МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ВУЗОВ

ИРКУТСКИЙ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Профессор С. А. ВАХРОМЕЕВ

РУКОВОДСТВО ПО МИНЕРАГРАФИИ

Издание третье,
исправленное и дополненное

ИРКУТСК
1956

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первый вариант руководства по минераграфии написан автором в 1937 г.—«Руководство к практическим занятиям по минераграфии» (часть 1), опубликованное Свердловским горным институтом в 1941 г.

Второе издание руководства было значительно переработано и дополнено на основе опыта педагогической и исследовательской работы автора с учетом замечаний ведущих специалистов по минераграфии. Оно охватывает весь круг вопросов, предусмотренных программами геологоразведочных высших учебных заведений.

Руководство рассчитано на студентов и геологов, занимающихся минераграфией, поэтому особое внимание в нем уделено методике минераграфических исследований.

В основу определения рудных минералов автор положил физические признаки (отражательную способность и твердость), что является прогрессивным направлением в минераграфии, развиваемым советскими учеными. Руководствуясь этим принципом, автор разработал таблицы для определения рудных и важнейших сопровождающих минералов. Автором предложена простая и доступная конструкция прибора для измерения отражательной способности.

В работе уделено значительное внимание вопросам текстур и структур руд, описанных на основе исследований в этой области А. Г. Бетехтина и личных наблюдений автора. Количественный минералогический анализ освещен в руководстве на основе исследований проф. А. А. Глаголева.

Автор приносит благодарность А. Г. Бетехтину, Е. Е. Захарову, И. С. Волынскому, В. А. Глазковскому и С. Н. Иванову, которые критически просмотрели его труд и дали ряд ценных указаний.

Второе издание руководства, выпущенное в 1950 году, разошлось в несколько месяцев, но автор до сих пор получает запросы на свою книгу. Учитывая это обстоятельство, а также удачный опыт педагогической работы по руководству в течение пяти лет в ряде геологоразведочных вузов, автор решил подготовить третье издание своей работы.

Переиздание руководства было поддержано в 1954 г. Ленинградским горным институтом и Московским государственным университетом.

Новое издание руководства существенной переработке не подвергалось, поскольку автор не имел по нему существенных замечаний. Как и предшествующее издание, руководство представляет методическое пособие для студентов геологических и геологоразведочных вузов, но оно может быть использовано научными работниками и геологами-производственниками, начинающими работать в области минераграфии.

Учитывая развитие науки и совершенствование методов исследования вещественного состава полезных ископаемых, автор внес в третье издание руководства следующие дополнения.

Дано описание последней модели рудного микроскопа МИН-6 завода «Прогресс».

Пополнена и расширена глава «Изготовление полированных шлифов руд», поскольку хорошие микроскопические препараты являются основой успеха минераграфических исследований.

Дано описание пленочных реакций, имеющих большое значение для диагностики карбонатов и других минералов.

В таблицы и в описание минералов включено дополнительно 6 минералов, имеющих значение при изучении рудных месторождений.

В главе «Текстуры и структуры руд» более углублено и расширено понятие о генетическом значении текстур и структур.

В конце работы помещена новая глава, посвященная краткому обзору современных методов исследования вещественного состава руд.

В работу включены дополнительные иллюстрации и пополнен список литературы.

Автор приносит благодарность научным сотрудникам кафедры Е. Д. Иньшину и Е. М. Перетолчиной за существенную помощь в подготовке рукописи к печати.

ВВЕДЕНИЕ

Минераграфия — это метод микроскопического изучения в отраженном свете полированных образцов рудных или вообще непрозрачных минералов. С помощью этого метода может быть установлен минералогический состав руды (качественный и количественный) и выяснены ее структурные особенности.

Минераграфия тесно связана с минералогией и с учением о полезных ископаемых. Знание минералогии необходимо для успешного прохождения курса минераграфии. С помощью минераграфического метода определяются микроскопические зерна минералов, недоступные для определения с помощью паяльной трубки или других макроскопических методов. Кроме того, минераграфическим путем удается определять мельчайшие включения и закономерные микросрастания, что позволяет вносить соответствующие поправки при расчете формул минералов по данным химического анализа.

Особенно велико значение минераграфии в изучении рудных месторождений. Минераграфические исследования помогают устанавливать вещественный состав руд и выяснять закономерности изменения его в различных участках рудного тела. Изучение структурных особенностей руд дает указания на последовательность минералообразования. В общем минераграфические исследования, наряду с исследованиями петрографическими и геологическими, позволяют выяснить генетический тип месторождения и тем самым подойти к правильной оценке последнего и к выбору наиболее эффективных методов ведения геологоразведочных работ.

Минераграфия имеет исключительно большое значение для механического обогащения руд и вообще их технологической переработки. Обогатитель должен знать качественный и количественный минералогический состав, размеры зерен и характер их срастания как для исходной руды и концентратов, так и для хвостов и промежуточных продуктов. Эти данные позволяют установить требуемую крупность дробления, облегчают выбор метода обогащения и позволяют контролировать ход его процесса.

Следует еще указать, что микроскопические определения в отраженном свете с успехом применяются при исследовании ископаемых углей.

Минераграфия — новый, быстрый и сравнительно простой метод исследования минерального сырья, широко применяемый для разрешения ряда научных и практических вопросов.

Впервые изучение полированной поверхности руды (пирротина) было произведено Берцелиусом в 1814 г.; микроскоп при этих исследованиях применен не был.

Микроскопический метод исследования металлов впервые был применен в 1831 г. в г. Златоусте горным инженером П. Аносовым, который с помощью микроскопа открыл тайну строения «булата» и наладил производство высококачественных отечественных клинков.

В 1863 г. Сорби опубликовал отчет о микроскопическом исследовании полированной поверхности железа, и эта дата считается началом науки металлографии.

В 1868 г. работавший на Обуховском заводе Д. К. Чернов открыл критические точки превращения стали, установил связь этих превращений со структурой металла и положил теоретические основы науки металлографии, из которой и развилась позднее минераграфия.

В начале текущего столетия геолог Е. Д. Стратанович по инициативе Е. С. Федорова разработал на Турьинских рудниках метод макроскопического изучения отшлифованных и покрытых лаком образцов руд, что позволило ему осветить процессы оруденения.

Исторической датой для минераграфии следует считать 1885 год, когда Баумхауер впервые произвел микроскопическое изучение в отраженном свете ряда минералов (борнит, халькозин, халькопирит, галенит).

В 1900 г. металлург В. Кэмбель начал изучение при помощи металлографического микроскопа ряда минералов и в 1906 г. опубликовал статью, в которой отметил чрезвычайную важность метода микроскопического исследования в отраженном свете для геологов и минералогов.

Первый минераграфический определитель Мердоча вышел в 1916 г.; в 1920 г. появляется второй определитель на английском языке Деви и Фарнгама (Dawy W. and Farnham C. Microscopic examination to ore minerals, 1920).

Впервые в СССР минераграфический метод был рекомендован проф. К. И. Висконтом, который в «Рудном вестнике» за 1918 г. поместил статью «О методе металлографического анализа непрозрачных рудных минералов». С 1922 по 1924 г. с минераграфией начали знакомить студентов Ленинградского горного института и Московской горной академии.

В 1925 г. опубликовано методическое руководство на английском языке Р. Ван-дер-Вин «Минераграфия и рудные

месторождения», т. 1, 1925 г., где автор стремится связать минераграфические исследования с вопросами рудогенезиса (Van der Veen R. Mineragraphie and ore deposition, vol. 1, 1925).

В 1931 г. Г. Шнейдерхеном и П. Рамдором выпущен учебник по микроскопии руд, том II, являющийся полным справочником и определителем рудных и непрозрачных минералов (Schneiderhöhn H. und Ramdohr P. Lehrbuch der Erzmikroskopie. Erster und zweiter Bands. Berlin, 1931, 1934). В качестве приложения к этой книге выпущены таблицы для микроскопического определения рудных минералов. Определение минералов здесь производится по твердости, поляризации и цвету; остальные признаки используются как вспомогательные.

Первый том учебника по микроскопии руд Шнейдерхена и Рамдора вышел позже — в 1934 году. В этой книге подробно описывается аппаратура для микроскопического исследования руд; аппаратура и методика изготовления полированных шлифов руд; микрофотографирование; обстоятельно разбираются методы исследований. Весьма интересна в этой работе глава II, где излагаются по М. Береку теоретические основы оптики по отношению к отраженному поляризованному свету.

В 1931 г. в Вашингтоне вышла книга по минераграфии на английском языке М. Шорт «Микроскопическое определение рудных минералов» (Short M. Microscopic determination of the opacue minerals, 1931). Здесь описана аппаратура и методика работы; автор дает таблицы для определения минералов на основе химических признаков, твердости и поляризации; особенно ценным в книге является описание микрохимических исследований рудных минералов, иллюстрированное красочными таблицами.

В 1933 г. была напечатана книга А. Г. Бетехтина и Л. В. Радугиной «Определение рудных минералов под микроскопом». В ней излагается методика определения минералов, приведены два определителя минералов: «малый» — для учебных целей и «большой» — для исследовательской работы. Во второй части книги приводится алфавитный перечень рудных минералов с их кратким описанием.

В 1934 г. появилась книга С. А. Юшко «Методы изучения руд в отраженном свете». Она включает, кроме краткой методической части и таблиц, описание структур руд и основы количественного минералогического анализа.

В «Проблемах советской геологии» за 1934 год была напечатана работа А. Г. Бетехтина «О текстурах и структурах руд», где автор принципиально разграничивает понятие текстуры и структуры и указывает, что многочисленные срастания, видимые под микроскопом в рудах, имеют текстурный характер.

В 1937 г. А. Г. Бетехтин в «Известиях Академии наук» поместил две статьи, в которых разбираются процессы формирования текстур и структур руд и приведена их классификация.

Количественный минералогический анализ руд под микроскопом нашел подробное освещение в книге А. А. Глаголева «Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом», изданной в 1941 г. Госгеолиздатом.

В том же году Свердловский горный институт издал «Руководство к практическим занятиям по минераграфии» (часть 1) С. А. Вахромеева, которое использовалось как учебное пособие.

В 1954 г. в «Известиях Академии наук» А. Г. Бетехтин выступил со статьей «О минераграфии», в которой намечены пути дальнейшего развития этой научной дисциплины. Автор считает первоочередной задачей создание описательной минераграфии, изучающей определенные свойства руд.

В 1947—1949 гг. Госгеолиздатом опубликована работа И. С. Волынского в трех томах «Определение рудных минералов под микроскопом». В первом томе рассмотрены минераграфические микроскопы и принадлежности к ним, способы изготовления полированных шлифов руд, диагностические свойства и методы изучения рудных минералов. Во втором томе дано указание к определению рудных минералов по системе таблиц-решеток и приложен самый определитель в виде картотеки из 70 стандартных таблиц. Третий том посвящен подробному описанию минералов.

В 1949 г. Госгеолиздат выпустил второе издание работы С. А. Юшко «Методы изучения руд под микроскопом в отраженном свете». Это руководство значительно дополнено и переработано с учетом достижений последних лет в области минераграфии. Книга отвечает программам геологоразведочных вузов и допущена Министерством высшего образования в качестве учебного пособия.

В 1951 г. Госгеолиздат опубликовал второе издание работы С. А. Вахромеева, составленное применительно к учебным планам и программам геологоразведочных вузов и допущенное Министерством высшего образования в качестве учебного пособия.

Далее следует отметить книгу на английском языке, опубликованную в 1951 г., В. Уитенбогард «Таблицы для микроскопического определения рудных минералов» (Uytenbogaardt W. Tables for microscopic indentification of ore minerals, 1951). В ней описана методика исследования и приведены три определительные таблицы. Автор использует для определения все физические и химические признаки, обращая большое внимание на твердость. Отмечаются также парагенетические группировки минералов.

В 1952 году Г. Шнейдерхен выпустил «Практикум по рудной микроскопии» (Schneiderhöhn H. Erzmikroskopisches Praktikum. Stutigart, 1952).

Хорошее учебное пособие по минераграфии написано И. Г. Магакьяном—«Таблицы для определения минералов в полированных шлифах», выпущенные в 1955 году Ленинградским горным институтом в качестве заказного издания. В основу таблиц положено разделение минералов на шесть групп по величине их отражательной способности.

ГЛАВА I

МИНЕРАГРАФИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Минераграфический микроскоп в отличие от петрографического имеет:

а) опак-иллюминатор—прибор для получения отраженного вертикально падающего света;

б) двигающийся вверх и вниз предметный столик, позволяющий производить наводку на фокус, не изменяя положения тубуса микроскопа и источника света;

в) специальные объективы, рассчитанные для наблюдения объектов, не прикрытых стеклами.

Наиболее существенной частью минераграфического микроскопа является опак-иллюминатор. Любой петрографический и даже биологический микроскоп, снабженный опак-иллюминатором, может служить для исследования руд.

2. ОПИСАНИЕ МИНЕРАГРАФИЧЕСКИХ МИКРОСКОПОВ

Микроскоп МП-4 завода «Русские самоцветы». Удобным для минераграфических исследований является выпущенный в 1947 г. микроскоп МП-4 завода «Русские самоцветы».

Микроскоп МП-4 служит главным образом для исследования непрозрачных или полупрозрачных шлифов в отраженном свете, но его можно применять и при изучении прозрачных шлифов в проходящем свете. Этот микроскоп (рис. 1) смонтирован на массивном изогнутом штативе (1) с подковообразной подставкой (2). К верхней части штатива неподвижно прикреплен тубус (3) с поляризационным опак-иллюминатором (4) и двумя окулярными трубками. Боковая трубка (5) с призмой (6) служит для визуального наблюдения, а вертикальная трубка (7) — для микрофотографирования, микрозарисовок или для работы с микрофотометром.

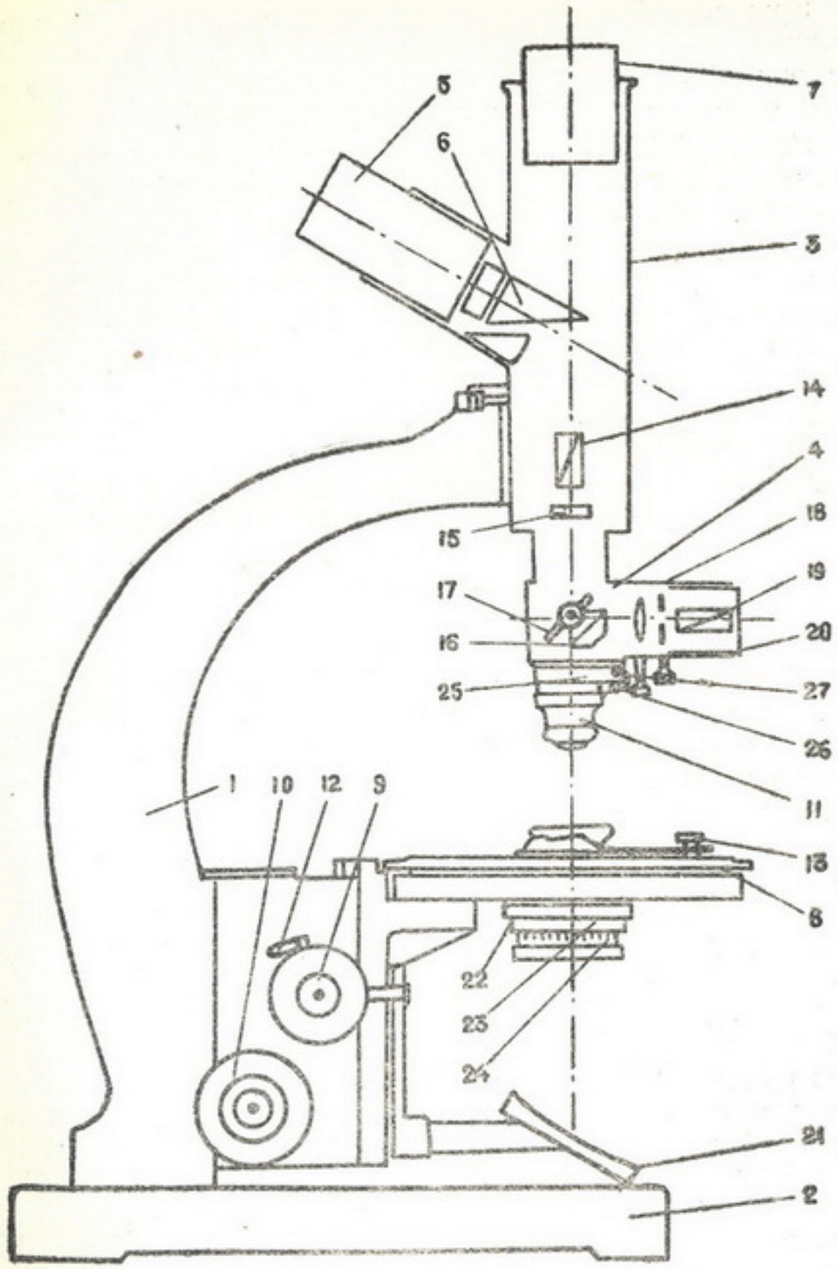


Рис. 1. Схема минераграфического поляризационного микроскопа МП-4 завода «Русские самоцветы».
0,41 натуральной величины.

1,2 — штатив с подставкой; 3 — тубус; 4 — опак-иллюминатор; 5,6 — трубка с призмой для визуального наблюдения; 7— трубка для рисовального окуляра или других приборов; 8 — предметный столик; 9,10 — подъемный и микрометренный винты столика; 11 — объектив; 12 — стопорный винт; 13— зажимные клеммы; 14— анастигматический анализатор; 15—паз для установки гипсовой пластинки или кварцевого клина; 16— призма тройного отражения; 17 — плоскопараллельная пластинка; 18 — трубка опак-иллюминатора; 19,20— поляризатор в оправе; 21 — зеркало; 22,23 — поляроид на откидывающемся кронштейне; 24 — шкала поляроида; 25,26 — обойма и щипцы для установки объективов; 27 — центрировочные винты.

Вращающийся предметный столик (8), расположенный в нижней части штатива, может перемещаться вертикально с помощью подъемного винта (9) или микрометренного винта (10) относительно объектива микроскопа (11).

При грубой установке столика движение его может быть застопорено с помощью винта с боковой ручкой (12). Слева от вращающегося предметного столика с лимбом, разделенным на 360°, помещены нониус и стопорный винт. Для включения боковой трубки визуального наблюдения (5) необходимо повернуть ее влево и вдвинуть внутрь тубуса до отказа.

В среднюю часть тубуса можно вводить или выводить из нее анастигматический анализатор (14). В нижней части тубуса установлен поляризационный опак-иллюминатор (4), описание которого приводится ниже.

Для переключения микроскопа на работу с прозрачными объектами нужно выключить призму опак-иллюминатора и осветить препарат снизу зеркалом (21). Между зеркалом и объектом можно установить поляроид (22), помещенный на откидывающемся кронштейне (23). При работе с кислотами поляроид необходимо отвести в сторону. Внешний вид микроскопа МП-4 изображен на рис. 2.

Микроскоп рудный МИН-6. Микроскоп МИН-6, выпущенный заводом «Прогресс», представляет портативный и весьма совершенный микроскоп отечественного производства. Он предназначен в основном для исследования непрозрачных объектов в отраженном свете, но может быть применен и для изучения прозрачных препаратов в проходящем свете. Внешний вид микроскопа изображен на рис. 4. Прилагающийся к микроскопу набор объективов и окуляров позволяет получать увеличения в 29—756 раз.

Микроскоп снабжен осветителем (опак-иллюминатор с собственным освещением) ОИ-8. Внешний вид опак-иллюминатора представлен на рис. 5. Источником света служит низковольтная лампочка накаливания мощностью 8,5 ватта и напряжением 8 вольт. Реостат, вмонтированный в питающий трансформатор, позволяет понижать напряжение до 50%. Патрон лампочки (1) может поворачиваться и качаться на оси, что позволяет с помощью винта (2) точно центрировать свет. В корпусе опак-иллюминатора установлена под углом 45° отражательная пластинка, которая может вращаться на угол ±6° за головку (3).

Для правильной установки плоскости поляризации корпус поляризатора имеет фиксатор, который должен входить в прорезь. С помощью рукоятки (4) поляризатор поворачивается на угол 90°. За поляризатором помещено матовое стекло (5), апертурная диафрагма и полевая диафрагма, отверстия которых регулируются рукоятками (6) и (7).

