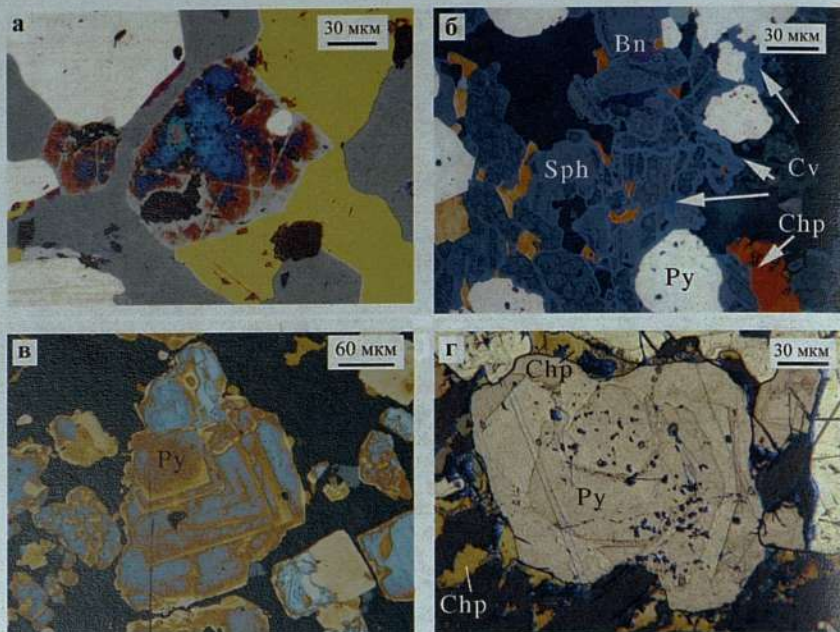


Рис. П.9. Результаты окисления и растворения сульфидных минералов:
 а) побежалость на зернах теннантита. Месторождение Ломовское, Средний Урал;
 б) окисление халькопирита и борнита, развитие ковеллина вокруг зерен сфалерита. Месторождение Ломовское, Средний Урал; в) появление цветной пленки на обломках зонального кристаллического пирита. Месторождение Летнее, Южный Урал; г) растворение поверхностного слоя с выявлением рисунка, отражающего зональность в кристалле пирита. Месторождение Маукское, Южный Урал.

Отраженный свет.