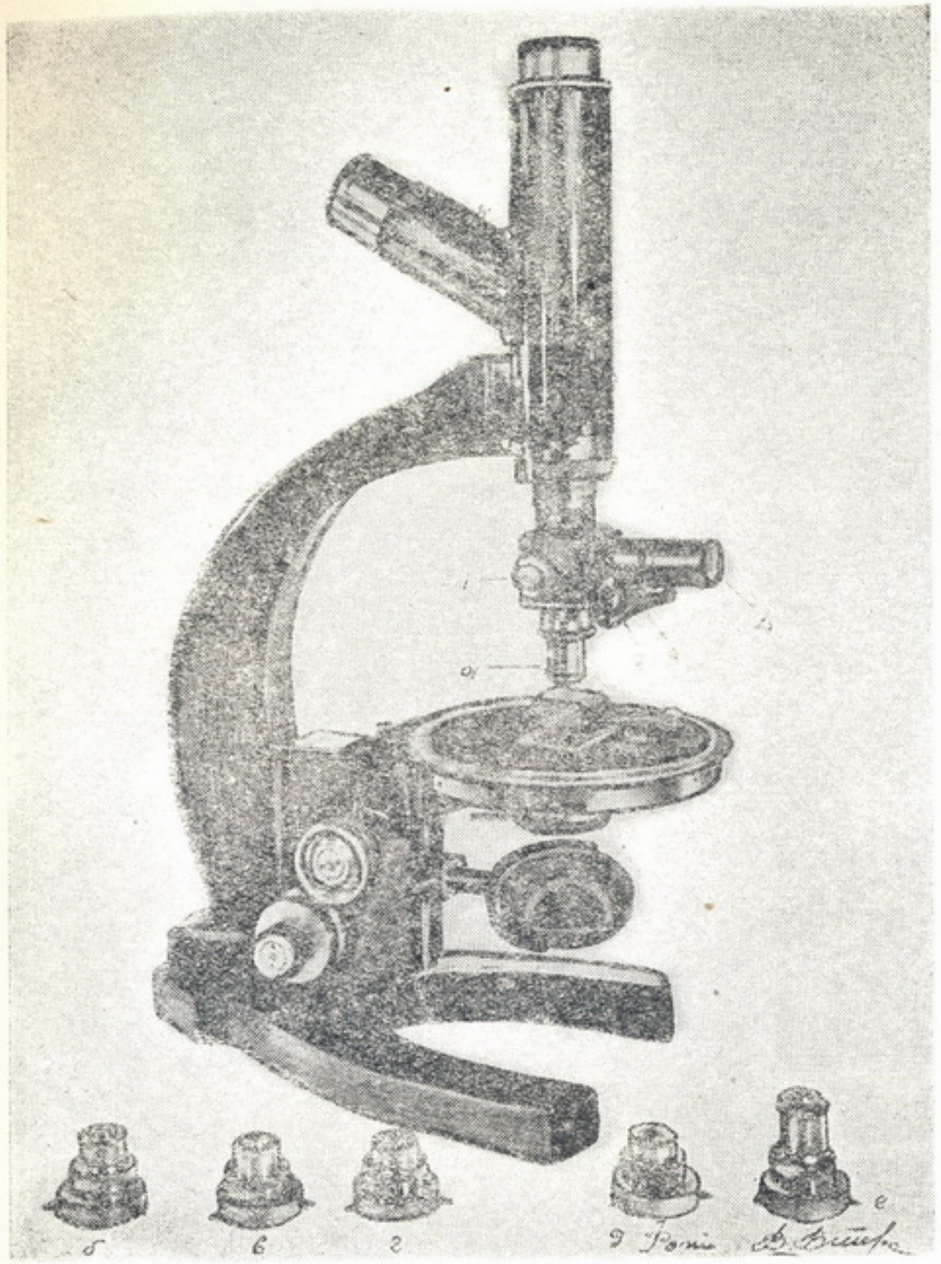


Рис. 2. Внешний вид микроскопа МП-4 завода «Русские самоцветы». 0,32 натуральной величины.

Детали опак-иллюминатора: 1 — стержень с призмой и пластинкой; 2 — линзочка; 3 — диафрагма поля зрения; 4 — николь-поляризатор. Объективы: а — 3,7×; б — 9×; в — 21×; г — 40×; д — 62×; е — 12× (иммерсионный).

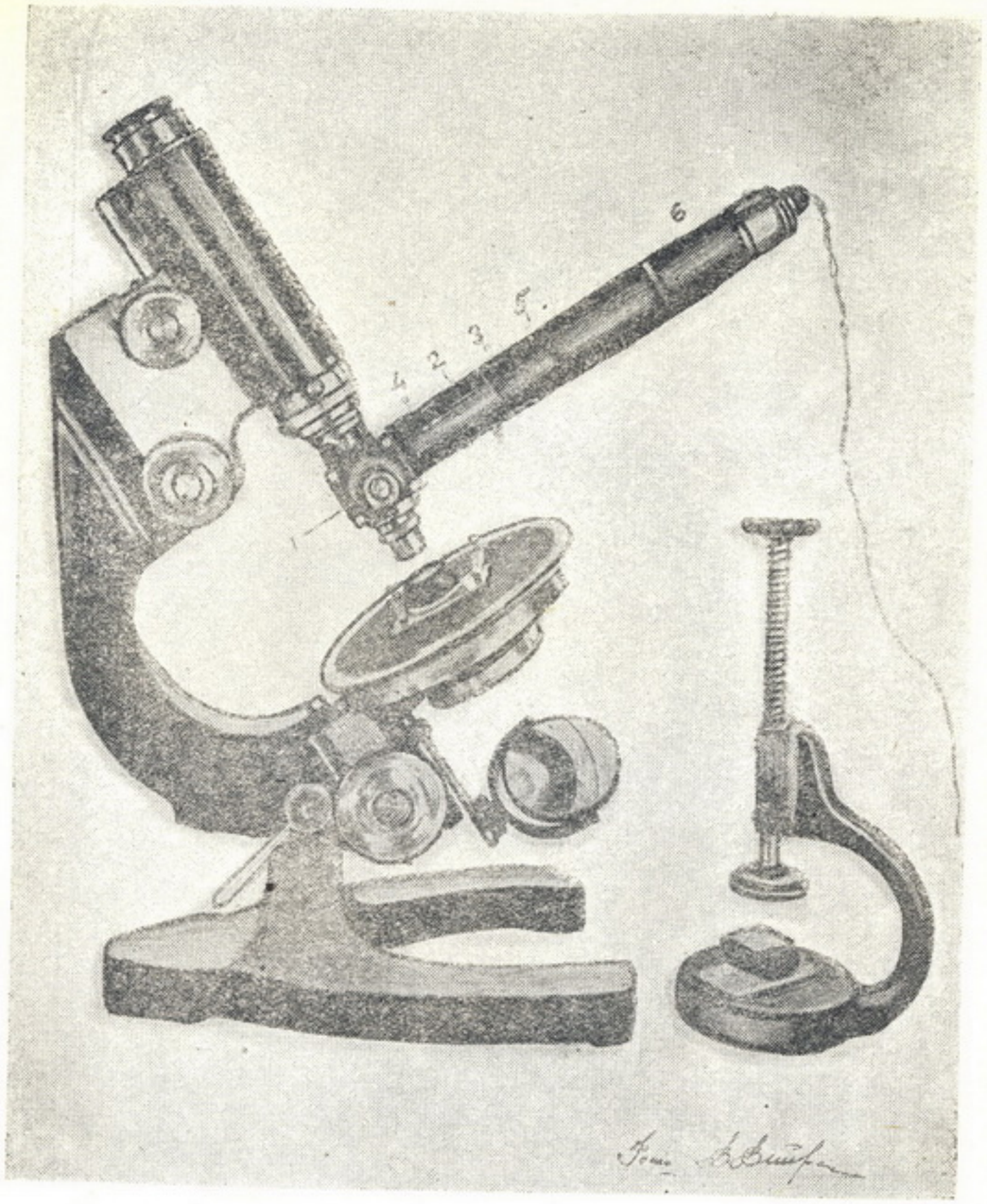


Рис. 3. Внешний вид микроскопа МП-5 завода «Русские самоцветы». 0,32 натуральной величины.

Справа — пресс для монтировки полированных шлифов.
Детали опак-иллюминатора: 1 — стержень с призмой и пластинкой; 2 — линзочка; 3 — диафрагма поля зрения; 4 — николь-поляризатор; 5 — апертурная диафрагма; 6 — связанный осветитель с низковольтной лампочкой и с прорезом для матового стекла или светофильтров.

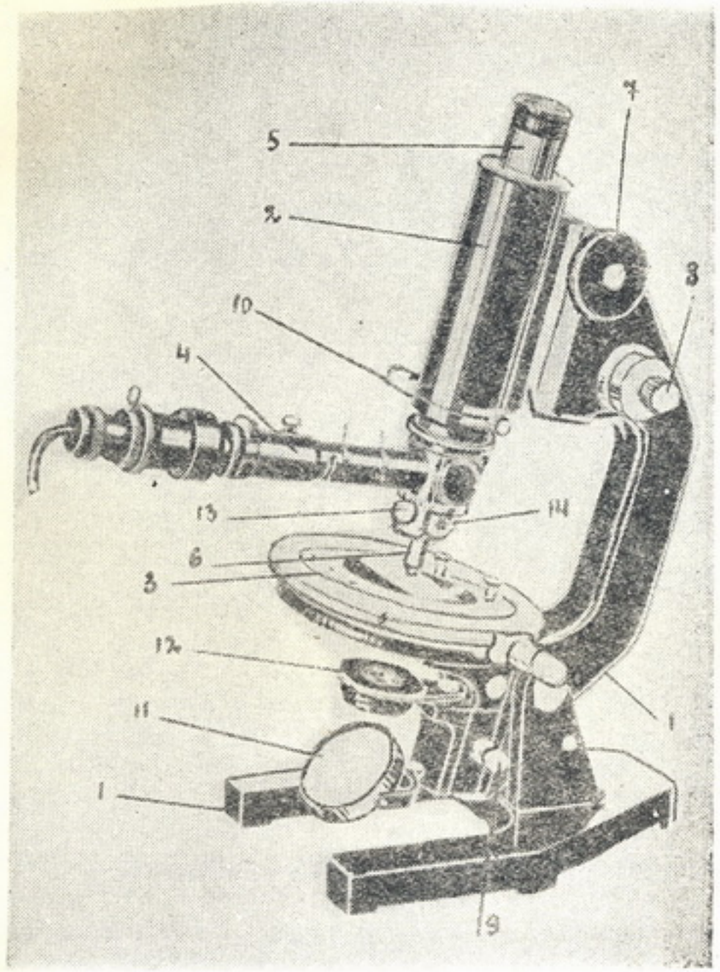


Рис. 4. Внешний вид микроскопа МИН-6 завода «Прогресс». 0,26 натуральной величины.
1 — штатив микроскопа; 2 — тубус; 3 — предметный столик; 4 — опакиллюминатор; 5 — окуляр; 6 — объектив, 7 — подъемный винт тубуса; 8 — микрометренный винт; 9 — зажимный винт столика; 10 — анализатор; 11 — зеркало (для проходящего света); 12 — поляризатор (для прохолящего света); 13 — щипцы для зажима объективов; 14 — центрировочный винт объектива.

Осветитель крепится к микроскопу с помощью кольца (8).

Для исследования высоких объектов столик микроскопа можно опустить, отжав предварительно винт (9).

Другие минераграфические микроскопы. Микроскоп модели МП-5 завода «Русские самоцветы» (рис. 3), как и микроскоп МП-4, предназначается для исследований в отраженном свете, но может применяться и для наблюдений в проходящем свете.

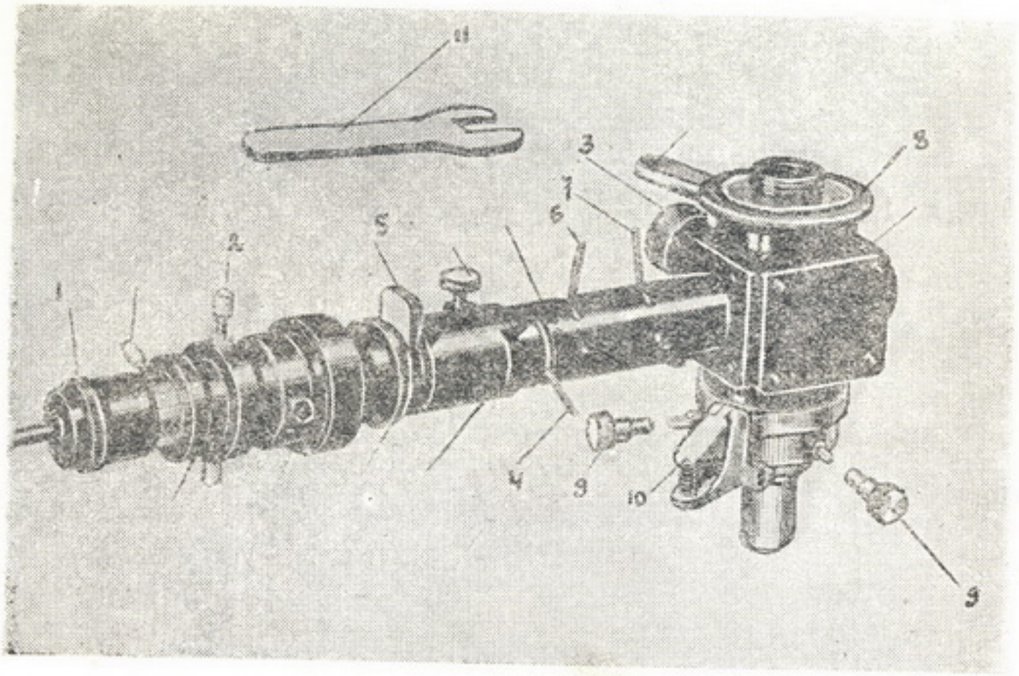


Рис. 5. Опак-иллюминатор типа ОИ-8 к микроскопу МИН-6. 0,7 натуральной величины.

1 — патрон лампочки; 2 — винт для центрировки света лампочки; 3 — головка стержня отражательной пластинки; 4 — рукоятка для вращения поляризатора; 5 — матовое стекло или светофильтр; 6 — рукоятка апертурной диафрагмы; — 7 рукоятка диафрагмы поля; 8 — кольцо для крепления осветителя; 9 — головки центрировочных винтов; 10 — щипцы для зажима объективов; 11 — ключ для привинчивания опак-иллюминатора.

Он имеет такой же опак-иллюминатор и такую же оптику, что и вышеописанный микроскоп МП-4. Отличительными особенностями микроскопа МП-5 являются перегибающийся штатив, позволяющий наклонять тубус микроскопа под разными углами, и возможность перемещения по направлению оптической оси не только столика микроскопа, но и тубуса с помощью подъемного и микрометренного винтов. Микроскоп МП-5 снабжен специальным осветителем с низковольтной лампочкой.

Кроме того, трестом «Русские самоцветы» выпущен универсальный микроскоп МП-3 для исследований как в проходящем, так и в отраженном свете.

Металлографический микроскоп (модель МИМ-5), изготовляемый заводом «Прогресс», может быть использован для наблюдения в отраженном (неполяризованном) свете и для микрофотографирования руд. Для учебных занятий по минераграфии этот микроскоп неудобен: он не имеет вращающегося столика и поляризационных приспособлений, а определение твердости минералов иглами и производство травления на нем затруднены вследствие того, что полированный шлиф накладывается на столик в перевернутом положении.

Минералогические микроскопы (модели МИН-1 и МИН-2) и поляризационный петрографический микроскоп (модель МП-2) могут быть приспособлены для исследования руд, если их снабдить опак-иллюминатором и набором специальных короткомонтированных объективов.

3. УСТРОЙСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ОПАК-ИЛЛЮМИНАТОРА

Опак-иллюминатором называется прибор для получения вертикально отраженного света. Он помещается обычно между объективом и тубусом микроскопа. Существуют два основных типа опак-иллюминаторов: призматический и пластинковый. В микроскопе МП-4 оба эти опак-иллюминатора смонтированы в одном приборе. Выдвигая стержень, на котором насажены призма и пластинка, можно по мере надобности пользоваться тем или другим устройством.

Ход лучей в призматическом опак-иллюминаторе показан на рис. 6, А.

Горизонтальный пучок лучей от источника света (1) проходит сначала через диафрагму «ирис» опак-иллюминатора (2), затем через линзочку (3) и далее преломляется в пучок лучей, почти вертикальных, в стеклянной призме (4) с посеребренной стенкой, обладающей полным внутренним отражением. После выхода из призмы пучок лучей проходит через объектив микроскопа (5) и падает на полированный шлиф (6). От полированной поверхности шлифа лучи отражаются и идут обратно вверх через объектив и далее, минуя призму опак-иллюминатора, проходят через тубус микроскопа и окуляр (7) к глазу наблюдателя.

Как показывают рис. 6, А и приведенное описание, призма отражает вниз весь падающий на нее свет. Однако в глаз попадает только часть света, отраженного полированной поверх-

ностью, другая часть света не пропускается самой призмой, которая занимает половину сечения тубуса микроскопа. Таким образом, в призматическом опак-иллюминаторе работает лишь половина отверстия объектива и используется лишь 50% падающего на полированную поверхность шлифа света. Недостаток призматического опак-иллюминатора заключается в несколько неравномерном освещении поля зрения микроскопа и в неполном использовании апертуры объектива,

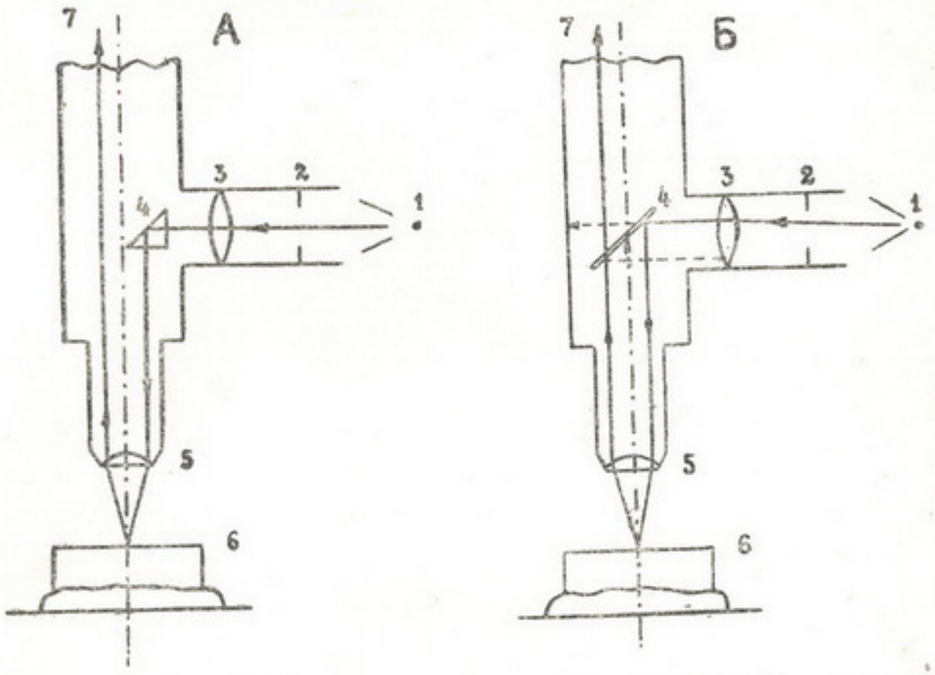


Рис. 6. Ход лучей в комбинированном опак-иллюминаторе: А — призматический опак-иллюминатор; Б — пластинковый опак-иллюминатор (схема). 1 — источник света; 2 — диафрагма; 3 — линзочка; 4 — призма (А), тонкая стеклянная пластинка (Б); 5 — объектив; 6 — полированный шлиф; 7 — луч, идущий к окуляру.

что снижает четкость изображения. Этот опак-иллюминатор рекомендуется применять при объективах средней силы (собственное увеличение от 9× до 21×). При более слабых увеличениях получаются чрезмерно контрастные картины, а при более сильных слишком дает себя знать неравномерность освещения. Так как в практике минераграфических исследований наиболее часто применяются объективы средней силы, то призматический опак-иллюминатор широко используется в работе.

Пластинковый опак-иллюминатор (рис. 6, Б) отличается от вышеописанного наличием вместо призмы тонкой стеклян-

ной пластинки, расположенной под углом 45°. Горизонтальный пучок лучей, падающий на эту пластинку (4), проходит через нее, причем часть его теряется бесполезно, а часть идет вниз через объектив (5) и отражается обратно вверх от полированного шлифа (6). Лучи света на обратном пути достигают пластинки (4), часть их отражается от нее в сторону, а часть проходит вверх через пластинку и окуляр (7) в глаз наблюдателя.

При таком устройстве опак-иллюминатора используется полное отверстие объектива; освещение поля зрения микроскопа получается совершенно равномерным. Яркость картины сравнительно с призматическим опак-иллюминатором здесь меньше, так как используется не более 25% первоначальной силы света.

Преимущество пластинкового опак-иллюминатора перед призматическим заключается в равномерности освещения (важно для фотографирования) и возможности работать при полном отверстии объектива, благодаря чему используется вся его апертура, что позволяет различать мельчайшие элементы структуры. Недостаток описываемого опак-иллюминатора — значительная потеря света и необходимость поэтому пользоваться более сильным освещением.

На практике пластинковый опак-иллюминатор применяется как при самых слабых объективах (собственное увеличение 3,7×), что позволяет избежать резких теневых кайм, так и при сильных объективах (особенно масляная иммерсия 95×), что позволяет различать мельчайшие зерна и тончайшие детали структуры.

Опак-иллюминатор призматического типа системы И. С. Волынского и В. В. Аршинова имеет постоянный осветитель и поляризационное приспособление (рис. 5). Последнее представляет собой одновременно поляризатор (1) и анализатор (2) из поляризующей свет пленки (поляроид), а также светофильтр дневного света (3). Названные части смонтированы в виде единого зонального диска, помещаемого между отклоняющей призмой (4) и объективом (5). Ширина каждой из трех зон диска точно соответствует размерам отклоняющей призмы. Кольцевой поляризатор этого диска ориентирован относительно центрального круглого анализатора так, чтобы направления колебаний в них были взаимно перпендикулярны. Поляризационный диск может свободно вращаться в своей плоскости и продольно перемещаться в ней в ограниченных пределах.

Такое устройство позволяет производить наблюдения, отвечающие как скрещенным николям (рис. 7, а), так и одному николю со светофильтром дневного света (рис. 7, б).

Вращение диска заменяет вращение столика микроскопа и исключает, следовательно, необходимость его центрировки.

Выгодное преимущество описанного опак-иллюминатора Волынского и Аршинова заключается в возможности приме-

нять его с простыми студенческими и биологическими микроскопами, имеющими невращающиеся столики.

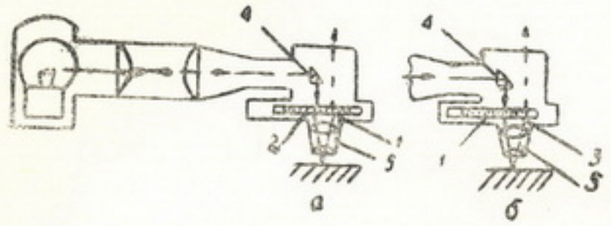


Рис. 7. Схема устройства поляризационного опак-иллюминатора системы Волынского и Аршинова.

1 — поляризатор; 2 — анализатор; 3 — светофильтр дневного света; 4 — отклоняющая призма; 5 — объектив.

4. ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Наблюдения в минераграфических микроскопах с опак-иллюминаторами обычно производятся при искусственном свете; дневной свет слишком слаб, и им пользуются только в случае необходимости.

Принципиальная оптическая схема осветителя включает следующие элементы (рис. 8):

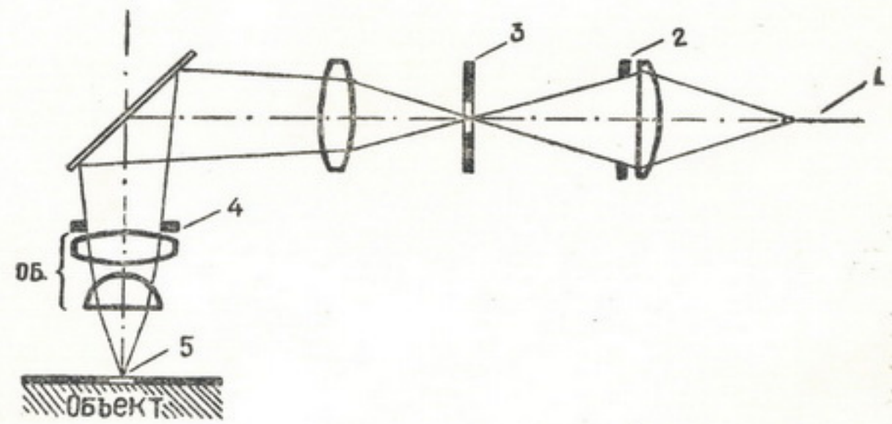


Рис. 8. Схема устройства осветителя к опак-иллюминатору (по И. С. Волынскому).

1 — источник света; 2 — апертурная диафрагма; 3 — диафрагма поля зрения; 4 — проекция апертурной диафрагмы; 5 — проекция диафрагмы поля зрения; Об — объектив.

1. Источник света, представляющий обычную полуваттную или лучше низковольтную лампочку накаливания.

2. Апертурную диафрагму, которая помещается за источником света и регулирует освещенность объекта путем изменения отверстного угла конуса освещающих лучей. Апертурная диафрагма предохраняет изображение от световой вуали, которая создается лучами, отраженными от линз объектива, и покрывает все поле зрения. Применять эту диафрагму необходимо при употреблении опак-иллюминаторов при наблюдении с сильными объективами и при микрофотографировании.

3. Диафрагму поля зрения, которая помещена в тубусе опак-иллюминатора и служит для ограничения поля зрения. При закрытой диафрагме освещенность объекта не изменяется, но изображение его становится контрастнее. Диафрагму поля зрения включают при рассмотрении мелких зерен или тончайших срастаний и при наблюдении эффекта анизотропии.

Кроме источников света, апертурной диафрагмы и диафрагмы поля зрения, осветитель имеет одну или две линзы.

Осветители для минераграфических микроскопов бывают двух родов: независимые от опак-иллюминатора и постоянно связанные с ними.

Простейший независимый осветитель представляет собой полуваттную лампу накаливания мощностью 50—100 вт, ввинченную в настольную лампу (удобны лампы с гибкими стержнями, позволяющими регулировать высоту). От боковых лучей лампы следует оградиться каким-либо экраном, а перед отверстием опак-иллюминатора поместить тонкое матовое стекло.

Хорошие независимые осветители, выпущенные в Ленинграде под маркой ОИ-7 (рис. 9), служат для освещения препаратов под микроскопом как в отраженном, так и в проходящем свете. Осветитель состоит из двухлинзового конденсатора, ирисовой диафрагмы и зажимного устройства, при помощи которого корпус лампы закрепляется в вертикальной колонке на нужной высоте и под известным углом.

Источником света служит специальная лампочка в 8 вольт, 20 ватт, питаемая от понижающего трансформатора. Лампочка может перемещаться в осветителе. При тщательной установке лампочки и при надлежащем открытии отверстия диафрагмы осветитель дает очень сильный и ровный свет, обеспечивающий отчетливое наблюдение всех оптических явлений в минераграфическом микроскопе. С успехом этот осветитель может служить для микрофотографирования.

Рентгеноспектральной мастерской в г. Свердловске выпускались хорошие независимые осветители (рис. 10), состоящие из сильной низковольтной лампы накаливания и трансформатора. Лампа помещена в металлическую оправу и может передвигаться вверх и вниз по стержню и наклоняться под любыми углами. Осветитель снабжен линзой и желтым светофильтром. При хорошей установке осветитель дает ровный и

очень сильный свет, обеспечивающий наблюдение при скрещенных николях даже очень слабого эффекта анизотропии.

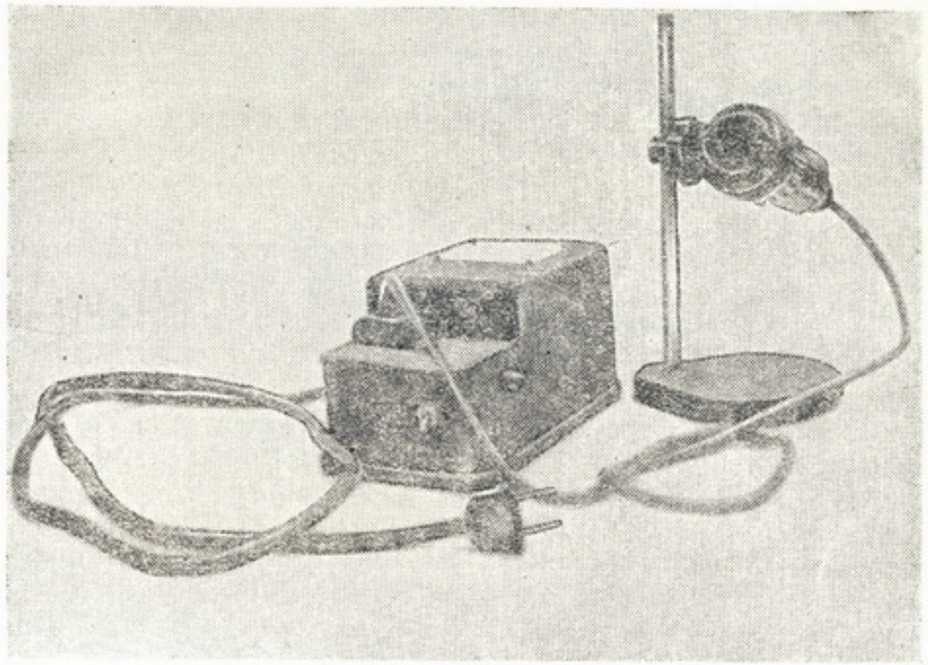


Рис. 9. Независимый осветитель к микроскопу типа ОИ-7 с трансформатором. 0,17 натуральной величины.

При пользовании независимыми осветителями фокусировка микроскопа при перемене объективов или полированных шлифов производится перемещением столика микроскопа, а не тубуса: при перемещении последнего освещение будет нарушено, и его придется регулировать вновь.

При пользовании осветителями, постоянно связанными с опак-иллюминаторами, освещение все время постоянное и не зависит от положения микроскопа и высоты его тубуса. В этих осветителях маленькая, но достаточно сильная низковольтная лампочка накаливания помещается в конце удлиненного патрона, включающего диафрагмы, линзы и николь опак-иллюминатора (например, осветитель у микроскопа МП-5, рис. 3).

Почти все последние модели опак-иллюминаторов снабжены постоянно связанными осветителями.

Свет обычной электролампы придает всем минералам, рассматриваемым под микроскопом, желтоватый оттенок, что затрудняет установление настоящего их цвета. Поэтому при работе с электролампой рекомендуется употреблять синий светофильтр (светофильтр дневного света) — синее стеклышко, которое помещается в осветитель опак-иллюминатора (рис. 3). И. С. Волынский рекомендует помещать это стеклышко в свободное отверстие анализатора, чем достигается автоматическое выключение светофильтра при наблюдениях в поляризованном свете, когда он является лишним.

Иногда при микрофотографировании употребляют вольтову дугу, надобность в которой отпадает при работе с описанным выше осветителем (рис. 9, 10).

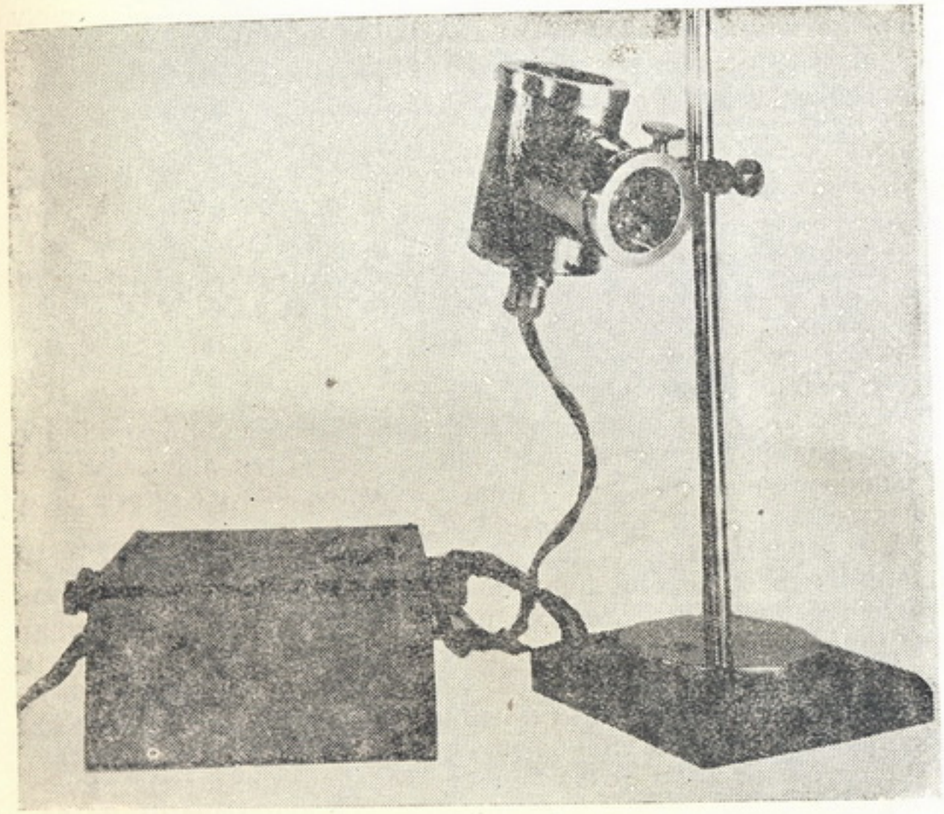


Рис. 10. Осветитель с трансформатором. 0,2 натуральной величины.

5. ОБЪЕКТИВЫ И ОКУЛЯРЫ

Каждый объектив представляет собой систему линз, вделанных в латунную оправу. Передняя линза, дающая изображение, называется фронтальной. Остальные линзы объектива служат для устранения оптических недостатков изображения и носят название коррекционных.

Простая двояковыпуклая линза имеет ряд оптических недостатков: сферическую и хроматическую аберрации, астигматизм, кому, дисторсию и др. Особенно на качество объектива

влияет хроматическая аберрация. Это явление обусловлено дисперсией света, т. е. разложением белого луча света по выходе из призмы на ряд цветных лучей. Эти цветные лучи не собираются в одной точке. Сильнее всех будут преломляться коротковолновые фиолетовые лучи, затем лучи других частей спектра и наиболее слабо — длинноволновые красные. Вследствие этого изображение светящейся точки получается в виде светлых кружков с цветными каемками.

Явление сферической аберрации, как известно, заключается в том, что краевые лучи, падающие на линзу, имеют точку схода на ином расстоянии от линзы, чем центральные лучи. В зависимости от того, в какой мере устранены указанные оптические дефекты, различают две основные системы объективов: ахромат и апохромат.

Лучи света по выходе из обыкновенной линзы (простейший объектив-монокль) сходятся в трех точках и образуют три пучка лучей: фиолетовые (ф), желтые (ж) и красные (к). В ахромате сведены в одну точку желтые и красные лучи (ж + к), а в апохромате совмещены все три рода лучей (ф + ж + к).

Кроме этих основных систем, различают еще флюоритную систему объективов, или полуапохромат.

Ахроматы пригодны для большинства практических работ. Для фотографирования они применяются лишь при небольших увеличениях, при сильных увеличениях их оптические дефекты выступают слишком заметно.

Апохроматы, обладающие высокими качествами благодаря их совершенной коррекции, дают чистые и яркие изображения, пригодны для всех практических работ и особенно для микрофотографирования. Высококачественное изображение эти объективы дают только в комбинации с особыми окулярами: компенсационными и перипланатическими (см. ниже). Конструкция апохроматов очень сложна, стоимость их высокая.

Флюоритные системы (полуапохроматы) имеют не очень сложную конструкцию, сходную с ахроматами, но дают очень хорошие изображения. Обычно применяются при сильных увеличениях.

Объективы-апохроматы, а также флюоритные системы обозначаются длиной их фокусного расстояния в миллиметрах.

Объективы делятся на сухие и иммерсионные. В сухих объективах между фронтальной линзой и препаратом находится воздух, а в иммерсионных — вода или масло. Капля кедрового масла (или воды), имеющая больший показатель преломления, чем воздух, концентрирует световые лучи и позволяет получать более светлое и ясное изображение. Иммерсионные объективы в минераграфических исследованиях имеют следующее значение:

а) дают сильные увеличения микроскопа (до 1400 раз);

б) позволяют лучше наблюдать явления внутренних рефлексов;

в) облегчают изучение явлений анизотропии и двуотражения;

г) позволяют наблюдать за изменением цвета и отражательной способности минералов при погружении их в масло.

Для характеристики оптической работоспособности объективов большое значение имеет апертура.

Нумерическая апертура выражается следующей простой формулой:

$$a = n \cdot \sin \varphi$$

где

a — апертура;
n — показатель преломления среды;
φ — половина отверстного угла линзы (угол при вершине конуса лучей, падающих из одной точки на фронтальную линзу объектива).

Чем больше апертура объектива, тем изображение имеет меньшую глубину фокуса, но тем выше способность разрешения (т. е. способность различать детали).

Из приведенной формулы видно, что апертура может быть повышена путем увеличения значений n и φ. Предельное значение для угла φ равно 90° ($\sin 90° = 1$). Показатель преломления n для различных сред будет: для воздуха $n = 1$, для воды $n = 1{,}33$, для кедрового масла $n = 1{,}514$.

Таким образом, предельное значение апертуры для воздушной системы 1,0, а для иммерсионной масляной — 1,5.

Увеличение микроскопа равно увеличению объектива, умноженному на увеличение окуляра. Например, при объективе 9× и окуляре 8× увеличение микроскопа будет $9 \times 8 = 72$.

В таблице 1 приведены собственные увеличения различных объективов и окуляров.

Разрешающая способность микроскопа, т. е. способность наблюдать мельчайшие детали, определяется следующей формулой:

$$l = \frac{\lambda}{a}$$

где

l — размер минимальной частицы, видимой под микроскопом;
λ — длина волны света, в котором производится наблюдение;
a — апертура объектива.

Подставив для λ в эту формулу 0,589 μ (желтый свет) и для a — 1,4 (самая высокая апертура), получим:

$$l = \frac{0.589}{1{,}4} = 0{,}4\ \mu$$

Таким образом, минимальная частица, которую может различать глаз в микроскоп, имеет размер в 0,4 микрона. Микро-

фотографирование в ультрафиолетовом свете ($\lambda = 0{,}270$ μ) позволяет выявлять минимальные частицы в 0,2 микрона.

Окуляры Гюйгенса имеют простую конструкцию и употребляются с объективами-ахроматами. Эти окуляры обозначаются обычно римскими и арабскими цифрами (по степени даваемого ими увеличения: 3×, 5× и т. д.).

Для объективов апохроматов и сильных флюоритных применяются компенсационные окуляры; они обозначаются четными цифрами (6, 8, 12). Для той же цели выпускаются перипланатические окуляры, которые при сильных объективах дают плоское изображение. Линзы этих окуляров склеены из нескольких частей. Ортоскопические окуляры служат для микрофотографирования и проекции и употребляются при больших растяжениях камеры.

Ниже приводятся сведения о поляризационных ахроматических объективах завода «Русские самоцветы», рассчитанных на наблюдение непокрытого объекта и на длину тубуса 190 мм (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Объективы и окуляры	Собственное увеличение	Апертура	Оправа	Характер исследования
Объективы сухой системы	3,7	0,11	Длинная	Обзор руды; измерение твердости иглами; травление.
	9	0,20	Короткая	Определение оптических признаков.
	21	0,40	„	Изучение мелких зерен.
	40	0,65	„	Изучение тонкозернистых руд; определение твердости по светлой линии.
	62	0,85	„	
Объективы масляной иммерсии	12	0,25	Длинная	Наблюдение внутренних рефлексов и двуотражения в масле. Наблюдение тончайших срастаний.
	22	0,70	„	
	95	1,25	„	
Окуляры Гюйгенса с микрометренной шкалой	6	—	—	Измерение зерен и количественный минералогический анализ.
Окуляры Гюйгенса с крестом нитей	8	—	—	Всевозможные наблюдения.
Окуляры ортоскопические с микрометренной шкалой	12,5	—	—	Микрофотографирование и проекция.
Окуляры ортоскопические с крестом нитей	17	—	—	Наблюдение тонких срастаний.

В таблице 2 приводится краткая характеристика оптики к микроскопу МИН-6.

Объективы к нему, системы ахромат, рассчитаны для препаратов без покровных стекол, оптика их не имеет натяжений и просветлена.

В дальнейшем изложении объективы будут иметь обозначения как по кратности их собственного увеличения (3,7×, 9× и т. д.), что характерно для отечественных объективов, так и по их номерам (№ 1, № 3 и т. д.), что относится к объективам Лейтца.

Таблица 2

Объективы и окуляры	Собственное увеличение	Апертура	Характер исследования
Объективы сухой системы	4,2	0,12	Обзор руды; измерение твердости иглами; травление.
	6,0	0,17	
	10,0	0,30	Определение оптических признаков; изучение среднезернистых руд.
	35,3	0,75	Изучение мелкозернистых руд; определение твердости по светлой линии.
Объективы масляной иммерсии	23,5	0,65	Наблюдение внутренних рефлексов и двуотражения в масле. Изучение тонкозернистых руд.
	50,4	0,25	
Окуляры:			
Гюйгенса	7×	—	Применяются с объективами малого и среднего увеличения.
Гюйгенса	10×	—	
Симметричные	15×	—	Применяются с объективами сильного увеличения.
Компенсационные	15×	—	

УПРАЖНЕНИЯ

Установка микроскопа

Сначала необходимо проверить по описи, все ли принадлежности микроскопа на месте и в порядке. После этого можно перейти к установке микроскопа, которая производится в такой последовательности:

1. Устанавливаются требуемые окуляр (8× или 6×) и объектив, обычно ахромат 9× или 12× (№ 3).

2. На предметный столик устанавливается полированный шлиф и закрепляется стальными клеммами.

3. При работе с масляной иммерсией тубус микроскопа остается в вертикальном положении; обычно же его удобнее нагнуть к себе под углом 60—45°.

4. Источник света (электрическая лампа) располагается так, чтобы нить накала была против отверстия опак-иллюминатора. Устанавливается экран, отгораживающий боковые лучи, падающие на полированный шлиф и в глаза.

5. Наводится на фокус микроскоп путем поднятия и опускания предметного столика. Если для наводки приходится передвигать тубус микроскопа, то после этого нужно проверить высоту источника света.

Затем переходят к установке призматического опак-иллюминатора (см. рис. 2 и 3).

6. Диафрагма (3) опак-иллюминатора закрывается до минимального отверстия.

7. Качанием стержня (1) призма опак-иллюминатора ставится так, чтобы световое пятно пришлось на середину поля зрения микроскопа.

8. Движением линзочки опак-иллюминатора (2) вперед и назад находятся наиболее резкие контуры светового пятна.

9. Диафрагма (3) открывается до отверстия, соответствующего ширине поля зрения микроскопа.

В практике часто не обращают внимания на установку опак-иллюминатора (операция 6—9) и довольствуются неровным или слабым освещением, что снижает качество работы. Нужно уметь правильно, быстро и точно устанавливать микроскоп. Положение призмы, линзы и диафрагмы опак-иллюминатора необходимо проверять и в процессе работы.

Для работы с пластинковым опак-иллюминатором нужно объектив 9× (№ 3) заменить более слабым объективом 3,7× (№ 1) и сравнить изображения, видимые при пластинковом и призматическом опак-иллюминаторах. В первом случае рельеф будет казаться менее резким. После этого наблюдение повторяется с более сильным объективом — 40× или 60× (№ 5 или № 6) и опять сравниваются видимые изображения. При пластинковом опак-иллюминаторе изображение будет менее яркое, но зато равномерное.

Ознакомление с набором объективов и окуляров

При ознакомлении с набором объективов и окуляров, имеющихся при микроскопе, следует: разобрать все надписи, помещенные на оправах; усвоить, в каких случаях применяются те или иные объективы и окуляры; запомнить наиболее употребительные в работе объективы — 9× (№ 3), 3,7× (№ 1), 40× (№ 6).

Перед употреблением объективов или окуляров их линзы должны протираться чистой ваткой или марлей, которая должна храниться в закрытой банке; вытирать оптические части микроскопа платками или тряпочками нельзя.

Далее рекомендуется убедиться в том, что сильные объективы не могут применяться для изучения тонких шлифов в проходящем свете.

Для этого нужно просмотреть под микроскопом при объективах 12×, 9× (№ 3) и 60×, 40× (№ 6а) полированный шлиф в отраженном свете и тонкий шлиф в проходящем свете. При пользовании минераграфическим микроскопом как петрографическим следует призму опак-иллюминатора заменить стеклянной пластинкой и вынуть в центре столика микроскопа металлический диск.

Масляная иммерсия

Наиболее употребительные объективы из масляно-иммерсионных будут 12× и 95× завода «Русские самоцветы» и 1/7а, 1/12а Лейтца. Перед работой нужно проверить с помощью ручного пресса монтаж полированного шлифа; его верхняя поверхность должна быть строго параллельна стеклу, на котором он прикреплен, в противном случае изображение получится неясным.

Для выполнения работы нужно: 1) микроскоп установить вертикально; 2) найти при обычном объективе 9× (№ 3) сюжет для наблюдения; 3) наложить каплю кедрового масла размером 3—5 мм на фронтальную линзу иммерсионного объектива; 4) поставить на место иммерсионный объектив; 5) осторожно опускать тубус до тех пор, пока объектив не коснется полированного шлифа, и затем немного приподнять его микрометренным винтом до появления изображения; 6) призму опак-иллюминатора сильно задиафрагмировать или заменить ее стеклянной пластинкой.