На снимке г – результат структурного травления с помощью конц. HNO_3

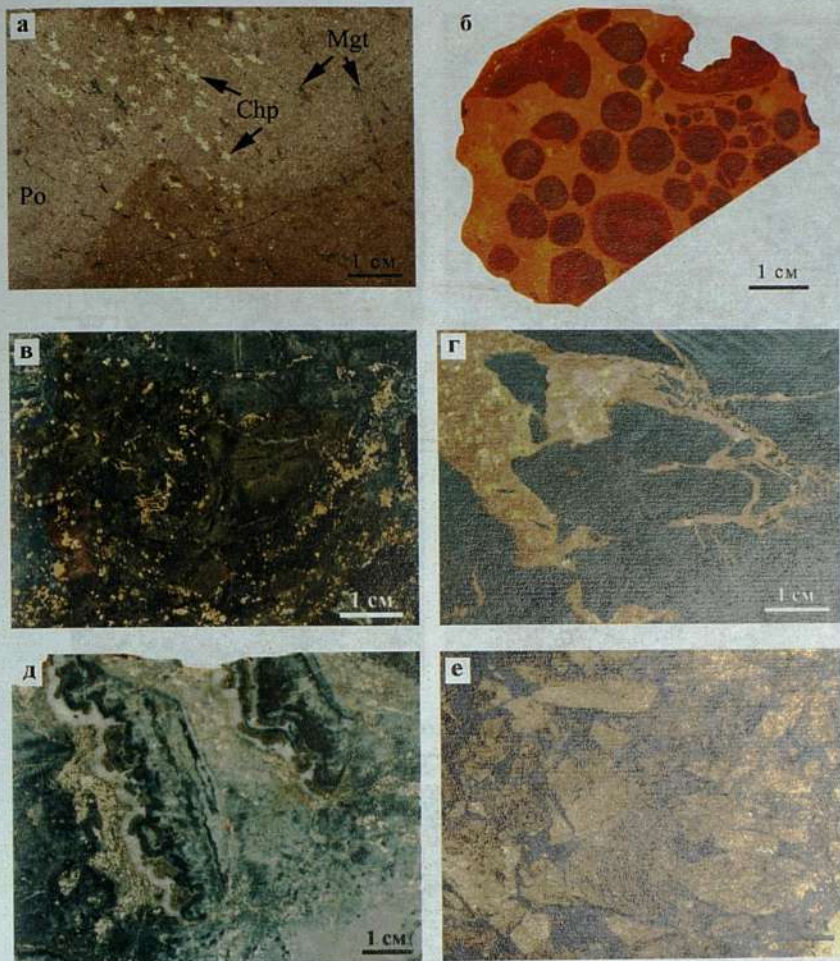


Рис. П.10. Текстуры руд:

а) массивная текстура пирротина. Месторождение Ивановское, Южный Урал. Полированный штуф; б) оолитовая текстура боксита. Месторождение Краснооктябрьское, Казахстан. Полированный штуф; в) гнездово-вкрапленная текстура пирита в нерудной матрице. Месторождение Вишневское, Южный Урал. Полированный штуф; г) жильная текстура халькопирит-пирротиновых агрегатов в нерудной матрице. Месторождение Ивановское, Южный Урал. Полированный штуф; д) кристаллизационная текстура: трещины в породе (серое) заполнены симметрично отлагавшимися на ее стенках агрегатами сульфидов (желтое и темно-синее) и кварца (белое). Месторождение Березняковское, Южный Урал. Полированный штуф;