Рекомендуется рассмотреть с масляной иммерсией титано-магнетит. При среднем увеличении (объектив 12×, 22×, 9× или № 3) в нем магнетит и ильменит почти не отличимы и обычно не заметны мелкие пластиночки гематита.

При сильном увеличении с масляной иммерсией в титано-магнетите не трудно различить четыре минерала:

1) гематит — мелкие пластиночки, обычно включенные в магнетите и развивающиеся за счет окисления последнего; цвет серовато-белый;

2) магнетит — сравнительно крупные зерна неправильной формы; цвет серый со слабо красноватым оттенком;

3) ильменит — сходный с магнетитом по форме и по размерам; отличается от него серым с буровато-красным оттенком цветом;

4) нерудные минералы (хлорит) — почти совершенно черные; иногда наблюдаются еще очень мелкие светлые желтые зернышки сульфидов.

При работе следует делать в тетрадь зарисовки видимого под микроскопом сюжета. По окончании работы объектив и полированный шлиф нужно вытереть чистой марлей или ваткой, слегка смоченной в бензине, а затем сухой.

ГЛАВА II

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ РУД

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Препарат для микроскопического исследования в отраженном свете обычно называется полированным шлифом, хотя нередко его называют также «аншлиф», «полировка» и даже «шлиф».

В настоящей работе принят наиболее распространенный термин — полированный шлиф.

Изготовление хороших по качеству препаратов имеет большое значение для работы. В плохих полированных шлифах затруднительно наблюдать цвет и поляризацию минералов, суждение о результатах травления ненадежно и возможны ошибки при изучении структурных особенностей руд. Хороший полированный шлиф должен обладать следующими свойствами:

а) прочность и плотность полированной поверхности должна быть достаточной; недопустимо наличие открытых трещинок и пор, а также выкрашивание отдельных зерен;

б) поверхность полированного шлифа должна быть совершенно плоской, без завалов краев и искривлений;

в) рудные минералы должны выглядеть под микроскопом гладкими и зеркальными, на их поверхности должны отсутствовать выбоины, штрихи и резкие царапины; шероховатая поверхность рудных минералов — показатель их недостаточной доводки и полировки;

г) полированная поверхность не должна иметь резко выраженного рельефа, т. е. твердые рудные минералы не должны значительно выступать (возвышаться) над мягкими; в противном случае вокруг более твердого минерала будет наблюдаться резкая и широкая теневая кайма, не позволяющая изучать границу между твердыми и мягкими минералами;

д) форма и размеры полированного шлифа должны быть таковы, чтобы он свободно помещался на столике микроскопа

и удобно монтировался. Опыт показывает, что наиболее удобны прямоугольные полированные шлифы размерами от $20 \times 15 \times 10$ до $25 \times 20 \times 12$ мм.

2. АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ

Аппаратура

Основная аппаратура это шлифовальный, полировальный и резальный станки.

Шлифовальный станок представляет из себя неподвижную чашку, внутри которой вращается на вертикальной оси диск из тонкозернистого чугуна. Диаметр диска 20—25 см, толщина его 2—2,5 см. Скорость вращения диска 400—600 об/мин.

Полировальный станок отличается от шлифовального большей скоростью вращения диска (до 1000 об/мин) и меньшим его диаметром ($d = 12—15$ см). Кроме того, на диск иногда надевается металлическое кольцо для натягивания и закрепления полировального сукна.

Резальный станок состоит из тонкого (жестяного) диска, вращающегося со скоростью 400 об/мин. Диск погружается в корытце с грубым абразивом (№ 120—200), разведенным в воде. Абразив из корытца время от времени наносится на круг с помощью малярной кисти.

Шлифовальные материалы

В качестве шлифовального материала употребляется или искусственный электрокорунд, или естественный корунд, или наждак — корунд с примесью окислов железа и других минералов. Наиболее ходовой из них естественный корунд.

Шлифовальные материалы разделяются по крупности на ряд классов, каждый из которых имеет свое применение. Гранулометрическая характеристика шлифовальных материалов представлена в таблице 3.

Полировальные материалы

Полировальными материалами служат окись хрома, окись алюминия, окись железа и магнезия.

Окись хрома (зеленый крокус) — наиболее распространенный полировальный порошок. Имеется в продаже, но может быть изготовлен и самостоятельно.

Берут 3 части серы и 1 часть двухромовокислого калия, перемешивают и смесь сжигают на железном листе; комки растирают и просеивают через сито 350 меш.

Таблица 3

Гранулометрическая характеристика шлифовальных материалов

Старая классификация (минутники) х)	Новое наименование	Новые номера	Размер частиц в микронах (μ)	Примечание
Грубые				
0,5′	Шлифовальные порошки	120	125	Для распиловки или обдирки образцов. Для подготовки и исправления стеклянных плит
3′		200	75	
5′		300	52—62	
Мелкие				
15′	Микрошлифовальные порошки	м28	20—28	Для шлифовки на вращающемся диске
30′		м20	14—20	
Тонкие				
60′	Микрошлифовальные порошки	м12	10—14	Для доводки на стеклянных плитах
120′		м10	7—10	
240′		м7	5—7	

х) Минутниками называются абразивы известной крупности, определяющейся временем падения зерен в минутах в столбе воды высотой 1 м. Например, фракция из зерен, упавших при взмучивании на дно сосуда через 3 минуты, будет 3′, через 10 минут — 10′ и т. д.

Можно также получить окись хрома из двухромовокислого аммония, который насыпают на дно высокого фарфорового стакана и нагревают до возгона.

Окись алюминия — высококачественный полировальный материал. Изготовляется путем прокаливания при T = 1100 — 1300° алюмо-аммиачных квасцов в графитовом или шамотном тигле.

Окись железа (красный крокус) употребляется только для предварительного полирования. Изготовляется в двух стеклянных сосудах путем растворения порошь в горячей воде 126 г щавелевой кислоты и 278 г железного купороса. Растворы фильтруют и по охлаждении смешивают. Выпавший осадок FeC_2O_4 прокаливают под тягой и получают окись железа.

Магнезия — тончайший белый порошок окиси магния, употребляемый для полирования мягких минералов. Имеется в продаже.

3. ВАЖНЕЙШИЕ ОПЕРАЦИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ

Основными операциями при изготовлении полированного шлифа являются шлифовка и полировка. Различные стадии шлифовки представляют собой последовательное истирание образца на плоскости абразивами, крупность которых последовательно уменьшается. В результате шероховатость поверхности образца последовательно уменьшается (рис. 11).

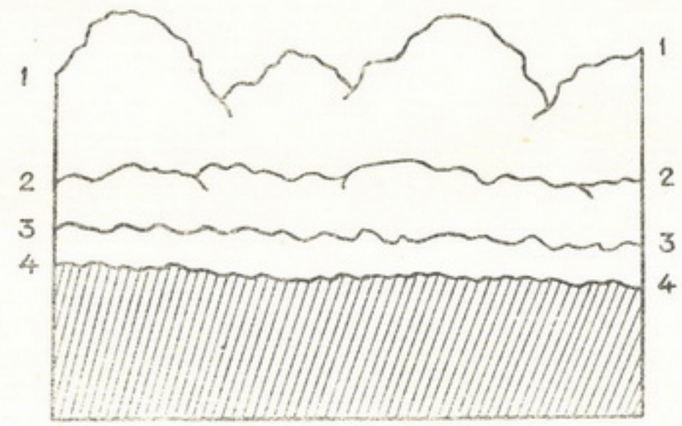


Рис. 11. Схема постепенного сглаживания профиля шлифа в различных стадиях шлифования (1, 2, 3, 4).
(По И. С. Волынскому).

Окончательное выравнивание поверхности образца достигается путем полировки, в процессе которой основная роль принадлежит явлениям пластической деформации.

При процессе шлифовки образца руды, состоящей из минералов разной твердости, рельеф не образуется, а в процессе полировки на сукнах рельеф обязательно возникает.

Приемы изготовления полированных шлифов руд различны, но все они в основном сводятся к следующим четырем производственным операциям: а) подготовке руды, б) шлифовке, в) доводке и г) полировке.

Подготовка руды заключается в проклейке или цементации для придания ей необходимой прочности и плотности. Образцы достаточно плотной и крепкой руды могут быть подвергнуты шлифовке без предварительной подготовки.

Сыпучие руды и продукты обогащения нередко заделываются вместе с цементом в металлические или толстостенные стеклянные формочки.

Хорошие полированные шлифы получаются из руды, которая пропитана бакелитом. Для этой цели кусочек руды (или сыпучую массу в формочке) сначала помещают в спиртово-эфирный раствор бакелита на несколько часов, после чего су-

шат в течение суток в электропечи. Простой и быстрый метод, дающий удовлетворительные результаты, — это цементация или так называемая проварка руды в канифоли. Для этого находящуюся в фарфоровой чашке канифоль растапливают в вытяжном шкафу на слабом огне, не доводя до кипения, и затем в нее погружают образец, который по прошествии некоторого времени извлекают оттуда щипцами. Сыпучие массы легко могут быть сцементированы расплавленным сургучом или лучше бакелитом.

Иногда приходится пользоваться только холодными цементами (гипс, зубной цемент), так как нагревание некоторых руд может повести к перекристаллизации и изменению их состава.

Шлифовка производится для придания обрабатываемому кусочку руды формы и для выравнивания на нем площадки. Эту операцию производят на чугунном круге, вращающемся со скоростью 300—400 и до 600 об/мин. На круг подается мелкий наждак — 15—30-минутный (размер зерен 30 — 15 μ), разведенный водой до консистенции жидкой кашицы. Все острые углы и выступы затачиваются, чтобы при полировке они не рвали сукно. По окончании шлифовки обрабатываемый кусочек промывают в воде, чтобы не занести более крупного абразивного материала в последующие стадии работы с материалом более мелким.

Доводка — подготовка поверхности образца для полирования. Эту операцию выполняют вручную на толстом зеркальном стекле при помощи очень мелкого наждака-минутника (60-, 120- и 240-минутного), смоченного водой. Предварительно пористые и неплотные образцы вторично проваривают ся. Доводку осуществляют с помощью трех толстых зеркальных стекол размером 24 × 18 см, которые хранятся в футлярах с крышками, что предохраняет их от пыли и загрязнения.

На первом стекле производят работу с 60-минутником (размер зерен 10—14 μ), на втором — с 120-минутником (размер зерен 7—10 μ) и на третьем с 240-минутником (размер зерен 5—7 μ). При переходе от одной операции к другой мастер должен тщательно вымыть образец и руки.

Доводку можно производить также на тонкозернистой шкурке № 00—000.

Полировка производится на круге, обтянутом сукном и вращающемся со скоростью 800—1000 об/мин. Сукно должно быть высокого качества — плотное и с небольшим ворсом; хорошие результаты получаются на так называемом бильярдном сукне.

Полировальным материалом для руд мягких или средней твердости служит магнезия или окись алюминия, а для твер-

дых — красный или зеленый крокус[1]. Все эти полировальные материалы употребляются с водой. Время полирования не должно превышать 10—20 мин.; полирование более получаса способствует образованию рельефа. Необходимость длительного полирования указывает на недостаточную подготовку полируемой поверхности при доводке. Полирование руд хорошо производить с пастой ГОИ, которая применяется для полировки металлов. Опыты автора по применению этой пасты при полировке руд показали хорошие результаты. Окончательную полировку И. С. Волынский рекомендует производить с магнезией на медленно вращающемся круге, обтянутом бильярдным сукном. Магнезию наносят на мокрый круг и растирают на нем пальцем. Хранить магнезию нужно в закрытых банках, а сукно и круг после работы с магнезией сразу же тщательно отмывать, так как образующиеся твердые карбонаты будут потом царапать полируемый образец.

В процессе полировки поверхность изготовляемого шлифа рекомендуется периодически проверять под микроскопом.

Готовый полированный шлиф монтируют на предметном стекле при помощи разогретого воска (вместо воска можно пользоваться парафином, пластилином, мастикой, канифолью, сургучом) и ручным прессом придают верхней поверхности полированного шлифа горизонтальное положение.

Ручной пресс представляет собой металлическую отливку с гладкой горизонтальной нижней плоскостью, над которой движется вверх и вниз плоская шайба, прикрепленная к стержню (рис. 3). На свободном конце стержня имеется закругленная головка для нажатия рукой; стержень с шайбой удерживаются в верхнем положении пружиной. Ручной пресс позволяет придать полированной поверхности препарата параллельное положение со стеклом, на котором он монтирован, что в свою очередь обеспечивает перпендикулярное положение полированной поверхности к оси микроскопа.

Размеры предметных стекол 50 × 25 мм. Края стекол закругляются, часть их поверхности делается матовой для надписей тушью. То и другое осуществляется на шлифовальном круге с наждаком. Смонтированные полированные шлифы нужно хранить в деревянных или картонных коробках размерами 25×12,5×2,5 см, разделенных перегородками на девять гнезд.

Вообще универсального способа полировки минералов и руд не существует, необходимо учитывать особенности обрабатываемой руды.

---

[1] Зеленый крокус легко изготовить самому: в пробирке нагревают двухромовокислый аммоний, в результате возгона которого и получается крокус — очень тонкий зеленый порошок окиси хрома.

Многие рудные минералы на воздухе довольно быстро окисляются, поэтому полированные шлифы тускнеют. Полированная поверхность загрязняется от прикосновения пальцев, пыли, следов реактивов или иммерсионного масла. Поэтому перед работой полированный шлиф необходимо каждый раз тщательно протирать на дощечке, обтянутой сукном или замшей, или подполировывать на круге с крокусом либо с магнезией.

4. ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ (по И. Волынскому)

Очень мягкие минералы — графит, молибденит, аурипигмент, реальгар, халькозин, аргентит, гессит и др.

Рекомендуется два способа:

а) полирование на очень тонкой материи (сатин или шелк), натянутой на стальной отполированный диск. С шелком употребляется окись хрома;

б) доводка и полирование на смоляных дисках (метод М. Л. Эрмана).

Для изготовления смоляных дисков употребляют горячую смесь из канифоли и вара (1 : 2 летом и 1 : 3 зимой). Слой смолы в 2—3 мм наносится на слегка подогретый металлический диск и выравнивается на нем гладким стеклом.

Для доводки наносят на один смоляной диск незначительное количество тончайшего минутника, а для полирования на другой диск—окиси хрома. Доводка и полирование выполняются вручную или при очень медленном вращении дисков.

Твердые минералы — пирит, марказит, арсенопирит, хромит, магнетит и др.

После доводки на стекле их рекомендуется полировать вручную, на стекле же с окисью хрома. После этого производится окончательное полирование с окисью хрома на смоляном диске.

Самородные металлы (медь, золото, серебро), если они встречаются совместно с твердыми минералами, рекомендуется полировать на смоляных дисках.

Продукты механического обогащения руд полируются обычным способом, но предварительно рыхлые материалы цементируются одним из следующих способов:

а) в расплавленной канифоли — стеклянное колечко ($d = 15$—20 мм) приклеивается к стеклу. В полученную формочку помещают материал и заливают расплавленной канифолью (можно шеллаком или канадским бальзамом);

б) цементация холодными растворами смол в бензине или бензоле.

Недостаток — длительная сушка в течение нескольких дней.

в) цементация зубным цементом, который представляет смесь цинкового или силикатного порошка с фосфорной кислотой. Это очень хороший, крепкий, не дающий рельефа при полировании цемент.

5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ БЕЗРЕЛЬЕФНЫХ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ

Полированные шлифы, изготовленные обычными методами, не обладают совершенно гладкими поверхностями. Обычно под микроскопом на поверхности минералов (особенно на твердых) бывают заметны царапинки и ямки; твердые минералы кажутся выступающими над мягкими, границы между этими минералами иногда скрыты теневыми каймами. Эти каймы затрудняют изучение мелких включений мягких минералов в твердых.

Основные причины несовершенства рудных полированных шлифов, установленные Вандервильтом (1928), следующие:

1. Вследствие применения крупнозернистых абразивных материалов в начальных стадиях работы подповерхностный слой образца механически повреждается на довольно значительную глубину. При последующих процессах доводки и полировки этот поврежденный слой не удаляется, в нем остаются трещины и выбоинки. Избежать этих дефектов в полированных шлифах можно, если подготовлять горизонтальную площадку образца путем распиливания его алмазной пилой и не применять для шлифовки абразивов крупнее 0,01 мм в диаметре.

2. Применение сукон (и тканей) при полировке обусловливает резкий рельеф между мягкими и твердыми минералами; частички полировального материала катаются по поверхности образца и сильнее эродируют мягкие минералы. Поэтому вместо кругов, обтянутых сукном, пользуются медными и свинцовыми кругами, имеющими концентрические пазы шириной 1,5 мм. Тонкий абразивный материал, зацементированный в массе мягкого металла медленно вращающегося (60 об/ мин) круга, срезает постепенно, слой за слоем, поверхность образца. При этом и твердые и мягкие минералы срезаются равномерно, и полированная поверхность руды получается без видимого рельефа и весьма гладкой.

Методика изготовления безрельефных полированных шлифов разработана Вандервильтом в 1928 году на основе его весьма обстоятельных специальных исследований (Vanderwilt G. Improvements in the polishing of ores. Econ. Geol. vol. 23, 1928).

В СССР первые опыты по изготовлению безрельефных полированных шлифов были произведены в Механобре (Ленинград) в 1931 г. оптиком-механиком П. Г. Яненко.

В 1939 г. И. Н. Масленицкий внес в станок Яненко некоторые конструктивные изменения и получил на нем высококачественные безрельефные полированные шлифы из колчеданных золотосодержащих руд.

В 1941 г. в Горно-геологическом институте Уральского филиала Академии наук была начата работа по изучению и освоению метода изготовления безрельефных полированных шлифов.

В результате УФАНом был изготовлен с некоторыми конструктивными изменениями автоматический полировальный станок Яненко и освоено изготовление на нем высококачественных безрельефных полированных шлифов.

Этот станок смонтирован на деревянном столике размером 80 × 50 × 90 см и имеет следующие части (рис. 12):

1. Электрический мотор (на снимке не виден) мощностью 0,52 квт для приведения в движение головки и полировального круга;

2. Головку (1) с шестью пружинными зажимами, вращающуюся вокруг вертикальной оси (завинчиванием колпака (2) головки осуществляется общий нажим на полированные шлифы с силой 800—100 г на каждый);

3. Полировальные круги (3) — один медный и три свинцовых, каждый из которых может соединяться с вертикальной осью вращения.

Вращение головки и круга производится против часовой стрелки со скоростью головки 320 и круга 205 об/мин.

Небольшие кусочки руды предварительно обрабатываются на чугунном круге с мелким наждаком (30—60-минутником), а затем доводятся вручную на стекле с 120—240-минутником. Затем образец закладывается в нагретую до 160° прессформу, засыпается бакелитом и сжимается. Через некоторое время из прессформы выталкивается цилиндрический брикет диаметром 20 мм. Полученный брикет вновь доводят с тонким минутником и закругляют его острые края.

Первая операция на станке заключается в шлифовке брикета на медном круге с абразивной пастой крупностью в 7 μ через каждые 10—15 мин. на круг добавляется несколько капель керосина.

Вторая операция — это обработка брикета на первом свинцовом круге с абразивной пастой крупностью 2,5—3 μ, смачиваемой через 20 минут тремя каплями керосина. Процесс полирования здесь длится 2—3 часа.

Третья операция — обработка на втором свинцовом круге с пастой крупностью не более 1 μ; процесс аналогичен предыдущим и длится 2—3 часа.

Четвертая операция — окончательная доводка на третьем свинцовом круге с пастой из свежепрокаленной магнезии в течение 2—3 часов.

Для сокращения времени третью и четвертую операции можно заменить полированием на сукне с крокусом, что создаст, конечно, небольшой рельеф.

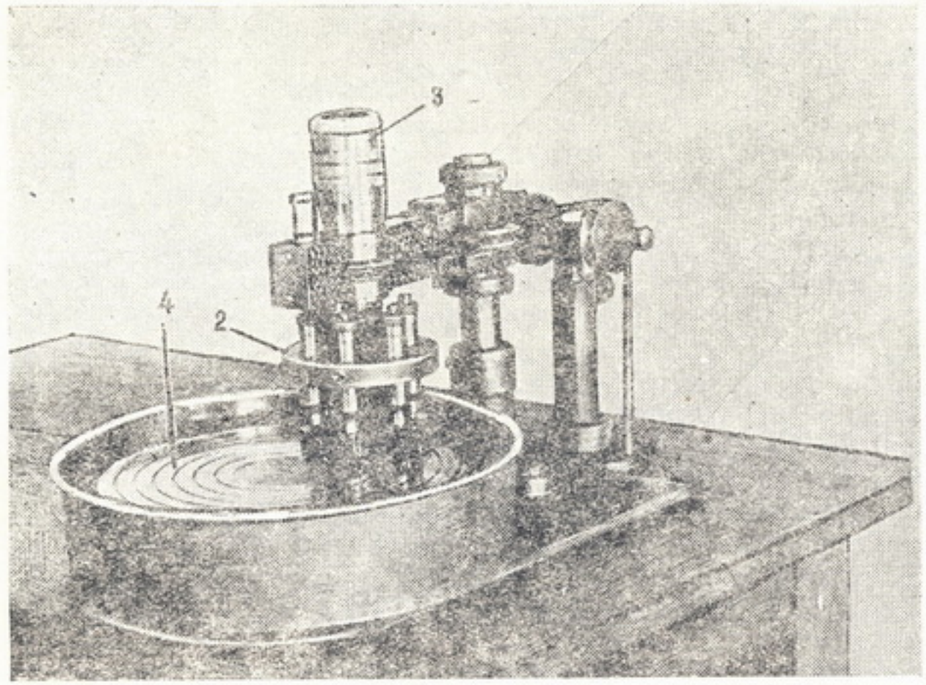


Рис. 12. Автоматический полировальный станок, изготовленный в Геологическом институте УФАН.
0,1 натуральной величины.
1 — головка стакана с шестью пружинными зажимами; 2 — колпак головки, позволяющий регулировать силу нажима на полированные шлифы; 3 — медный или свинцовый круг для полирования.

Тонкие абразивы для полировки были получены путем специальной процедуры отмучивания окиси алюминия, на описании которой мы не останавливаемся.

Полированные шлифы, изготовленные описанным методом, являются весьма совершенными по качеству, что позволяет быстро и надежно исследовать цвет и отражательную способность минералов, явления поляризации и отражательного плеохроизма и внутренние структуры. Этот метод особенно ценен потому, что в полированных шлифах, изготовленных этим способом, можно изучать контакты между твердыми и мягкими минералами, обычно скрытые теневыми каймами, и выявлять мельчайшие включения мягких минералов в твердых.

Известен простой способ изготовления почти безрельефных и весьма совершенных по качеству полированных шлифов — это полирование на смоляных дисках. Образчик необходимо тщательно довести на тонких минутниках, а потом полировать на смоляных кругах вручную или при медленном их вращении.

6. ПРОЗРАЧНЫЕ ПОЛИРОВАННЫЕ ШЛИФЫ

Прозрачными полированными шлифами называются комбинированные препараты для микроскопического исследования одновременно в проходящем и в отраженном свете.

Методика изготовления таких препаратов была предложена в 1930 году Донэ (Donnay I. Thinned polished sections. Econ. Geol., 25, 1930) и практически разработана в 1930 г. в Уральском институте прикладной минералогии шлифовальным мастером М. Н. Ширяевым при консультации автора настоящего руководства.

Этот препарат изготовляется следующим образом. Сначала обычным способом приготовляется полированный шлиф. Затем он наклеивается при помощи канадского бальзама полированной поверхностью на предметное стекло. После этого его стачивают с обратной стороны на шлифовальном круге до толщины обычного шлифа (0,03 мм). Стачивание сначала производится на крупном абразиве (5-минутник), а потом последовательно на более мелких (30—60—120-минутниках). Наконец, препарат переклеивается на другое предметное стекло, так что его полированная поверхность повертывается наружу. После протирания спиртом для удаления приставшего канадского бальзама и после легкой полировки прозрачный полированный шлиф готов.

В прозрачных полированных шлифах можно в отраженном свете наблюдать отражательную способность, цвет, явления анизотропии, твердость (по рельефу и светлой линии) для минералов непрозрачных и полупрозрачных. Определение твердости иглами и травление реактивами затруднительно.

В проходящем свете в этих препаратах можно наблюдать прозрачность и цвет, показатель преломления, интерференционную окраску и угол угасания при скрещенных николях, определять знак зоны и осность для минералов прозрачных и полупрозрачных.

Такие препараты особенно удобны для исследования полупрозрачных рудных минералов (сфалерит, касситерит, хромит и др.) и для ознакомления с сопровождающими минералами (силикаты, карбонаты и др.).

УПРАЖНЕНИЯ

Изготовление полированных шлифов

Для ознакомления с наиболее ответственными процессами изготовления полированных шлифов руд — доводкой и собственно полировкой — нужно выполнить следующие операции.

Проварить канифолью «заготовку» полированного шлифа, т. е. кусочек руды, которому придана определенная форма и верхняя поверхность которого отшлифована. Для этого заготовка нагревается на электроплитке,

покрытой асбестовым кружком; затем горячая верхняя поверхность заготовки, подлежащая полированию, натирается кусочком канифоли. Рыхлые и пористые образцы провариваются в фарфоровой чашке, наполненной горячей жидкой канифолью. Заготовка охлаждается и начинается операция доводки.

Для этого на зеркальное стекло насыпается минутник (60-минутник), который смачивается водой, и на этом стекле вручную подтачивается заготовка. После этого заготовка моется и вновь подтачивается на втором стекле с более мелким минутником (120- или 240-минутник). Процесс доводки длится 10—15 минут, в зависимости от твердости руды. Полировка руд мягких и средней твердости (галенит, молибденит, борнит) производится с помощью магнезии. Небольшое количество магнезии разводится водой до консистенции сметаны и намазывается тонким слоем на суконный круг полировальной машины.

Прежде чем приступить к полированию образца, его надо тщательно отмыть водой от оставшихся крупинок минутника. Полируемый кусочек следует передвигать от центра к периферии вращающегося круга. Сильно нажимать полированным шлифом на круг не рекомендуется. Через 3—5 мин. полирования препарат проверяется под микроскопом. Время полирования хорошо доведенных на стекле с минутником препаратов 10—20 мин. По окончании работы нужно тщательно вымыть круг в воде, так как магнезия (MgO) переходит на воздухе в магнезит ($MgCO_3$), который непригоден для полирования и портит сукно. Полирование твердых руд (хромит, титано-магнетит, марганцевые руды и др.) производится с помощью зеленого крокуса (окись хрома). Последний насыпается тонким слоем на смоченный водой суконный круг. Время полирования в этом случае длится от 20 до 40 мин. Готовый полированный шлиф промывается в проточной воде для удаления остатков полировальных материалов. Полированные шлифы монтируются на предметных стеклах. Для этого берется кусочек воска, который размягчается на спиртовой лампочке. Разогретый кусочек воска аккуратно прижимается пальцами к нижней поверхности полированного шлифа, последний помещается на стекло и слегка придавливается ручным прессом. На стекле делается соответствующая надпись (месторождение и № образца) тушью или алмазным карандашом. Полированная поверхность протирается на сукне или замше.

Ознакомление с прозрачными полированными шлифами

В качестве упражнения рекомендуется просмотреть прозрачные полированные шлифы полиметаллической (алтайской) руды и хромитов.

Минераграфический микроскоп устанавливается для работы в проходящем свете. Для этого из центра предметного столика вынимается металлический диск и на столик устанавливается препарат полированной поверхностью кверху. Лампа должна находиться на расстоянии 15—20 см от микроскопа, причем свет ее должен падать и на зеркальце внизу столика и на опак-иллюминатор. Зеркальце нужно закрыть экраном (картонкой), затем навести на фокус и установить опак-иллюминатор; тогда получится изображение в отраженном свете. Если картонку снять и закрыть ею отверстие опак-иллюминатора, затем навести с помощью зеркальца свет от лампы, не меняя ее положения, на препарат снизу, получится изображение в проходящем свете. Если теперь включить верхний николь (анализатор в тубусе микроскопа), получится изображение в проходящем свете при скрещенных николях.

В прозрачном полированном шлифе полиметаллической (алтайской) руды в отраженном свете рекомендуется различить по цвету следующие минералы:

1) кварц — очень темный;
2) сфалерит — серый;
3) пирит — светложелтый;
4) галенит — белый.

В проходящем свете кварц будет бесцветным и прозрачным, а сфалерит — желтоватого цвета с резкой шагреневой поверхностью (высокий по-

казатель преломления). При скрещенных николях кварц будет иметь желтый или серый цвет интерференции, а сфалерит, как минерал изотропный, будет темным. Пирит и галенит в проходящем свете будут темными и непрозрачными.

В прозрачных полированных шлифах хромита следует обратить внимание на характер просвечивания высокосортных хромитов малиново-красным цветом, а низкосортных — желтобурым цветом. Это колебание цвета хромитов (хромшпинелидов) в тонких шлифах объясняется различием химических свойств: в первых рудах присутствует хромпикотит $(Mg, Fe)Cr_2O_4$, а во вторых — алюмоберозовит $(Fe, Mg)\ (Cr, Al)_2O_4$.

При этой же установке микроскопа можно ознакомиться с реакционными железистыми каймами вокруг зерен хромита, которые выглядят в отраженном свете серовато-белыми (светлее хромита), а в проходящем свете совсем черными. Следует также обратить внимание на уваровит (хромовый гранат) и серпентин. Рекомендуется изучить поведение всех этих минералов в отраженном и проходящем свете, а также в проходящем свете при скрещенных николях.

ГЛАВА III

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОГРАФИЙ И ЗАРИСОВОК ПОД МИКРОСКОПОМ

1. ОСНОВЫ МИКРОФОТОГРАФИИ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

Микрофотография — большая область знания, по которой имеется специальная литература [1].

Микрофотографии представляют собой ценные иллюстрации к отчетам по минераграфическому исследованию руд. Они точно и объективно передают форму и размеры зерен, взаимоотношения их между собой, отражают структурные и минералогические особенности руды. Хорошо выполненная микрофотография заменяет несколько страниц текста.

Микрофотографирование в отраженном свете хорошо производить с помощью металлографического микроскопа МИМ-5. Этот микроскоп, снабженный набором отечественных объективов и окуляров, позволяет получать увеличения при микрофотографировании от 24× до 1780×. Необходимо, чтобы к нему был приложен ортоскопический окуляр 12,5×, дающий плоское изображение. Изображение, видимое в боковой тубус, путем перемещения специальной призмы может быть сразу же спроектировано на матовое стекло или фотопластинку. Опак-иллюминатор этого микроскопа снабжен всеми необходимыми приспособлениями для регулировки освещения и набором стеклянных светофильтров. Отклоняющее приспособление опак-иллюминатора состоит из стеклянной пластинки для сильных увеличений и зеркального язычка для средних и малых увеличений.

Микрофотографии можно выполнять также на любом минераграфическом микроскопе, приспособив к нему камеру.

[1] Методы микрофотографирования подробно описаны в работе Л. И. Цукерман «Руководство по микрофотографии для минералогов и петрографов», 1936 г.

Удобным для микрофотографирования является микроскоп МП-4 завода «Русские самоцветы», имеющий, кроме визуальной боковой трубки, вертикальную трубку тубуса. Вместо специальной камеры для микрофотографирования, можно употреблять камеру с мехами фотографического аппарата (9 × 12) или сделать самому раздвигающийся ящичек с пазами для матового стекла и кассеты. Для микрофотографического аппарата, следовательно, нужно дополнительно иметь только камеру, так как оптикой к ней служат объективы и окуляры самого микроскопа.

Хорошие микрофотографии можно получать с помощью узкопленочных фотоаппаратов «ФЭД», «Зоркий» или «Зенит». Для этого находят под микроскопом интересующий сюжет, тщательно устанавливают свет и точно фокусируют микроскоп. На окуляр микроскопа накладывают фотоаппарат, вывинтив или не вывинчивая из него объектива, и, придерживая аппарат одной рукой, открывают затвор с помощью тросика. Экспозиция находится опытным путем.

Лучшие результаты микрофотографирования получаются с объективами-апохроматами. С объективами-ахроматами, которыми снабжаются все микроскопы, можно получить вполне удовлетворительные результаты, если пользоваться желто-зеленым светофильтром. Последний пропускает лучи лишь части видимого спектра, для которых объективы-ахроматы исправлены в отношении хроматической аберрации. За неимением стеклянного желто-зеленого светофильтра применяют жидкий фильтр Цетнова, состоящий из 100 см³ дистиллированной воды, 12 г медного купороса, 1,2 г двухромовокислого калия и 0,3 см³ серной кислоты.

Жидкость наливается в стеклянную плоскую кювету, которая помещается между источником света и опак-иллюминатором. Стеклянный светофильтр помещается в осветителе опак-иллюминатора.

Желто-зеленый фильтр имеет еще и другое назначение. Известно, что человеческий глаз и обыкновенная фотографическая пластинка по-разному чувствительны к различным частям спектра. Максимальная восприимчивость глаза будет в желто-оранжевой части, а пластинки — в синей и фиолетовой частях спектра, поэтому обычная фотографическая пластинка неправильно передает зрительное восприятие цветов. Микрофотография на ортохроматической пластинке с применением желто-зеленого светофильтра правильно передает цвета.

Окуляры Гюйгенса для микрофотографирования не подходят — они дают изображение, несколько сферически изогнутое, что обусловливает неодинаковую резкость его в середине и краях; для этой цели пользуются специальными ортоскопическими и перипланатическими окулярами.

Некоторые рудные минералы, заметно различные по цвету при наблюдении в микроскоп, на микрофотографии не различаются. В этом случае применяют так называемые контрастные фильтры, которые подбираются с таким расчетом, чтобы их цвет являлся дополнительным к оттенку более темного минерала; тогда этот минерал на фотографии выйдет значительно темнее другого. Так, например, нижеприведенные цветные фильтры обеспечивают разделение на фотографической пластинке следующих минералов: зеленый — халькопирита и халькозина, борнита и халькопирита, борнита и тенантита; синий — халькопирита и галенита, халькопирита и пирита, халькозина и ковеллина, гематита и магнетита; оранжевый — галенита и халькозина.

Кроме подбора надлежащей оптики и умелого использования светофильтров, на успех микрофотографирования оказывают большое влияние качество полированных шлифов, правильный монтаж их и равномерное освещение. Полированные шлифы должны быть зеркально-гладкими, без выбоинок и царапин и без резкого рельефа твердых минералов над мягкими. Полированная поверхность образца должна быть строго параллельна столику микроскопа, что должно быть проверено перед съемкой ручным прессом. Свет должен быть сильным и равномерным и должен быть тщательно отрегулирован.

Для получения четкости изображения диафрагмы (апертурная и поля зрения) должны быть несколько прикрыты. Наводку на фокус нужно производить путем передвигания подъемным винтом столика микроскопа и микрометренным винтом тубуса микроскопа, наблюдая за изображением на матовом стекле или на гладком стекле с помощью лупы. Второй прием требует некоторого навыка, но позволяет осуществлять более точную наводку.

Большое значение имеет определение правильной экспозиции. Найти ее лучше всего экспериментальным путем, выдвигая кассету постепенно и экспонируя последовательно узкие полоски пластинки. Таким путем можно получить на одной пластинке 4—6 полосок, относительная экспозиция которых будет 1, 2, 3, 4, 5, 6 единиц времени. Проявив такую пластинку, нетрудно найти лучшую экспозицию.

При микрофотографировании экспозиция зависит от многих условий: источника света, установки и регулировки его, светофильтра, апертурной диафрагмы, объектива, окуляра, растяжения камеры, фотографического объекта, чувствительности фотографических пластинок.

Увеличение, получаемое на микрофотографии, обычно не равно увеличению микроскопа. Равенство этих увеличений бывает лишь в том случае, когда расстояние между матовым стеклом и окуляром микроскопа равно 250 мм. В осталь-

ных случаях увеличение при фотографировании ($К_ф$) находится по формуле:

$$К_ф = К_м \frac{l}{250},$$

где $К_м$ — увеличение микроскопа;

l — расстояние между пластинкой и окуляром в мм.

Более точное определение увеличения микроскопа производится с помощью объект-микрометра (пластинка с делениями через 0,01 мм), который помещают вместо полированного шлифа. Измеряя увеличенные изображения между делениями объект-микрометра, видимыми на матовом стекле, находят отношение измеренной длины изображения к действительной его длине, которое и будет увеличением микроскопа.

Микрофотографирование при сильных увеличениях с масляной иммерсией значительно труднее, чем с сухими объективами. При работе с масляной иммерсией нужно очень точно монтировать шлиф, значительно прикрывать диафрагмы апертурную и поля зрения и употреблять довольно густое иммерсионное масло (жидкое масло растекается, капля деформируется и изображение теряет четкость за время экспозиции).

Объекты, выбранные в полированных шлифах для микрофотографирования, обводят цветной тушью; полированные шлифы перед съемкой слегка протирают суконкой или замшей. Рекомендуется записывать для каждого объекта условия, при которых производилось микрофотографирование (сорт пластинок, увеличение, сфетофильтры, экспозиция и т. д.).

2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ЗАРИСОВОК ПОД МИКРОСКОПОМ

Рисовальный окуляр—прибор, позволяющий выполнить довольно точно зарисовку изображения, видимого под микроскопом. В рисовальном окуляре вделана особой конструкции призма, расположенная над главной линзой. Эта призма, во-первых, пропускает лучи, идущие через тубус микроскопа от препарата, и, во-вторых, отражает лучи от листа бумаги, на котором выполняется зарисовка. Таким образом, если вместо обычного окуляра пользоваться рисовальным, можно наблюдать два изображения: объект, который нужно зарисовать, и лист бумаги с карандашом, который мы держим в руке.

Имеется несколько типов рисовальных окуляров. При работе с одним из них микроскоп устанавливается вертикально и экран (лист бумаги) располагается под углом к плоскости стола. Окуляры другой конструкции требуют наклоненного под углом 45° тубуса микроскопа и горизонтального положения экрана.

Если лист бумаги (экран) лежит на столе, изображение поля зрения микроскопа проектируется как большой круг — около 50 см в диаметре. Чтобы получить изображение нормальной величины (диаметр поля зрения микроскопа на зарисовке должен быть равен 8—10 см), экран следует поднять. Для этой цели могут служить деревянные скамеечки (столики) высотой 20—30 см. Описанные выше рисовальные окуляры имеют тот недостаток, что призма загораживает часть поля зрения окуляра, и яркость изображения препарата сильно понижается.

В аппарате Аббе этот недостаток устраняется: весь выходной пучок света проходит в глаз. Это достигается применением двух прямоугольных призм, сложенных гипотенузами в виде куба, который помещается в окуляре перед главной линзой. Стеклянный куб заключен в металлическую оправу, с которой соединен стержень с зеркалом, направленным на рисовальную плоскость. Одна из гипотенуз куба посеребрена, за исключением эллиптического отверстия, оставленного для прохождения световых лучей. Для регулировки освещенности перед отверстием прибора установлен вращающийся диск с дымчатыми стеклами. Куб можно передвигать горизонтально винтами для точной центрировки. Кроме того, аппарат вместе с держателем можно опускать и поднимать. Зеркало прибора устанавливают, вращая его до тех пор, пока лист бумаги, лежащий на рисовальном столике, весь будет в поле зрения. Как и в описанном выше рисовальном окуляре, в аппарате Аббе наклон столика надо подобрать так, чтобы не искажался рисунок; освещенность объекта, видимого под микроскопом, и листа бумаги для зарисовки должна быть равномерной.

Имеющийся рисовальный аппарат Аббе РА-1 отечественного производства предназначен для биологического и металлографического микроскопов.

Зарисовки под микроскопом можно производить и с помощью микрофотокамеры, в которой на место кассеты или матового стекла вставляется прозрачное стекло. На это стекло накладывается восковка, и изображение на ней обводится карандашом. Зарисовку в этом случае выполняют в затемненной комнате.

УПРАЖНЕНИЯ

Основное условие, которое необходимо соблюдать при пользовании рисовальным окуляром, — это получение одинакового и равномерного освещения как объекта (изображения под микроскопом), так и экрана (бумаги с карандашом), что достигается регулировкой света.

Общий порядок работы следующий:

1. В полированном шлифе находится при объективе 9× (№ 3) объект для зарисовки.

2. Снимается окуляр, и вместо него ставится рисовальный окуляр, боковой выступ которого должен располагаться с правой стороны. Прибор укрепляется винтом.

3. Устанавливаются два источника света. В опак-иллюминатор направляется слабый свет от низковольтной лампочки (4 в), а столик с бумагой освещается обычной лампочкой (25 ватт).

4. Проверяется, проектируется ли поле зрения микроскопа в виде круга, а не эллипса. Для этого достаточно наметить карандашом на бумаге контур поля зрения и измерить два перпендикулярных диаметра. Если изображение поля зрения получается в виде эллипса, то нужно изменить наклон рисовального столика или тубуса микроскопа.

5. Достигается равномерное освещение объекта и экрана. Если объект освещен слишком ярко, бумага и карандаш почти не видны; наоборот, при ярком освещении экрана хорошо видны бумага и карандаш, но почти не заметен объект.

Для регулировки освещения можно пользоваться следующими способами: 1) приближать или удалять полуваттную лампу от экрана, усиливая или ослабляя таким путем освещение последнего; 2) закрывать боковое отверстие рисовального окуляра зелеными круглыми стеклышками, ослабляя освещение экрана, и 3) приближать или удалять лампочку опак-иллюминатора.

Когда освещение отрегулировано, одновременно видны и объект и бумага с карандашом. Следует заметить, что изображение с рисовальным окуляром несколько менее ясно, чем с обычным окуляром. Для повышения резкости изображения при рассмотрении тонких линий спайности и прочих деталей следует диафрагму опак-иллюминатора прикрыть. Карандаш для зарисовки должен быть отточен достаточно остро. После того как все контуры зерен будут обведены с помощью аппарата, рисунок заканчивается от руки, причем зарисовка контролируется наблюдением в микроскоп. Различные минералы лучше всего обозначать цветными карандашами.

Определение увеличения рисунка производится нижеследующим образом. Кладется на столик микроскопа объект-микрометр (или полоска миллиметровой бумаги) и отмечаются карандашом через определенные и равные промежутки точки на листе бумаги (экране). Берется отношение расстояний на экране к истинному расстоянию между точками на микрометре или миллиметровой бумаге. Это отношение и будет увеличением рисунка.

Можно увеличение определить и проще. Измерить с помощью объект-микрометра диаметр поля зрения под микроскопом. Потом измерить диаметр поля микрофотографии. Взяв отношение второй величины к первой, получим увеличение микроскопа.

ГЛАВА IV

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Минераграфическое исследование руд под микроскопом в отраженном свете значительно отличается от петрографического исследования горных пород под микроскопом в проходящем свете.

В минераграфии объектом исследования является руда в виде непрозрачного зеркально-гладкого полированного шлифа. В петрографии объект исследования — горная порода в виде тонкого прозрачного шлифа.

В минераграфии определение рудных минералов производится с помощью следующих диагностических признаков:

Физические признаки

I. Оптические

1. Отражательная способность и двуотражение.
2. Цвет.
3. Внутренние рефлексы.
4. Отношение к поляризованному свету.

II. Прочие физические

5. Твердость.
6. Магнитность.
7. Электропроводность.

Химические признаки

8. Диагностическое травление.
9. Световое травление.
10. Микрохимические испытания.

Из приведенных десяти признаков главными являются отражательная способность, отношение к поляризованному свету и твердость.

В отличие от определения прозрачных минералов петрографическими методами в минераграфии пользуются более разносторонними приемами: наблюдают не только свойства минералов, но и производят с ними различные испытания. Но, с другой стороны, при минераграфическом исследовании обычно не измеряют оптических констант минералов, а ограничиваются определением лишь качественных признаков, так как оптические явления в отраженном свете выражены менее отчетливо, чем в проходящем свете.

Большое значение имеет измерение отражательной способности рудных минералов, являющейся их оптической константой. Автор настоящего руководства положил отражательную способность рудных минералов в основу их диагностики и разработал для этого специальные таблицы.

Минераграфическим методом можно надежно определять рудные (непрозрачные или полупрозрачные) минералы. Нерудные (сопровождающие) минералы — прозрачные, они выглядят под микроскопом в отраженном свете темными, и поэтому их точное определение минераграфическим методом затруднительно. Поэтому для полного освещения вещественного состава руд, состоящих как из рудных, так и из сопровождающих минералов, необходимо производить не только минераграфическое исследование полированных шлифов, но и петрографическое исследование прозрачных шлифов.