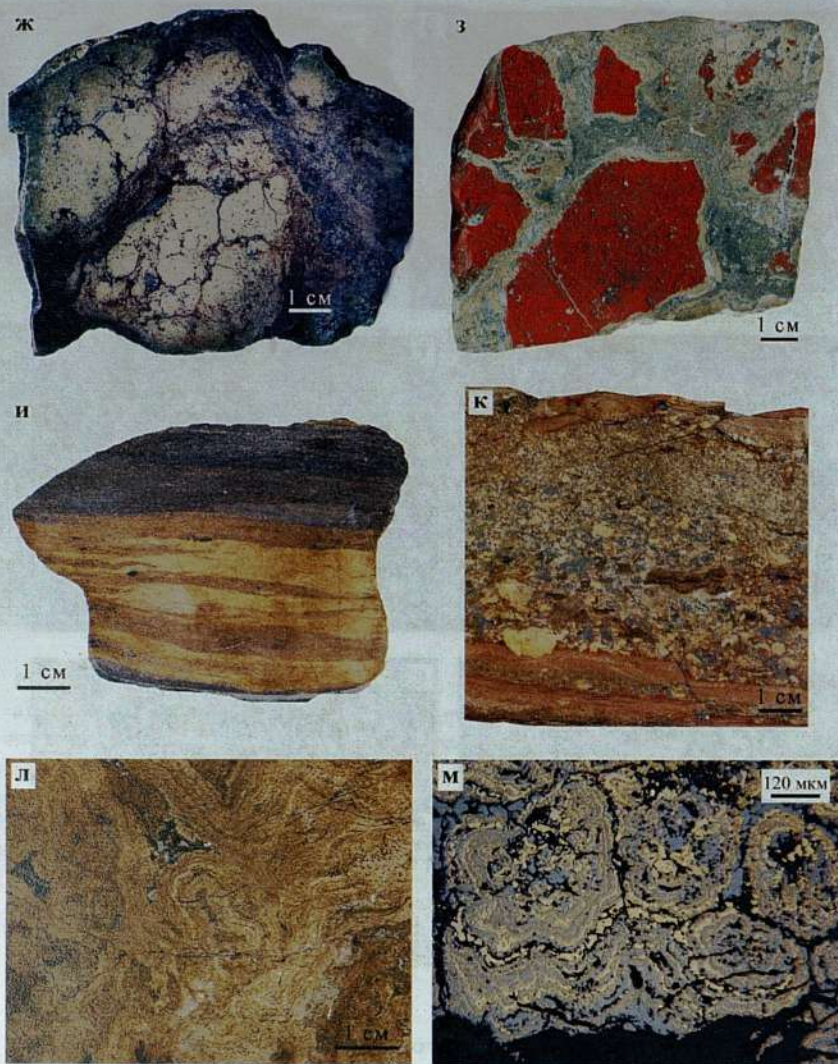


Рис. П.10 (продолжение). Текстуры руд.

е) брекчиевая текстура: остроугольные пирит-халькопиритовые обломки в сфалеритовом цементе. Месторождение Сафьяновское, Средний Урал. Полированный штуф; ж) брекчиевидная текстура: серноколчеданная пиритовая руда, пронизанная прожилками борнита и сфалерита. Месторождение Александринское, Южный Урал. Полированный штуф; з) цементационная текстура: обломки джасперитов (крас-



Рис. П.10 (окончание). Текстуры руд.

ное) в сульфидной матрице. Месторождение Талганское, Южный Урал. Полированный штуф; и) линзовидно-полосчатая текстура пирит-сфалеритовой руды. Месторождение Плагон, Иберийский пиритовый пояс. Полированный штуф; к) слоистая текстура: чередование слоев с разной крупностью обломочного сульфидного материала. Месторождение Яман-Касы, Южный Урал. Полированный штуф; л) колломорфное строение пиритовой руды. Месторождение Сафьяновское, Средний Урал. Полированный штуф; м) колломорфная микротекстура: концентрически-зональное строение халькопирит-сфалеритового агрегата. Месторождение Яман-Касы, Южный Урал. Полированный аншлиф; н) конкреционная текстура: пиритовые конкреции округлой и овальной формы в сульфидной или нерудной матрице. Месторождение Корбет, Канада. Полированный штуф; о) конкреционная микротекстура: радиально-лучистое строение пиритового агрегата с затравкой из кристаллика пирита в центре. Месторождение Копыловское, Бодайбинский район. Полированный аншлиф; п) ячеистая текстура: пустоты выщелачивания в силикатной породе. Месторождение Юбилейное, Южный Урал. Штуф; р) пloyчатость в сланцевато-полосчатой сульфидной руде. Месторождение Маукское, Южный Урал. Полированный штуф.

Образцы из коллекций авторов и И.Ю. Мелекесцевой (а, в, г), В.В. Масленникова (ж, и), Е.В. Белогуб (б, н, о)

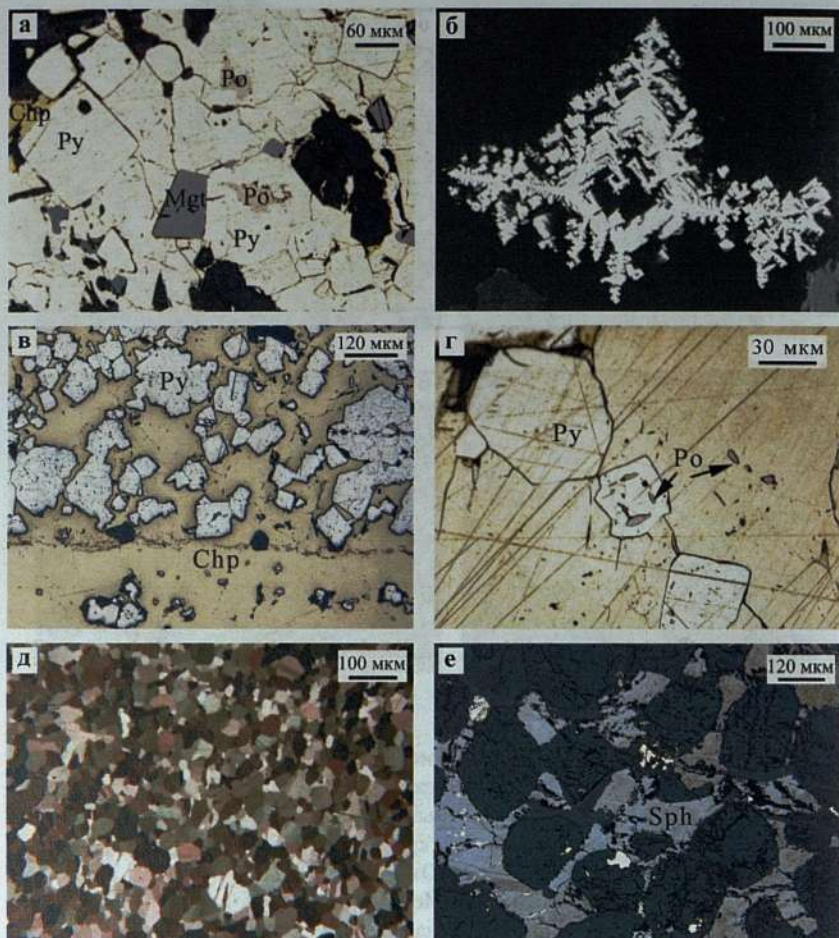


Рис. П.11. Кристаллически-зернистые структуры:

а) идиоморфные кристаллы пирита, магнетита, ксеноморфные агрегаты пирротина в гипидиоморфном пирите и халькопирита в межкристаллическом пространстве. Месторождение Маукское, Южный Урал; б) скелетные кристаллы галенита. Месторождение Джусинское, Урал; в-г) гипидиоморфные кристаллы пирита в халькопирите (в), с пойкилитовыми включениями пирротина (г). Месторождение Яман-Касы, Южный Урал; д) гранозернистый агрегат антимонита. Никולי скрещены. Месторождение Сарылах, Якутия; е) ксеноморфный сфалерит в промежутках между идиоморфными и гипидиоморфными кристаллами нерудных минералов. Рудопрооявление Западное, Полярный Урал.

Темное – нерудные минералы. Отраженный свет.

Рис. б – фото Е.В. Белогуб, рис. в – С.П. Масленниковой.

Символы, обозначающие минералы, приведены в приложении 1

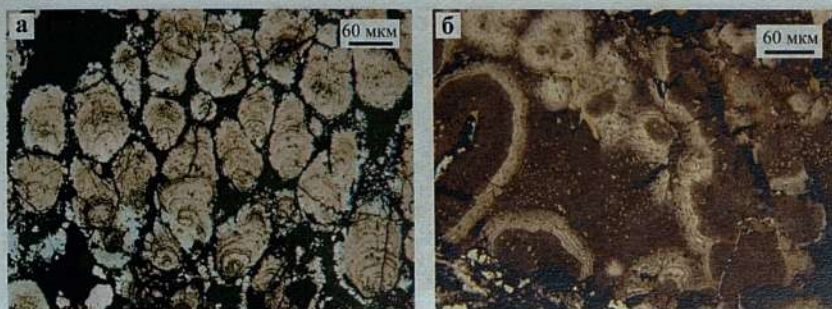


Рис. П.12. Метаколлоидные структуры:

а) скрытокристаллическое строение гроздьевидных выделений пирит-марказитового состава; б) колломорфно-метаколлоидная структура раскристаллизации тонкодисперсного пирита (коричневое). Месторождение Яман-Касы, Южный Урал.