Прежде чем переходить к систематическому описанию диагностических признаков и методов минераграфического исследования, необходимо познакомиться с основами кристаллооптики абсорбирующих (непрозрачных) кристаллов.

2. ОСНОВЫ КРИСТАЛЛООПТИКИ АБСОРБИРУЮЩИХ КРИСТАЛЛОВ

Оптические явления в абсорбирующих (непрозрачных) кристаллах имеют очень сложный характер и еще недостаточно изучены.

Оптические свойства абсорбирующих кристаллов, по М. Береку, характеризуются сложной индикатрисой, состоящей из индикатрисы показателей преломления n и индикатрисы коэффициентов абсорбции x.

Обе поверхности волн индикатрисы имеют в общем случае очень сложную форму (рис. 13). Три главные оси для каждой поверхности не перпендикулярны друг к другу, отсутствуют также и плоскости симметрии. Для определения характера поляризации волн в любом направлении N необходимо при-

нять во внимание кривые сечений плоскости, нормальной к N, не только с поверхностью n, но и с поверхностью x индикатрисы. Так как в общем случае кривые этих сечений не являются эллипсами, то закон для направления колебаний очень усложняется. Форма колебаний существенно отлична от таковых в прозрачных кристаллах; в абсорбирующих средах в общем случае возможны только эллиптические колебания (рис. 14); оба эллипса колебаний имеют одинаковое отношение осей и одно и то же направление вращения.

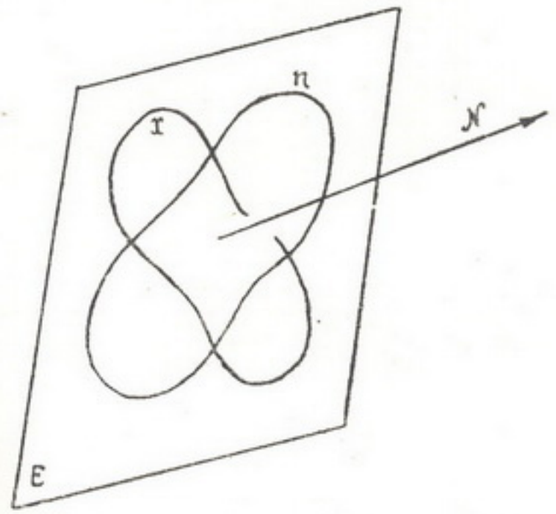


Рис. 13. Кривые пересечения плоскости E, перпендикулярной к направлению волновой нормали N с двумя поверхностями сложной индикатрисы (общий случай абсорбирующего кристалла).

Для особых направлений волновой нормали колебания будут линейные и круговые. В особенности это относится к направлениям, которые соответствуют оптическим осям при отсутствии абсорбции.

Оптические оси теряют в общем случае свое значение как направления оптической изотропии. Вместо них появляются так называемые оси вращения. Вдоль них распространяется только одна волна, которая поляризована по кругу.

Отклонения индикатрисы n от формы эллипсоида зависят от величины индикатрисы x. Если последняя очень мала, то оптическое поведение абсорбирующего кристалла приближается к поведению прозрачного кристалла.

Оптически двуосные абсорбирующие кристаллы имеют три главных показателя преломления и три главных коэффициента абсорбции, которые не совпадают между собой. Угол между осями вращения для кристаллов, прозрачных в тонких слоях, очень незначителен. Наличие эллиптических форм колебаний наблюдается вблизи осей вращения.

Примерами двуосных рудных минералов могут служить: антимонит (ромбический), арсенопирит (ромбический), висмутовый блеск (ромбический), джемсонит (моноклинный), аурипигмент (моноклинный).

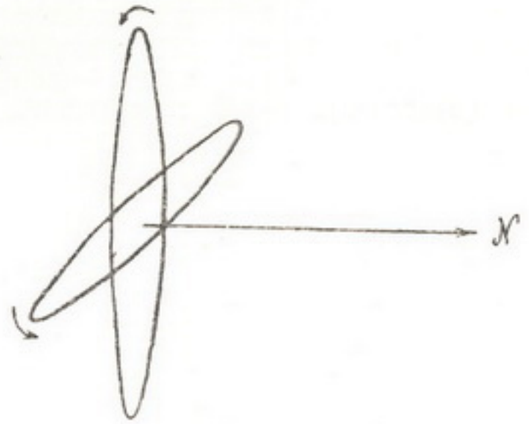


Рис. 14. Два эллиптических колебания разной скорости с одинаковым направлением вращения и взаимно перпендикулярными главными осями (общий случай любого направления распространения N в абсорбирующем анизотропном кристалле).

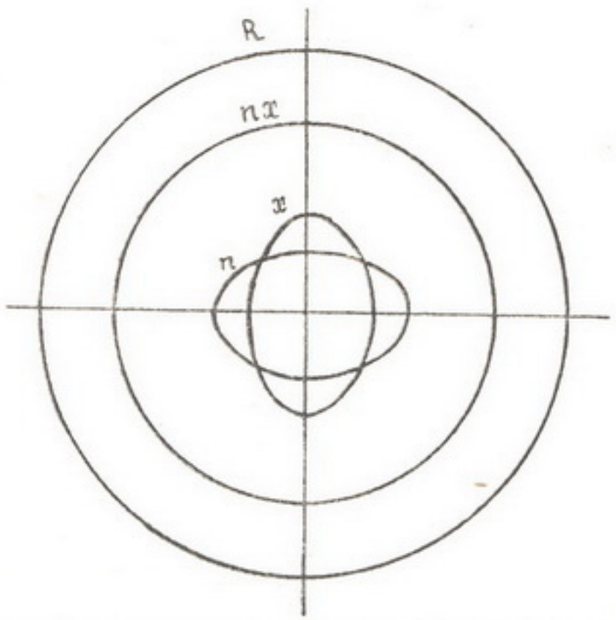


Рис. 15. Индикатриса одноосного кристалла. Кривые показателей преломления n и кривые коэффициентов абсорбции x — почти эллипсы; оси их взаимно перпендикулярны.

Оптически одноосные абсорбирующие кристаллы имеют не столь сложный оптический характер. Здесь создается значительное упрощение, так как в случае сильной абсорбции индикатрисы n и x являются поверхностями вращения, близкими к эллипсоидам вращения.

Оси вращения обеих поверхностей совпадают, образуя действительную оптическую ось. Кривые сечений n и x с нормальной поверхностью представляют собой почти эллипсы, симметричные к двум взаимно перпендикулярным осям (рис. 15). Так как эти оси вследствие симметрии вращения совпадают в обеих кривых сечения, то во всех направлениях (за исключением оптической оси) получаются линейно поляризованные волны.

В качестве примеров одноосных рудных минералов можно привести: ковеллин (гексагональный), молибденит (гексагональный), никелин (гексагональный), гаусманит (квадратный), касситерит (квадратный).

Оптически изотропные абсорбирующие кристаллы в оптическом отношении являются сравнительно простыми. Здесь поверхности показателей преломления n и коэффициента абсорбции x представляют собой шары. Поэтому в любом направлении распространяется только одна неполяризованная волна. Преломленные волны в абсорбирующем изотропном кристалле не являются гомогенными, за исключением случая перпендикулярного падения света. В противоположность прозрачным изотропным кристаллам n зависит здесь от угла падения i в воздухе и рассчитывается по формуле из величин n и x шаровой индикатрисы.

Примерами изотропных рудных минералов могут служить: медь, золото, платина, галенит, сфалерит, блеклая руда, магнетит, хромит и др.

ГЛАВА V

ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДВУОТРАЖЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Отражательная способность является важнейшим признаком в минераграфии, так как она может быть измерена и представлена цифровой величиной. При наблюдениях под микроскопом в отраженном свете цвет дает нам качественную оценку зрительного восприятия, а отражение, являясь мерой яркости, позволяет оценить это зрительное восприятие количественно. Приблизительную оценку отражательной способности минералов можно произвести по микрофотографии: минералы с более высоким показателем отражения будут более светлыми.

Более точно отражательная способность может быть вычислена по формулам или измерена с помощью специальных приборов.

Величина отражательной способности, т. е. показатель отражения, определяется отношением интенсивности отраженного света к интенсивности падающего света.

В случае падения света перпендикулярно отражающей плоскости изотропного тела показатель отражения выразится в виде функции показателей преломления n и коэффициентов абсорбции x отражающего тела, что может быть представлено следующим уравнением [1]:

$$R = \frac{J_r}{J_i} = \frac{(n-1)^2 + n^2x^2}{(n+1)^2 + n^2x^2} \qquad (1)$$

В случае анизотропных рудных минералов показатели отражения для различных направлений не одинаковы. Наблюде-

[1] В этой формуле единица обозначает показатель преломления воздуха; в случае применения иммерсионных объективов эта величина соответственно изменится.

ния под микроскопом в этом случае следует производить с одним николем (поляризатором), который вставляется в опак-иллюминатор.

Ниже приводятся формулы, выражающие значение величины показателя отражения анизотропного вещества для более простого случая, когда волны, приходящие в кристаллы в направлении нормали шлифа, линейно поляризованы.

$$R = \frac{(n_1-1)^2 + n_1^2x_1^2}{(n_1+1)^2 + n_1^2x_1^2} \cos^2\varphi_1 + \frac{(n_2-1)^2 + n_2^2x_2^2}{(n_2+1)^2 + n_2^2x_2^2} \cos^2\varphi_2, \qquad (2)$$

где R — показатель отражения;

n_1 и n_2 — больший и меньший показатели преломления минерала;

x_1 и x_2 — больший и меньший коэффициенты абсорбции минерала;

φ_1 и φ_2 — азимуты обоих колебаний в кристалле (минерале) по отношению к колебаниям в поляризаторе.

В зависимости от того, какой из азимутов равен нулю, получим:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= \frac{(n_1-1)^2 + n_1^2x_1^2}{(n_1+1)^2 + n_1^2x_1^2} \text{ при } \varphi_1=0\ (\varphi_2 = 90^\circ) \\ R_2 &= \frac{(n_2-1)^2 + n_2^2x_2^2}{(n_2+1)^2 + n_2^2x_2^2} \text{ при } \varphi_2=0\ (\varphi_1 = 90^\circ) \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Эти выражения для R_1 и R_2 представляют собой максимальную и минимальную величины показателей отражения анизотропного рудного минерала; они получаются попеременно при вращении столика микроскопа через 90°. Максимальная разность интенсивностей $\triangle R = R_1 - R_2$ называется двуотражением. Явление двуотражения заключается в том, что анизотропный рудный минерал при наблюдении его под микроскопом с одним николем-поляризатором при вращении предметного столика меняет через 90° свою яркость или цвет. Это явление используется как ценный диагностический признак.

Средняя интенсивность $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ называется показателем отражения анизотропного вещества.

Показатель отражения имеет особенно большое значение при определении рудных минералов: он может быть измерен, а следовательно, представляет собой важную оптическую константу.

Из приведенных выше формул видно, что показатель отражения рудных минералов определяется в основном двумя величинами: показателем преломления n и коэффициентом абсорбции x.

Металлы и самородные элементы (золото, серебро, медь) имеют очень высокие коэффициенты абсорбции и низкие показатели преломления. Поэтому величина n для них мало влияет на величину отражательной способности R, которая для самородных элементов под микроскопом исключительно велика, и они по своей яркости легко могут быть отличимы от других минералов.

В тех же случаях, когда коэффициент абсорбции x ниже 0,5, отражательная способность R начинает существенно зависеть и от показателя преломления. Такие минералы (например, галенит, теннантит, халькопирит) значительно уступают в яркости самородным элементам.

В табл. 4 приведены для примера данные Ж. Орселя о величинах показателей преломления n, коэффициентов абсорбции x и показателя отражения R и о вычисленных по формуле (1) значениях показателей отражения R для некоторых изотропных веществ (минералов).

Таблица 4

Минералы	Показатель преломления n	Коэффициент абсорбции x	Показатель отражения R в %
Серебро	0,18	20,3	95,0
Золото	0,50	6,2	83,0
Платина	2,06	2,06	70,1
Свинцовый блеск . . .	3,912	0,51	44,3
Цинковая обманка . .	2,421	0,019	17,2

Отражательная способность рудных минералов зависит не только от n и x, но еще и от рода света, в котором производятся наблюдения. Различный характер света достигается применением цветных фильтров, пропускающих свет определенной длины волны.

В табл. 5 показана зависимость показателей отражения R некоторых минералов от рода света.

Изменение отражательной способности от рода света имеет важное значение при определении рудных минералов. Для одних минералов оно выражено очень резко (например, для золота), для других—относительно невелико (например, для платины).

R обычно определяется в желтом свете, применительно к которому составлены таблицы, прилагаемые к настоящему руководству (глава XIII).

Анизотропные рудные минералы, согласно формуле (2), имеют неодинаковые показатели отражения для различных направлений. В таблице 6 приводятся результаты измерений R для двуосного (антимонит) и одноосного (молибденит) минералов в желтом свете.

Таблица 5

Минералы	Показатели отражения в %		
	зеленый свет λ=520 мμ	оранжевый свет λ=590 мμ	красный свет λ=665 мμ
Золото	47,0	82,5	84,0
Платина	65,3	65,3	63,5
Пирит	53,5	51,5	48,5
Тетраэдрит	30,8	29,5	27,0
Сфалерит	18,8	17,7	16,7
Хромит	15,7	14,7	13,8

Таблица 6

Минералы	Показатели отражения в %
Антимонит (ромбическая сингония)	$R\gamma = 37,8$; $R\beta = 34,2$; $R\alpha = 26,4$
Молибденит (гексагональная сингония)	$Ro = 31,5$; — $Re = 18,0$

Отражательная способность рудных минералов зависит также от той среды, в которой производятся наблюдения под микроскопом (воздух, вода, масло).

При употреблении масляно-иммерсионных объективов показатель отражения минералов значительно понижается вследствие погружения их в кедровое масло (табл. 7).

Таблица 7

Среда	n среды	Показатель отражения минералов в %			
		пирит	теннантит	киноварь	сфалерит
Воздух . .	1,0	54,0	29,5	30,0	18,5
Кедровое масло . . .	1,515	46,0	14,0	13,0	6,5

Особенно сильно показатель отражения падает для полупрозрачных рудных минералов (сфалерит, лимонит, реальгар), что является для них одним из диагностических признаков.

2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОТРАЖЕНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Приблизительную оценку показателя отражения можно произвести без всякого специального прибора путем сравнения под микроскопом яркости (отражения) неизвестного минерала с яркостью соприкасающегося с ним известного минерала. Таким путем можно установить, выше или ниже показатель отражения определяемого минерала по сравнению с известными минералами.

Точное определение показателей отражения рудных минералов производится с помощью особых приборов двумя методами: а) объективным и б) субъективным.

В первом случае отражение определяется с помощью фотоэлемента, а во втором оценивается путем сравнения на глаз. Поскольку чувствительность фотоэлемента и человеческого глаза к световым лучам различна, показания будут несколько расходиться, что необходимо иметь в виду.

Главной частью приборов, с помощью которых определяют показатель отражения объективным методом, является фотоэлемент, соединенный с зеркальным гальванометром. Отраженный от полированной поверхности минерала свет проходит через микроскоп и попадает на чувствительный слой фотоэлемента; возникающий фототок проникает в гальванометр и отклоняет его зеркальце, что вызывает перемещение светового сигнала на шкале. Показания гальванометра в общем пропорциональны отражению.

С помощью таких приборов можно достаточно точно измерять отражение рудных минералов. Они требуют безупречно полированных шлифов и постоянного освещения объекта под микроскопом. Измерение на этих приборах должно производиться с большой тщательностью.

Микрофотометр с фотоэлементом, необходимый для исследовательских работ, может быть собран в каждой минераграфической лаборатории, для чего понадобятся: чувствительный селеновый фотоэлемент (400—500 микроампер на люмен), зеркальный гальванометр, низковольтная лампочка с питанием от аккумуляторов и окулярная насадка. Прибор может быть смонтирован на любом минераграфическом микроскопе. Описание такого прибора и результаты измерения им показателей отражения некоторых рудных минералов приведены в статье автора «Отражательная способность рудных минералов и ее измерение с помощью отечественной аппаратуры» (1948 г.).

В приборах, с помощью которых определяют показатели отражения субъективным методом, яркость испытуемого минерала сравнивается с переменной яркостью эталона.

Изменение яркости (отражения) эталона достигается путем изменения угла скрещения николей. Когда николи параллельны, мы имеем максимум света; когда они повернуты один относительно другого на 90°, мы имеем темноту.

Из физики известно, что энергия световой волны J, прошедшей через два николя, пропорциональна квадрату синуса угла поворота α:

$$J = K\ a^2\ \mathrm{Sin}^2\ \alpha,$$

где a — первоначальная амплитуда колебаний;

K — коэффициент.

М. Береком был сконструирован работающий по этому принципу микрофотометр, не получивший в практике минераграфии широкого распространения.

Автор настоящего руководства рекомендует производить измерение показателя отражения рудных минералов с помощью сравнительного окуляра Иностранцева. Этот прибор описан в главе VI.

Определение отражательной способности производится путем сравнения отражения неизвестного минерала с минералами-эталонами.

В качестве эталонов отражения рекомендуются следующие минералы:

1. Серебро	95%	6. Галенит	43%
2. Медь	90%	7. Буланжерит	37%
3. Платина	70%	8. Гематит	25%
4. Железо	64%	9. Хромшпинелид	14%
5. Пирит	53%	10. Кварц	4%

Таким путем можно оценить отражение приближенно с точностью около 10%.

Сравнительный окуляр можно также использовать и для более точного измерения показателя отражения. Можно рекомендовать следующий упрощенный микрофотометр, работающий по принципу сравнения (рис. 16).

Два однотипных поляризационных минераграфических микроскопа соединяются сравнительным окуляром. Перед опак-иллюминатором каждого микроскопа помещается осветительная лампочка, прикрепленная с помощью стержня к тубусу микроскопа. Лампочки (6 в и 0,8 а) питаются через трансформатор от осветительной сети. На столик одного из микроскопов помещается полированный шлиф с измеряемым минералом, на столик другого микроскопа — минерал-эталон, служащий для сравнения. В качестве эталона следует пользоваться отполированной платиновой пластинкой: отражение платины высокое (70%) и довольно постоянное для различных длин волн; кроме того, она не окисляется в воздухе.

На каждом микроскопе сначала устанавливается опак-иллюминатор (диафрагмы их следует прикрыть до минимального отверстия) и проверяется правильность установки николя-

поляризатора. Объективы берутся 9× (№ 3) или 21× (№ 5). Затем на каждом микроскопе устанавливается по одинаковому хорошо отполированному минералу (например, пириту).

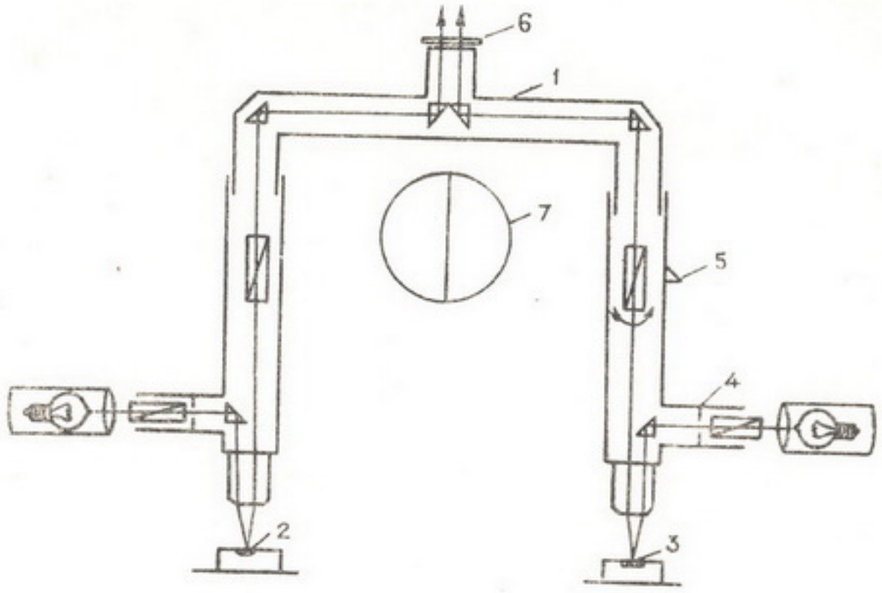


Рис. 16. Схема микрофотометра

1 — сравнительный окуляр; 2 — измеряемый минерал; 3 — минерал-эталон (Pt); 4 — диафрагма «ирис»; 5 — шкала анализатора; 6 — светофильтр; 7 — поле зрения прибора.

Включаются анализаторы, которые должны находиться в параллельном положении (максимум света). Некоторым перемещением лампочек у опак-иллюминаторов каждого микроскопа добиваются одинаковой освещенности двух половинок поля зрения прибора. Достигнув одинаковой освещенности, можно считать установку прибора законченной. Для измерения показателя отражения минерала, устанавливаются на одном из микроскопов испытуемый минерал, а на другом — эталонная пластина. На окуляр сравнительной камеры накладывается цветной (желтый) фильтр. Анализатор поворачивается над эталонной платиной от начального положения, отвечающего максимуму света (при 90°), до затемнения платины, отвечающего яркости измеряемого минерала. Берется отсчет по шкале анализатора. Измерение производится несколько раз и выводится средний угол поворота α николя. Если анализатор у микроскопа неподвижный (как, например, в микроскопах завода «Русские самоцветы»), то для затемнения платины придется вращать поляризатор.

Измерение отражения изотропных минералов производится при любом их положении на столике микроскопа. Минерал же анизотропный предварительно нужно поставить при скрещенных николях на темноту, а затем повернуть столик микроскопа на 45°.

Определение показателя отражения минерала R производится по формуле:

$$R_м = R_э \frac{\sin^2 \alpha_м}{\sin^2 \alpha_э} = Rpt \frac{\sin^2 \alpha_м}{\sin^2 90^\circ} = 70 \sin^2 \alpha_м$$

где: э — эталон; м — минерал; pt — платина; α — угол поворота николя.