Темное – нерудные минералы. Отраженный свет

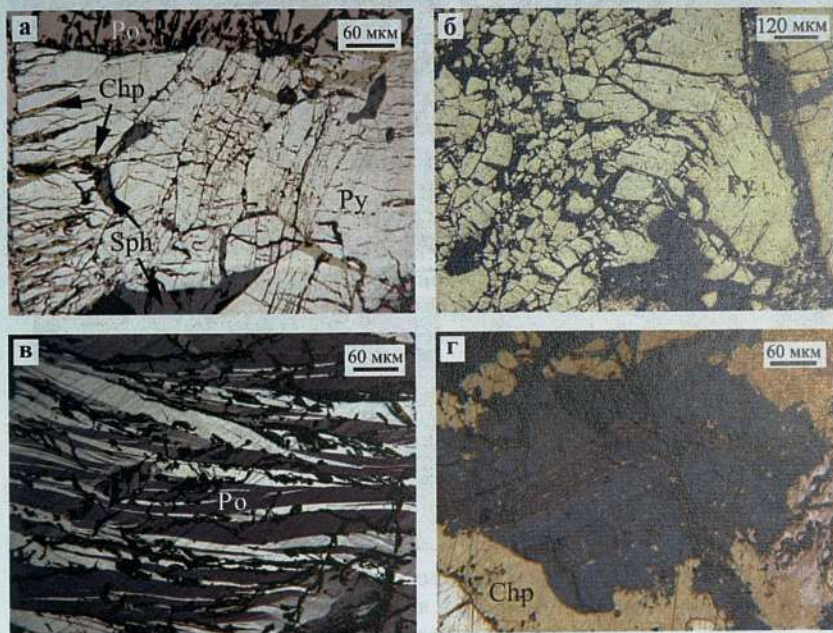


Рис. П.13. Деформационные (катакlastические) структуры:

а–б) катаклазированный кристаллический пирит, сцементированный халькопиритом, сфалеритом (а) и нерудным материалом (б); в–г) пластинки смятия в пирротине (в) и сфалерите (г). Рудопоявление Западное, Полярный Урал.

Отраженный свет. На рис. в – николи скрещены

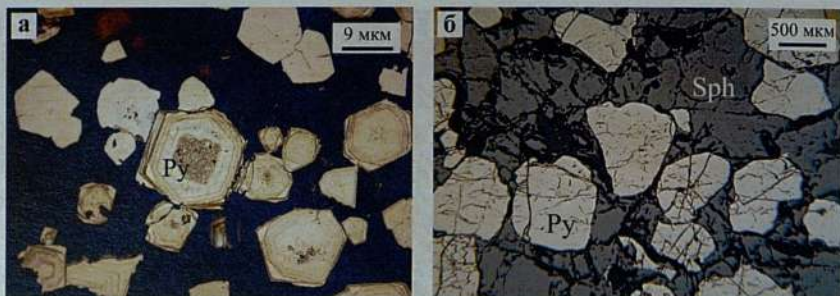


Рис. П.14. Порфировая и порфиридная структуры:

а) метакристаллы пирита с зональностью роста в нерудной матрице. Месторождение Талганское, Южный Урал; б) порфиробласты пирита на фоне субгедрального сфалерита. Месторождение Гарньерское, Северный Урал.

Темное на снимках – нерудные минералы. Отраженный свет

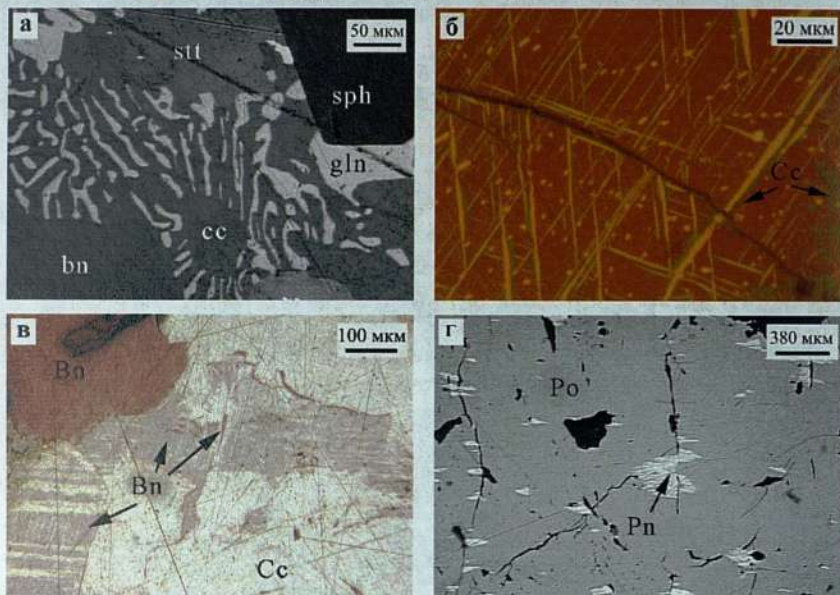


Рис. П.15. Структуры распада твердых растворов:

а) графическая структура: халькозин и штромейерит с графическими выделениями галенита. Бабарькинское рудопроявление, Южный Урал; б) решетчатая структура: пластинки халькопирита с каймами халькозина (Cc) в борните. Месторождение Удокан, Сибирь; в) пластинчатая структура: пластинки борнита в халькозине. Месторождение Коко-Таунг, Мьянма; г) пламенивидная структура: пламенивидные выделения пентландита в пирротине. Месторождение Ивановское, Южный Урал. Отраженный свет.

Рис. б – иммерсия в масле; г – фото И.Ю. Мелекесцевой.

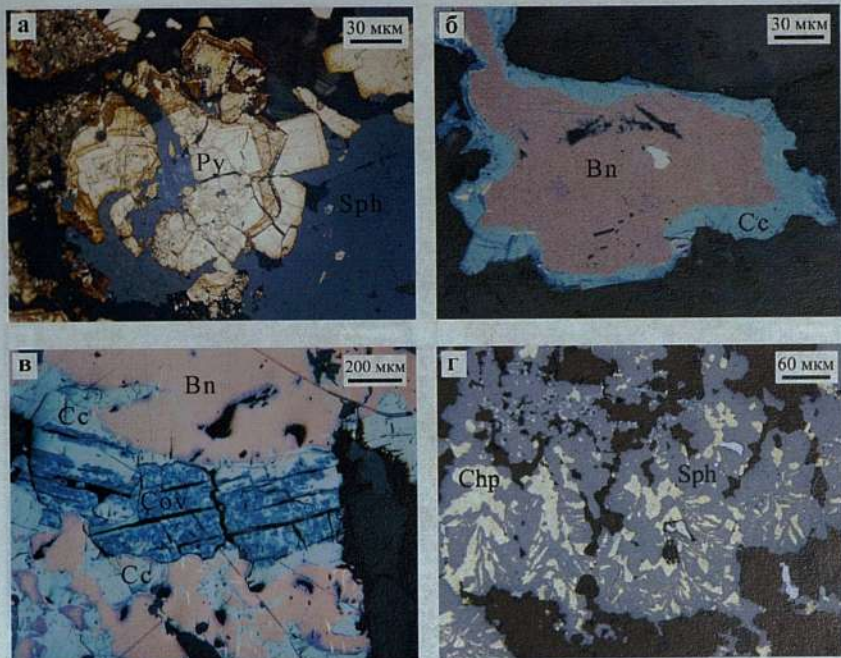


Рис. П.16. Коррозионные структуры:

а) структура замещения: замещение кристаллического пирита сфалеритом. Протравлено конц. HNO_3 . Месторождение Сафьяновское, Средний Урал; б) структура замещения: замещение борнита халькозином. Удоканское месторождение, Сибирь; в) решетчатая структура: замещение борнита пластинчатым халькозином и ковеллином. Удоканское месторождение, Сибирь; г) графическая структура: реликты халькопирита в сфалерите. Месторождение Яман-Касы, Южный Урал; д) структура «птичьего глаза»: замещение пирротина тонкозернистым агрегатом пирит+марказит. Месторождение Ивановское, Южный Урал; е) реликтовая структура: прожилки позднего пирита (Py-2) рассекают пирит с реликтами первичной