На рисунке 17 приводится кривая, построенная по этой формуле, которая сразу по углу поворота николя дает искомое отражение.

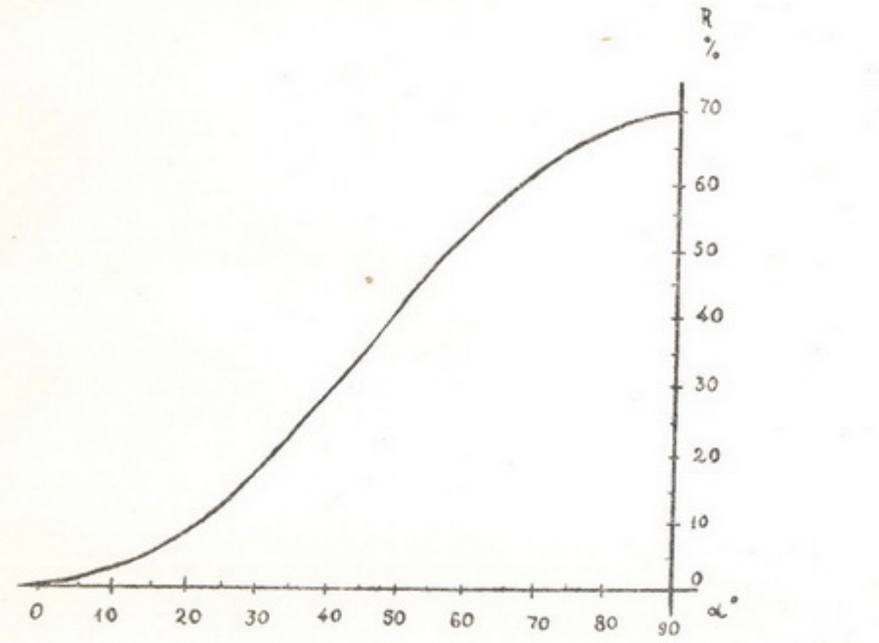


Рис. 17. Кривая для нахождения показателя отражения R по измеренному углу поворота николя α

С помощью описанного прибора можно быстро производить измерения показателя отражения рудных минералов с размерами зерен от сотых долей миллиметра и выше. Время, затрачиваемое на замер одного минерала (пять отсчетов), составляет не более 5 мин. Недостатком описанного прибора, так же как и микрофотометра М. Берека, является субъективность измерения. Нахождение одинаковой освещенности двух смежных полей зависит от остроты зрения, степени сосредоточен-

ности и других индивидуальных свойств наблюдателя. Затруднительно также установление различия в цвете измеряемого минерала и минерала-эталона. Применение светофильтра способствует нивелировке разницы в цветах сопоставляемых минералов и облегчает измерение. При известном опыте наблюдателя, достаточном числе отсчетов (5—10) и тщательной работе индивидуальные погрешности сводятся к минимуму и результат получается вполне удовлетворительный.

Описанный микрофотометр легко может быть собран в любой минераграфической лаборатории. Особенную пользу такой прибор может принести в практике учебных занятий по минераграфии.

Простой микрофотометр с камерой Иностранцева можно устроить, не задалживая двух рудных поляризационных микроскопов с николями. Для этой цели можно воспользоваться двумя простыми биологическими микроскопами, снабдив их опак-иллюминаторами. Поле зрения микроскопа с эталонной платиной в этом случае рекомендуется затемнять путем изменения накала лампочки, включив в сеть небольшой реостат. Шкала реостата должна быть предварительно проградуирована, что может быть сделано по минералам-эталонам или путем более точного измерения с помощью объективного микрофотометра с фотоэлементом.

И. С. Волынским для приближенного определения показателя отражения было предложено[1] вспомогательное приспособление к минераграфическому микроскопу — фотометрический окуляр с оптическим клином.

Этот прибор представляет собой обычный окуляр, в область диафрагмы которого вводится прозрачный оптический клин — пластинка с прогрессивно возрастающей плотностью окраски. По длине пластинка разделяется на две области: а) полной светопроницаемости и б) прогрессивно убывающей светопроницаемости.

Затемняющая пластинка (клин) может быть изготовлена самостоятельно фотографическим путем. Для этого фотопластинка размером 9×12 см разрезается алмазом на полоски 20 мм шириной. Каждая полоска прикрывается вдоль наполовину черной бумагой и помещается в кассету, на крышке которой нанесены через 0,5 см деления.

Кассета освещается рассеянным светом и каждая полоска пластинки последовательно экспонируется путем выдвигания крышки через 0,5 см на один и тот же промежуток времени (1 сек). В результате 10—15-кратного открывания кассеты после проявления получается пластинка с 10—15 постепенно возрастающими по плотности потемнения ступеньками.

[1] И. С. Волынский. Определение рудных минералов под микроскопом. Т. III. Госгеолиздат, 1949.

Градуировку пластинки лучше всего выполнить с помощью микрофотометра МФ-2. Сначала градуируем нашу пластинку в относительных числах шкалы микрофотометра.

Затем переходим к градуировке ее в процентах отражательной способности минералов. Для этого пластинка вдвигается в фотометрический окуляр, установленный на микроскопе, производится компенсация яркости какого-либо рудного минерала (например, пирита) сравнительно с нерудным (кварцем).

Зная величины отражательной способности рудного и нерудного минералов, номер компенсирующей полоски и величины относительного затемнения, измеренные на микрофотометре, нетрудно, путем вычисления из пропорций, найти значение отражательной способности, компенсируемой каждой полоской пластинки.

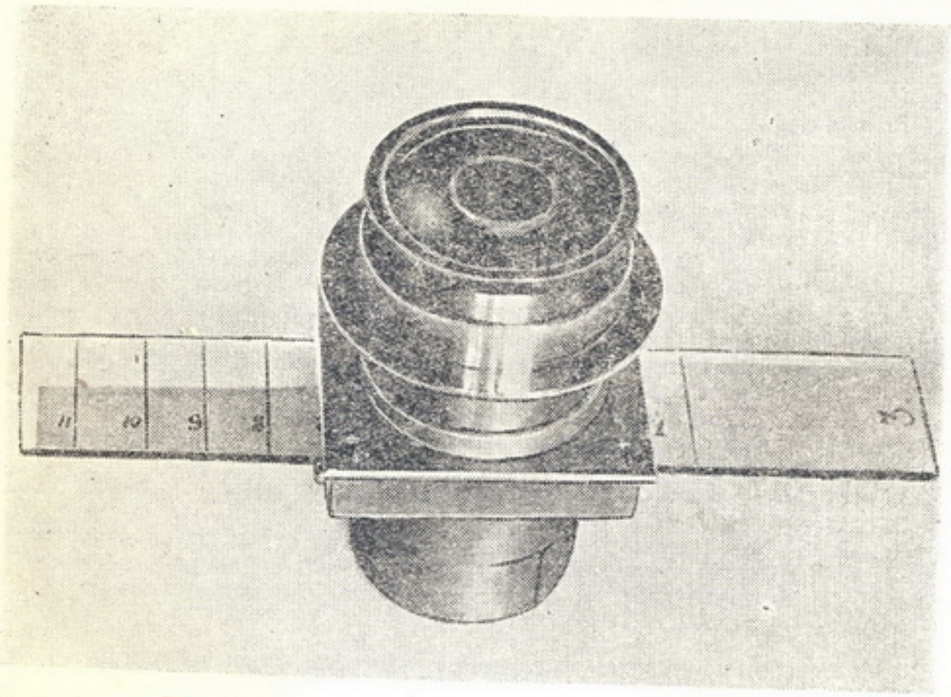


Рис. 18. Внешний вид фотометрического окуляра с затемняющей пластинкой.

Автор настоящего руководства рекомендует производить измерение отражательной способности рудных минералов путем сравнения их все время с одним и тем же эталоном—нерудным минералом. Все нерудные минералы имеют R=4—6%, в среднем около 5%. Нерудный минерал устанавливается под незатемненной половиной пластинки, рудный же—под ступенчатой его шкалой.

Вдвигая пластинку, мы компенсируем яркость рудного минерала до яркости нерудного. Точность определения отража-

тельной способности на описанном приборе составляет около 10% (относительных).

Внешний вид прибора изображен на рис. 18.

Подобный прибор был проверен и испытан автором настоящего руководства и рекомендуется им как простое и удобное приспособление для измерения показателя отражения рудных минералов.

Большое достоинство этого прибора заключается в том, что он может быть приспособлен к любому минераграфическому микроскопу.

УПРАЖНЕНИЯ

Ознакомление с показателем отражения

Для практической работы нужно иметь следующий набор полированных шлифов, служащих эталонами отражения [1].

Платина	70%	Буланжерит	37%
Железо	64%	Гематит	25%
Пирит	53%	Хромшпинелид	14%
Галенит	43%	Кварц	4%

Указанные минералы следует просмотреть под микроскопом с объективом 9× (№ 3) при одних и тех же условиях освещения и запомнить различие их показателей отражения по степени яркости. Путем сравнения с минералами-эталонами рекомендуется оценить отражение ряда распространенных минералов (арсенопирита, халькопирита, теннантита, магнетита, сфалерита и др.). Сравнение очень удобно производить на двух микроскопах, соединенных камерой Иностранцева; за неимением камеры можно пользоваться и одним микроскопом. Для этого нужно смонтировать на одном стекле рядом два полированных шлифа: один с минералом-эталоном, другой — с испытуемым минералом. Обе полированные поверхности должны находиться на одном уровне. Рассматриваемые под микроскопом участки на каждом шлифе следует обвести красной тушью. Пользуясь таким комбинированным препаратом, можно быстро менять в поле зрения микроскопа то испытуемый минерал, то минерал-эталон и сравнивать их показатель отражения.

Рекомендуется провести наблюдение изменения отражательной способности минералов при погружении их в кедровое масло на сфалерите и хромите при сухом объективе 9× (№ 3) и при иммерсионном объективе 12× (8 мм).

Измерение показателя отражения с помощью микрофотометра

Следует собрать прибор и произвести его первоначальную установку. Линзы объективов и призмы прибора должны быть чистыми. Нужно добиться равной освещенности двух половинок поля зрения в приборе, для чего первоначально на каждом из микроскопов следует произвести наблюдение за одним и тем же минералом. Затем на одном из микроскопов нужно установить эталонную платину, а на другом испытуемый минерал. Путем вращения николя-анализатора над платиной [2] нужно получить одинаковую освещенность (яркость) двух смежных половинок поля зрения прибора. Для определения угла поворота николя необходимо сделать не менее пяти отсчетов и взять из них среднее. Искомый показатель отражения определяется по углу вращения николя с помощью диафрагмы (см. рис. 13) или вычислением по формуле. Начинающим рекомендуется производить измерения на изотропных рудных минералах: пирите, галените, теннантите, сфалерите и др.

Если в минераграфической лаборатории имеется фотометрический окуляр, то желательно произвести измерение отражательной способности некоторых рудных минералов с этим прибором, познакомившись с описанием прибора на стр. 63.

Ознакомление с двуотражением

Изучение двуотражения, называемого также отражательным плеохроизмом, производится под микроскопом в поляризованном свете. Наблюдения в этом случае производятся только при одном николе-поляризаторе Освещение должно быть достаточно сильное и ровное.

Явление двуотражения заключается в том, что анизотропный минерал при одном николе при вращении столика микроскопа последовательно через 90° меняет свой цвет или яркость. Двуотражение более отчетливо выступает в масле при употреблении иммерсионных объективов.

Рекомендуется познакомиться по таблицам (глава XIII) и по описанию минералов (глава XIV) с минералами, имеющими очень высокое, высокое, слабое и очень слабое двуотражение. После этого следует провести наблюдение двуотражения под микроскопом у следующих минералов: молибденита, который в одном положении белый и имеет $R_0 = 31\%$, а в другом — серовато-белый и имеет $Re = 18\%$; ковеллина, который в одном положении темносиний, а в другом бледноголубой (с масляной иммерсией цвет ковеллина меняется и соответственно будет пурпурно-красный и зеленовато-белый); рассматривать ковеллин следует при сильном увеличении — объективы 20× или № 5, прикрывая диафрагму поля зрения (так как обычно он бывает очень мелкозернистый); антимонита, который изменяется в цвете от белого до серого; никелина, изменяющего цвет от желтоватого до розового.

Полезно также ознакомиться с двуотражением у киновари, пирротина, гётита и ильменита, которое выражено слабо и заметить его довольно трудно; наблюдение в этом случае следует производить с масляной иммерсией.

---

[1] В учебном наборе помещать серебро ($R = 95\%$) и медь ($R = 85\%$) не имеет смысла, так как они быстро окисляются и тускнеют и, кроме того, минералы с таким высоким отражением крайне редки.

[2] Если отражение минерала выше платины ($R > 70\%$), тогда следует вращать николь над минералом для затемнения его, такие случаи крайне редки

ГЛАВА VI

ЦВЕТ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Цвет является важным признаком для диагностики рудных минералов. По цвету в первую очередь различают в рудном микроскопе минералы между собой, многие из них определяют по этому признаку «на память».

Цвет рудных минералов всегда определяется при освещении их через опак-иллюминатор. Цвет минерала в белом падающем свете зависит от характера дисперсии отражательной способности, т. е. изменения отражательной способности при изменении длины волны падающего света. На рис. 19 даны кривые дисперсии для пирита и галенита.

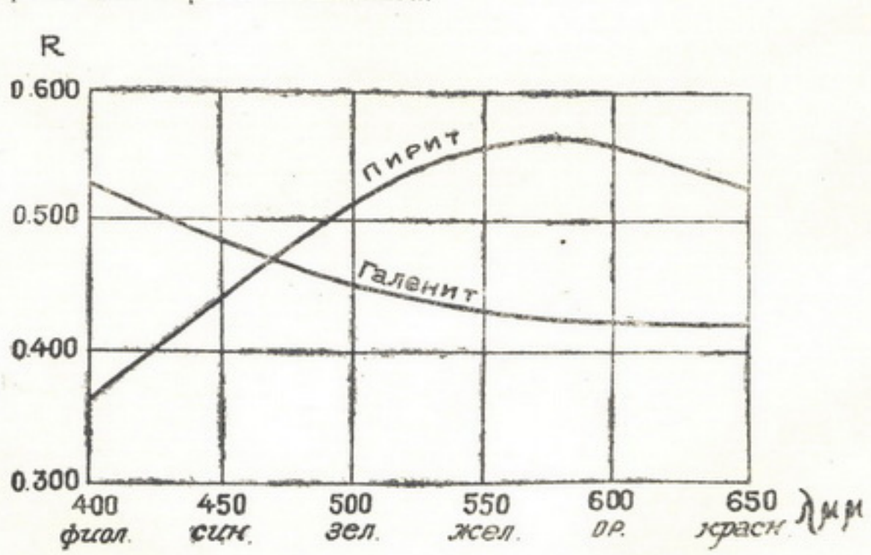


Рис. 19. Кривые дисперсии отражательной способности для пирита и галенита.

Кривая дисперсии для пирита показывает, что наибольшей отражательной способностью пирит обладает для желто-оранжевых лучей, а его отражательная способность для фиолетовых лучей резко понижается. Поэтому при освещении пирита белым светом будут видны отраженные от него главным образом желтые лучи — цвет пирита будет желтый. Кривая дисперсии для галенита показывает, что повышенной отражательной способностью галенит обладает в фиолетовых и синих лучах, которые мало чувствительны для глаза. Поэтому цвет галенита в белом свете будет белым, бесцветным.

В общем цвета рудных минералов, наблюдаемые в отраженном свете, — бледные, со слабыми оттенками, и их определение представляет значительные трудности.

Точно назвать оттенок цвета рудного минерала почти невозможно. Этим объясняется тот факт, что в различных определителях оттенок цвета одного и того же минерала дается различно.

Важно запомнить не название цвета минерала, как оно приведено в том или ином руководстве, а получить при рассмотрении минерала под микроскопом известное зрительное впечатление от его цвета и сохранить его в своей памяти. Учащийся должен хорошо знать (запечатлеть в памяти) цвета «пиритовый», «халькопиритовый», «борнитовый», «пирротиновый» и др. и уметь быстро по цвету узнавать эти обычные минералы под микроскопом в отраженном свете.

2. УСЛОВИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Цвета рудных минералов могут казаться различными от ряда условий.

Источник света. Цвет рудных минералов под микроскопом зависит от источника света. Так, например, при дневном естественном освещении заметен голубоватый оттенок, а при слабом накале электролампы преобладает желтый оттенок. Поэтому работа с минераграфическим микроскопом должна протекать при одном и том же освещении. При этом можно пользоваться обычной полуваттной электролампой в 50—70 вт, обязательно огражденной экраном (можно применять картонный экран с круглым отверстием в центре, прикрытым матовым стеклышком). Свет от лампы должен идти только в отверстие опак-иллюминатора, не падать сбоку на полированный шлиф и не светить в глаза наблюдателя.

Следует отметить, что боковой дневной свет вызывает появление синих рефлексов, которые по неопытности иногда принимают за цвет синего минерала (ковеллин).

Степень полированности рудных минералов. Чем совершеннее полированная поверхность рудных минералов, тем цвет их светлее. Так, например, слабо полированный медный блеск име-

ет голубоватый цвет, который при хорошей полировке переходит в почти белый. Цинковая обманка в плохо полированных шлифах имеет темносерый цвет, немногим отличающийся от цвета кварца, в хорошо полированных — светлоголубовато-серый. Так как многие рудные минералы быстро окисляются и тускнеют на воздухе и цвет их изменяется (например, самородной меди, халькопирита, борнита, галенита и др.), полированные шлифы время от времени необходимо подполировывать.

Окружение исследуемого минерала другими цветными минералами. Суждение о цвете минерала зависит от окружающего этот минерал фона. Так, например, сфалерит среди темного в отраженном свете кварца кажется светлосерым. Тот же сфалерит в окружении белого галенита будет заметно темнее. Хромит среди темного серпентина кажется светлосерым, но рядом с яркой белой платиной хромит выглядит совсем темным. Магнетит один кажется серым, а если в нем включены белые полоски гематита, он приобретает заметный красноватый оттенок.

Химический состав минералов. Многие минералы не имеют постоянной химической формулы. Это особенно относится к изоморфным соединениям, как, например, блеклые руды, золото и др. Цвет таких минералов, естественно, будет несколько варьировать.

Условия наблюдения под микроскопом. Цвет минералов под микроскопом при сухой (воздушной) системе и при иммерсионной (масляной) системе объективов различен. Оттенки цвета минералов значительно легче наблюдать с маслом, так как в этом случае они выступают резче. Так, например, с масляной иммерсией легко отличить магнетит от ильменита (розовый оттенок у магнетита и красновато-бурый — у ильменита) и оба эти минерала — от серо-белого гематита.

Определение цвета минералов усложняется явлением сильного двуотражения (плеохроизма), которое свойственно некоторым минералам.

3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Сравнение с эталонным галенитом и другими минералами. Галенит, имеющий довольно чистый белый цвет, часто применяется как эталон для сравнения. Для этого под микроскопом находят два соприкасающихся минерала, из которых один должен быть испытуемым минералом, а другой — галенитом. Если такую пару в полированном шлифе обнаружить не удается, делают двойной полированный шлиф из испытуемого минерала и галенита, пришлифовывая их так, чтобы они сомкнулись. После этого их монтируют вместе на одном стеклышке и рассматривают под микроскопом.

Сопоставление цвета минерала с галенитом наиболее удобно наблюдать в сравнительной камере Иностранцева, называемой также сравнительным окуляром. Последний представляет собой коленчатую трубку с четырьмя прямоугольными призмами и одним окуляром (рис. 20). Центральные призмы можно

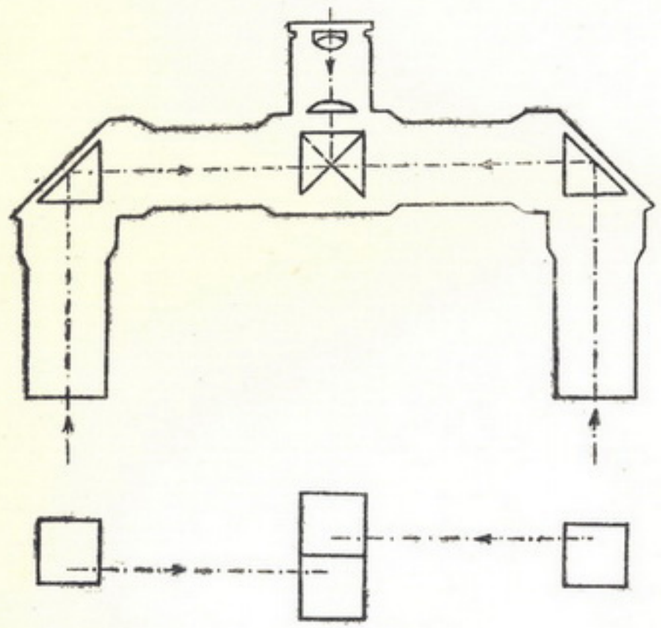


Рис. 20. Сравнительная камера Иностранцева, служащая для оценки цвета или отражения минералов. Вверху — продольный разрез прибора, внизу — расположение призмы в плане. (Схема).

передвигать при помощи рычажка, находящегося снизу прибора, благодаря чему возможно рассматривать полное поле зрения какого-либо одного микроскопа в отдельности. Окуляр в этом приборе можно применять любой силы, но нужно учитывать, что при перемене окуляров произойдет сдвиг изображения и потребуется снова наводка на фокус. Камера надевается на два одинаковых микроскопа (с одинаковыми объективами) вместо их окуляров. Освещение микроскопов должно быть вполне однородным. На столике одного из микроскопов помещается полированный шлиф с испытуемым минералом, а на другом — эталонный галенит. В окуляре сравнительной камеры сводятся изображения от двух микроскопов. Одна половина поля зрения будет занята испытуемым минералом, а другая — галенитом. Сравнение их цветов производить очень удобно.

С помощью описанного прибора можно производить также сопоставление цвета неизвестного определяемого минерала с

цветами минералов-эталонов. Сравнительный окуляр может быть использован также и для определения показателя отражения рудных минералов (см. главу V).

Заводом «Прогресс» в Ленинграде выпущен сравнительный микроскоп МИС-10, предназначенный для криминологических исследований. Но этот микроскоп может быть успешно применен для исследования руд как в отраженном, так и в проходящем свете.