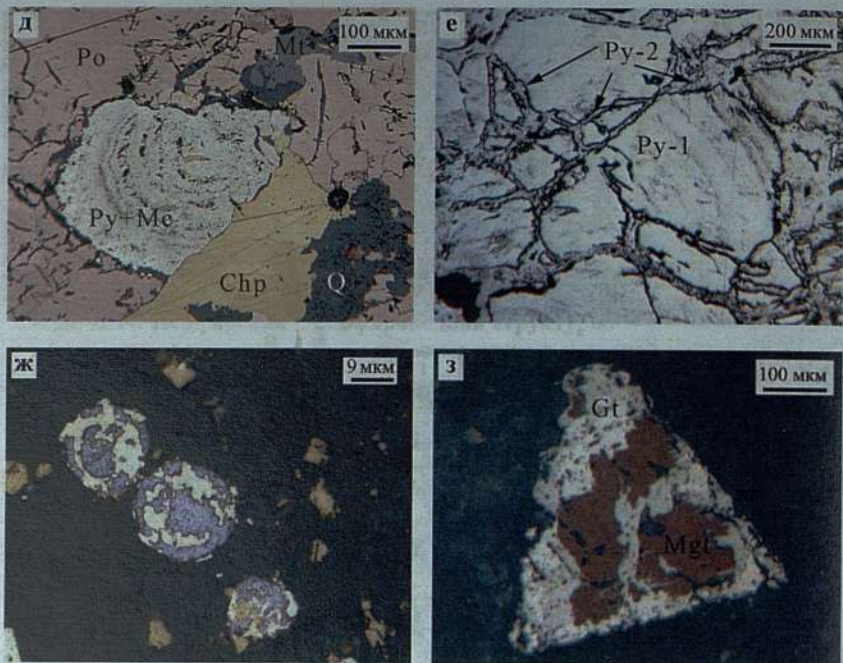


Рис. П.16 (окончание). Коррозионные структуры.

структуры «птичьего глаза» (Py-1). Харальское месторождение, Восточная Тува; ж) атоллаовая структура: замещение пирита галенитом. Месторождение Сафьяновское, Средний Урал; з) псевдоморфная структура: псевдоморфное замещение кристалла магнетита гетитом. Харальское месторождение, Восточная Тува.

Темное на снимках – нерудные минералы. Отраженный свет. На снимке «з» минералы покрыты магнитной суспензией.

Рис. в – фото Е.В. Белогуб, г – С.П. Маслениковой, д, е, з – И.Ю. Мелекесцевой

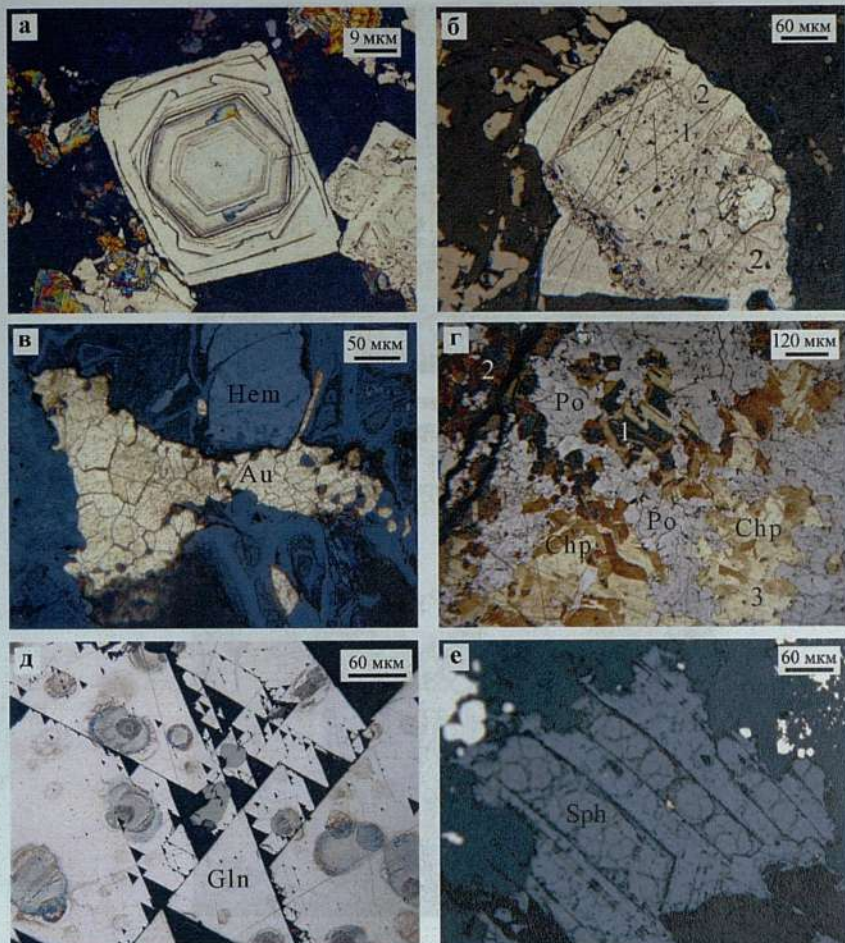


Рис. П.17. Структуры некоторых сульфидных минералов после травления:
 а) зональный пирит со сменой форм роста. Месторождение Талганское, Южный Урал; б) кристаллический пирит с зональностью роста 1 и 2 порядка (по [Иванов, 1950]). Включения нерудного вещества подчеркивают зональность 2 порядка. Месторождение Маукское, Южный Урал; в) ксеноморфный агрегат самородного золота, состоящий из гипидиоморфных зерен. Арысканское месторождение, Тува; г) сочетание протравленного (1), перетравленного (2) и непротравленного халькопирита (3). Месторождение Юлукское, Южный Урал; д) кольцообразные структуры в галените. Берслаген, Швеция; е) округлые ложные формы на фоне сдвойникованных пластинок сфалерита. Месторождение Маукское, Южный Урал.

Темное на снимках – нерудные минералы. Отраженный свет.

Рис. в – фото И.Ю. Мелекесцевой, рис. а, б – протравлено в конц. HNO_3 ; в – в конц. HCl ; г–е – в парах царской водки

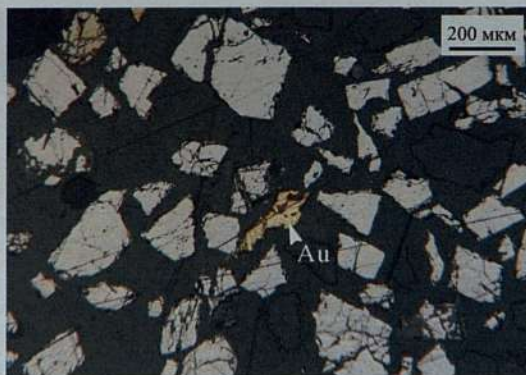


Рис. П.18. Частица золота (Au) в гравитационном концентрате с арсенопиритом (белые частицы).

Полированный препарат на основе эпоксидной смолы. Месторождение Кекура, Чукотка

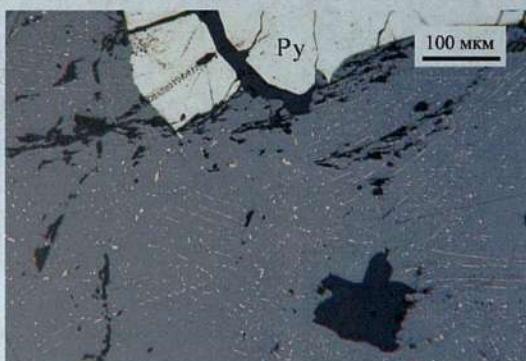


Рис. П.19. Вкрапленность халькопирита в сфалерите.

В связи с неизбежными проблемами обогащения таких руд образовался особый термин – «халькопиритовая болезнь сфалерита». Тарньерское месторождение, Северный Урал

Учебное издание

Наталья Павловна Сафина,
Константин Александрович Новоселов

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ИССЛЕДОВАНИИ РУД

Учебное пособие

Техн. редактор А.В. Миних
Корректор И.В. Сияковская
Компьютерная верстка Л.Б. Новокрещеновой

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 20.06.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 10,0. Тираж 200 экз. Заказ 192/442. Цена С.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.