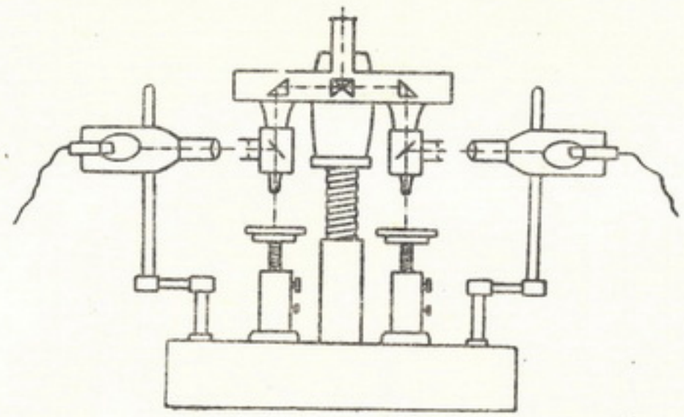


Рис. 21. Микроскоп для сравнения МИС-10 завода «Прогресс» 0,17 натуральной величины.

Для использования микроскопа МИС-10 в практике минераграфии следует вывернуть из него объективы и вместо них поставить опак-иллюминаторы (можно простые типа ОИ-1). Объектив, как и всегда, ввертывается в нижнюю часть опака.

Далее, выравнивается свет в обоих микроскопах и производится сравнение минералов обычным путем.

Микроскоп снабжен высококачественной оптикой и очень удобен в работе.

Схематическое изображение сравнительного микроскопа МИС-10 представлено на рис. 21.

Сравнение с серебряным (или платиновым) зеркальцем. Этот метод был предложен Ван-дер-Вином. На покровное стеклышко наносят тонкий слой серебра (получается зеркальце). Чтобы серебро не тускнело от окисления, его смазывают канадским бальзамом. Острой иглой делают в серебряном слое отверстия, кладут зеркальце серебряным слоем вниз на полированный шлиф, и через эти отверстия рассматривают в микроскоп определяемые минералы, сравнивая их цвета с белым цветом окружающего минералы серебра. Отверстия можно сделать очень маленькими, что даст возможность рассматривать даже обособленные, очень небольшие зерна.

Недостаток этого метода заключается в том, что серебряный слой окисляется, зеркальце тускнеет и цвет его меняется.

Автором настоящего руководства этот метод несколько изменен. Вместо серебряного зеркальца он рекомендует употреблять тонкую платиновую пластинку, верхняя поверхность которой отполирована. Цвет платины белый и постоянный, так как платина не окисляется.

В общем метод сравнения цвета минералов с зеркальцем является наиболее простым и поэтому часто применяется в практике минераграфических исследований.

УПРАЖНЕНИЯ

Ознакомление с эталонной коллекцией

Ознакомление с цветами рудных минералов рекомендуется начать с просмотра под микроскопом набора полированных шлифов следующих минералов, являющихся эталонами основных цветов:

1) галенит — белого;
2) тетраэдрит (теннантит) — серовато-белого;
3) сфалерит — серого;
4) кварц — темносерого;
5) пирит — светложелтого;
6) халькопирит — желтого;
7) пирротин — кремового;
8) борнит — розового;
9) ковеллин — синего.

Главные цвета следует запомнить

Каждый полированный шлиф перед просмотром протирается суконкой или замшей.

Сопоставление цвета минералов

Рекомендуется под микроскопом при объективе 9× (№ 3) и при тщательно установленном опак-иллюминаторе проследить и различить по цвету следующие ассоциации минералов:

1) галенит и блеклая руда;
2) сфалерит и блеклая руда;
3) пирит и арсенопирит;
4) пирротин и пентландит;
5) магнетит и сфалерит;
6) магнетит и хромит.

Уловить оттенки цвета слабо и неясно окрашенных минералов рекомендуется путем сравнения их в камере Иностранцева с белым галенитом. Это нужно сделать для следующих минералов: марказита, пентландита, кобальтина, малахита, киновари, куприта, буланжерита, станнина.

При выполнении этого упражнения следует пользоваться справочными таблицами цвета или описаниями минералов и фиксировать результаты наблюдения в рабочую тетрадь.

Применение серебряного или платинового зеркальца

Суждение о цвете довольно относительно. Правильную оценку цвета можно сделать лишь при рассмотрении минералов под микроскопом на одном и том же стандартном фоне. Таковым является белое серебряное или платиновое зеркальце. Особенно важно применение зеркальца для группы слабо окрашенных минералов.

Находят под микроскопом, поставленным вертикально, при объективе 9× (№ 3) или 3,7× (№ 1) исследуемый минерал. Накладывают на полированный шлиф зеркальце и осторожно спичкой пододвигают его к рассматриваемому под микроскопом участку. Далее можно поступить двояко: или прикрыть зеркальцем половину поля зрения микроскопа, что рекомендуется при крупнозернистой руде, или закрыть поле зрения целиком и рассматривать зернышко через отверстие и зеркальце. Точно в фокусе зеркальце и минерал одновременно находиться не будут, поэтому при просмотре приходится попеременно наводить на фокус микрометренным винтом или то, или другое. Рекомендуется просмотреть попеременно без зеркальца и с зеркальцем следующие минералы:

1) блеклую руду (теннантит и тетраэдрит);
2) цинковую обманку;
3) хромит (хромшпинелид);
4) кобальтин;
5) куприт;
6) нерудный минерал (кварц, карбонат).

ГЛАВА VII

ВНУТРЕННИЕ РЕФЛЕКСЫ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прозрачные или полупрозрачные минералы при наблюдении их под микроскопом в отраженном свете часто имеют цвет, которым они просвечивают в тонких пластинках или осколках. Это явление, обусловленное проникновением на некоторую глубину падающего на минерал света и отражением его от внутренних частей минерала, называется внутренним рефлексом.

Степень прозрачности рудных минералов находится в обратной зависимости от поглощения (абсорбции) света, а следовательно, и от отражательной способности. Минералы с высоким показателем отражения ($R>40\%$), как правило, не имеют внутренних рефлексов; минералы с умеренным показателем отражения ($R = 20—40\%$) часто имеют внутренние рефлексы; минералы с низким показателем отражения ($R<20\%$) почти все обладают сильными внутренними рефлексами.

Внутренние рефлексы вызываются трещинами спайности, выбоинками, ямками и включениями в минерале. Они выступают также на границах зерен. Для сильно двупреломляющих минералов внутренние рефлексы и их границы кажутся сдвоенными (например, у сидерита).

Внутренние рефлексы редко наблюдаются по всей поверхности минерала, видимого под микроскопом; они обычно выступают в виде отдельных пятнышек или даже точек. Интенсивность цвета внутренних рефлексов в различных участках минерала или минерального агрегата обычно не одинакова, что объясняется различными условиями освещения.

Для диагностики минералов имеет такое же значение, как и цвет внутренних рефлексов, цвет порошка минерала.

Для диагностики прозрачных или полупрозрачных минералов цвет внутренних рефлексов является очень важным.

2. УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЦВЕТА ВНУТРЕННИХ РЕФЛЕКСОВ И ЦВЕТА ПОРОШКА

Обычно внутренние рефлексы наблюдаются при косом свете. Для этого требуется закрыть картонкой отверстие опак-иллюминатора и направить на полированный шлиф сбоку свет от электролампы. Рефлексы будут более резкими, если призму опак-иллюминатора заменить стеклянной пластинкой. Наблюдение внутренних рефлексов обычно производится при объективе 9× (№ 3). Свет при этом должен быть сильным. Для этой цели удобны описанные выше осветители (рис. 7). В случае работы с осветителями, наглухо прикрепленными к опак-иллюминатору, необходимо вынуть лампочку из осветителя и осветить ею полированную поверхность шлифа.

Внутренние рефлексы заметны также в поляризованном свете при скрещенных николях, причем они могут быть настолько сильными, что эффект анизотропии становится невидимым. Внутренние рефлексы хорошо видны при работе с масляно-иммерсионными объективами и обычном освещении через опак-иллюминатор. Наиболее ярко внутренние рефлексы выступают с масляной иммерсией в поляризованном свете при скрещенных николях.

Еще более чувствительным методом изучения внутренних рефлексов является метод наблюдения порошка минерала с масляной иммерсией. Для этого стальной или алмазной иглой царапают минерал и получают некоторое количество тонкого порошка минерала; затем сразу же это место исследуют под микроскопом с иммерсионным объективом.

Наблюдение внутренних рефлексов удобно производить при употреблении так называемых всесторонних осветителей. К ним относятся иллюминатор Сильвермана, ультропак Лейтца и др.

Иллюминатор Сильвермана состоит из лампочки накаливания, имеющей вид кольцевой трубочки. Эта трубочка прикреплена к металлическому зеркалу, имеющему форму полушара. Прибор прикрепляется к оправе объектива со средним или слабым увеличением.

Ультропак Лейтца дает всестороннее косое освещение в светлом и темном поле. Этот прибор позволяет не только наблюдать внутренние рефлексы, но и производить глубинные микросъемки. Подробное описание этих приборов приведено в книге Л. И. Цукерман «Руководство к микрофотографированию» (1936 г.).

При изучении внутренних рефлексов начинающие обычно допускают следующие ошибки: принимают голубые блики дневного света, видимые у твердых рельефных минералов, за голубой рефлекс; при скрещенных николях иногда смешивают цвет внутренних рефлексов с цветом характерной окраски анизотропного минерала; при наблюдении царапины ошибочно

принимают за рефлекс интенсивные бесцветные блики на кромках борозды; принимают за рефлекс совершенно прозрачные минералы (например, кварц), которые имеют иногда яркие, радужные цвета, возникшие вследствие разложения пучка белых лучей.

При наблюдении внутренних рефлексов в косом свете нельзя прикрывать отверстие опак-иллюминатора пальцем: это может вызвать появление красной окраски минералов (цвет крови), которая обычно принимается новичками за рефлекс и маскирует истинный рефлекс минерала.

УПРАЖНЕНИЯ

Ознакомление с внутренними рефлексами

Предварительно следует ознакомиться с цветами внутренних рефлексов минералов по приводимым ниже таблицам и описаниям минералов. Далее рекомендуется просмотреть под микроскопом в вертикально отраженном и в косом свете набор минералов, имеющих внутренние рефлексы.

Для каждого из просмотренных минералов в тетради нужно отметить: а) цвет в вертикально отраженном свете и б) внутренний рефлекс в косом свете.

Так как рефлекс виден не всегда, то для каждого минерала надо просмотреть по нескольку зерен, вращая столик микроскопа.

Необходимо обратить внимание на то, что нерудные минералы имеют в общем светлые и часто иризирующие рефлексы.

Рекомендуем следующий список минералов для наблюдения внутренних рефлексов: малахит, аурипигмент, гётит, сфалерит, сидерит, реальгар, гематит, киноварь, куприт, кальцит, кварц, оливин.

Для минералов, у которых внутренние рефлексы при косом свете наблюдать трудно, наблюдения проводятся с масляной иммерсией в поляризованном свете при скрещенных николях. Это следует сделать для хромита, вольфрамита и гематита.

Наблюдение цвета порошка

Работа производится при объективе 3,7× (№ 1). С помощью стальной иглы получают порошок минерала, у которого очень трудно видеть рефлекс в обычных условиях. Определяют рефлекс этого минерала, наблюдая с иммерсионным объективом его порошок по краям царапинки или ямки.

ГЛАВА VIII

ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ ПРИ СКРЕЩЕННЫХ НИКОЛЯХ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Применение поляризованного света в петрографии имеет исключительное значение. Почти все константы прозрачных минералов определяются в поляризованном свете. При минераграфических исследованиях роль поляризованного света менее значительна вследствие сложности происходящих здесь оптических явлений и недостаточной отчетливости наблюдаемых под микроскопом изображений.

Наблюдение явлений анизотропии в рудном микроскопе затрудняется возникновением эллиптически поляризованного света при отражении световых лучей от полированной поверхности минерала. Предположим, что обыкновенный свет, отражаясь от какой-то среды, разделяется на два луча, поляризованных в плоскостях взаимно перпендикулярных. Колебания этих лучей одновременны, и разделить их нельзя. В этом случае возможны три типа поляризованного света:

1. Прямолинейно поляризованный, когда оба составляющие колебания не имеют разности хода или она равняется целому числу полуволн.

2. Поляризованный по кругу, когда амплитуды двух составляющих колебаний одинаковы и разность хода равна $^1/_4\ \lambda$, $^3/_4\lambda$, $^5/_4\ \lambda$ и т. д. (λ—длина волны).

3. Эллиптически поляризованный, когда разность хода двух составляющих колебаний отличается от целого числа полуволн.

Луч, прямолинейно поляризованный, при вращении анализатора даст попеременно полную темноту и максимум света.

Луч, поляризованный по кругу, при вращении анализатора даст равномерную освещенность.

Луч, эллиптически поляризованный, при вращении анализатора даст попеременно неполное затемнение и просветление.

Таким образом, в результате наложения явлений эллиптической поляризации, которое постоянно наблюдается в минераграфическом микроскопе, нельзя получить при скрещенных николях чередований полной темноты и полного освещения.

Явление анизотропии, наблюдаемое в отраженном свете, может быть выражено формулой. При перпендикулярном падении света на полированную поверхность минерала интенсивность R при скрещенных николях выразится следующим равенством:

$$R = (\mathrm{Sin}^2 2\varphi + \mathrm{tg}^2\ 2\theta)\ f, \qquad (4)$$

в котором

$$f = n^2_{\circ}\ \frac{(n_1 - n_2)^2 + (n_1 x_1 - n_2 x_2)^2}{[(n_{\circ} + n_1)^2 + n_1^2 x_1^2]\ [(n_{\circ} + n_2)^2 + n_2^2 x_2^2]}. \qquad (5)$$

Здесь

φ — азимут линейного колебания в минерале по отношению к направлению колебаний в поляризаторе;

θ — эллиптичность колебаний, если принять отношение главных осей эллиптического колебания $a : b = \mathrm{tg}\ \theta$;

$n_{\circ}$ — показатель преломления окружающей среды (воздух, масло);

n_1 и n_2 — показатели преломления минерала в направлении нормали;

x_1 и x_2 — коэффициенты абсорбции в направлении нормали.

Минимальное значение интенсивности будет при нормальных положениях минерала ($\varphi = 0$ или 90°):

$$R_{min} = f\ \mathrm{tg}^2\ 2\theta \qquad (6)$$

Максимальное значение интенсивности будет при диагональных положениях минерала ($\varphi = \pm 45°$):

$$R_{max} = f\ (1 + \mathrm{tg}^2\ 2\theta)\ . \qquad (7)$$

Вычитанием уравнения (6) из уравнения (7) получим:

$$R_{max} - R_{min} = f\ . \qquad (8)$$

Фактор f характеризует величину явления анизотропии и представляет собой максимальную разность интенсивностей, наблюдаемую при полном повороте минерала.

Из формулы (5) видно, что анизотропия будет тем больше, чем больше двойное лучепреломление n_1—n_2, чем сильнее дихроизм n_1x_1—n_2x_2 и чем больше показатель преломления среды $n_{\circ}$. Последнее также может служить объяснением то-

го, почему с масляной иммерсией поляризация выступает резче.

Из уравнения (6) следует, что полная темнота в нормальных положениях минерала ($\varphi = 0$ или 90°) наступает только тогда, когда падающие на полированный шлиф волны линейно поляризованы, т. е. когда эллиптическая поляризация отсутствует и, значит, $\theta = 0$.

2. АППАРАТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ

Изучение явлений поляризации должно происходить при усиленном освещении. Дневной свет и слабые электролампы в этом случае непригодны. Для минералов, у которых явления анизотропии выражены сильно, достаточен свет от электролампы в 50—70 вт. Лампа устанавливается так, чтобы ее накаленная нить находилась против николя (поляризатора), причем полированный шлиф должен быть изолирован от боковых световых лучей. Для минералов слабо анизотропных применяется сильная лампа с концентрированным светом. Для этого вполне подходит вышеописанный осветитель, изображенный на рис. 7.

При наблюдении слабого явления анизотропии иногда применяют вольтову дугу. Предварительно при обыкновенном освещении отыскивают объект для наблюдения. Затем устанавливают приборы следующим образом. Микроскоп приводят в вертикальное положение. Перед отверстием опак-иллюминатора (перед поляризатором) ставят водяной охладительный фильтр, за которым устанавливают вольтову дугу. Вольтова дуга включается в сеть с помощью реостата. Угли дуги смыкаются и затем разводятся на расстояние до 3—4 мм. Смотреть на накаленные угли можно только через темное стекло.

Наблюдения с вольтовой дугой рекомендуется производить только при скрещенных николях. При выключении анализатора свет дуги нужно ослабить путем наложения на окуляр микроскопа затемненного стеклышка.

Установка микроскопа для наблюдения явлений поляризации сводится к следующему (см. рис. 1, 2, 3).

В отверстие опак-иллюминатора вставляют николь-поляризатор [1]. Плоскость колебания поляризованного света, прошедшего через поляризатор, должна быть строго параллельна плоскости падения света в призме, т. е. плоскость поляризации должна совпадать с плоскостью симметрии опак-иллюминатора. В микроскопах завода «Русские самоцветы» николь-анализатор неподвижный, поэтому для правильной установки николя-поляризатора следует поставить его в положение скрещения. Если это условие не выполнено, то достаточной темноты в микроскопе при скрещенных николях получить не удастся.

После установки николя-поляризатора обычным путем устанавливают опак-иллюминатор. Диафрагма должна быть прикрыта. Наблюдения лучше производить при слабых или средних объективах—9×, 21× (№ 1 и 3). При объективах 40×, 62× (№ 5 и 6) явление анизотропии заметить труднее.

Включают анализатор, при этом наводка на фокус микроскопов завода «Русские самоцветы» не изменится. Для скрещения николей в центр поля зрения вводят какой-либо изотропный светлый минерал (пирит, галенит), и вращают николь-поляризатор до наибольшего затемнения минерала. Полной темноты, как это было отмечено выше, не получится. Для лучшей видимости явления анизотропии при скрещенных николях следует пользоваться апертурной диафрагмой, ограничивающей конус лучей от источника света, и прикрывать часть поля зрения диафрагмой поля зрения. Микроскоп перед началом наблюдения должен быть точно центрирован.

3. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для наблюдения эффекта анизотропии нужно добиться, чтобы свет был ровным и сильным. При этом опак-иллюминатор и николи должны быть установлены правильно, диафрагмы прикрыты, линзы объективов и окуляров чисты.

Наблюдения можно производить как при строго скрещенных николях, так и при неполном их скрещении.

Если николи скрещены полностью, то при вращении столика микроскопа угасание анизотропного минерала будет происходить точно через 90° в нормальных положениях (т. е. параллельно нитям креста в окуляре). В диагональных положениях (отстоящих от нормальных на 45°) минерал будет просветляться. Таким образом, при полном обороте столика микроскопа анизотропный минерал четыре раза угаснет и просветлится.

Если николи скрещены не полностью, то при полном обороте анизотропного минерала также возникнут четыре угасания, но азимуты их не будут следовать за интервалами в 90°. Отклонения от 90° в обе стороны равны одному и тому же углу, величина которого возрастает с увеличением ошибки в установке николей. Неправильная установка николей приводит даже к тому, что иногда наблюдаются только два положения темноты через 180°.

На практике при не вполне скрещенных николях наблюдаются слабо анизотропные минералы. Неполнота скрещения

[1] В микроскопах МП-5 завода «Русские самоцветы» и Мин-6 завода «Прогресс» николь-поляризатор постоянный.

достигается небольшим поворотом поляризатора или анализатора в ту или другую сторону после предварительной установки на скрещение. Угол этого поворота рекомендуется устанавливать путем наблюдения халькопирита с двойниковыми полосками. Николь поворачивают до тех пор, пока не получится максимальная разница в цвете соприкасающихся полосок.

Большое значение имеет выбор объекта наблюдения. Не следует наблюдать поляризацию у крупных единичных зерен. Заметить явления анизотропии у такого зерна очень трудно, так как нельзя наблюдать контакт между осветленной и затемненной частями — такое зерно все просветляется и угасает одновременно. Также неблагоприятны для наблюдений явлений анизотропии очень мелкозернистые (тонкозернистые) агрегаты, в которых угасание и просветление отдельных точечных зернышек будет сливаться. Лучше всего производить наблюдения анизотропии, если в поле зрения одновременно находится несколько зерен минерала. Кроме того, необходимо помнить, что и анизотропные минералы имеют изотропные сечения. Поэтому нельзя ограничиваться исследованием только одного сечения зерна, наблюдаемого в полированном шлифе.

Явление анизотропии значительно отчетливее наблюдается с масляно-иммерсионными объективами. Поэтому когда возникает сомнение при наблюдении анизотропии с сухим объективом, необходимо проверить наблюдение с объективом иммерсионным.

По отношению к поляризованному свету минералы разделяют на изотропные, слабо анизотропные, сильно анизотропные.

Изотропные минералы при полном обороте столика микроскопа остаются тусклыми или равномерно окрашенными. Полной темноты при вращении этих минералов получить нельзя, так как в результате эллиптической поляризации некоторая часть света проходит через анализатор. Чтобы убедиться, что минерал изотропный, нужно повторить наблюдение с сильным светом вольтовой дуги или специальной лампы.

Некоторые минералы кубической сингонии иногда показывают аномальную анизотропность. Это изредка наблюдается у пирита, кобальтина, борнита, куприта (подобные явления нередки и у прозрачных минералов — лейцита, гранатов).

Важнейшие рудные минералы этой группы следующие: галенит, пирит, сфалерит, блеклые руды, магнетит, хромит.

Слабо анизотропные минералы. Явление анизотропии у этих минералов отчетливо заметно при сильном освещении. Двуотражение, наблюдаемое при одном поляризаторе, заметно крайне редко.

Важнейшие рудные минералы, относящиеся к этой группе: халькопирит, айкинит, бурнонит, вуртцит, браунит, вольфрамит.

Сильно анизотропные минералы (рис. 22). Явление анизотропии для минералов этой группы можно наблюдать при све-



Рис. 22. Поведение сурьмяного блеска в поляризованном свете при скрещенных николях. Отдельные зерна этого минерала в различные моменты просветления и угасания. Увеличение 30×.

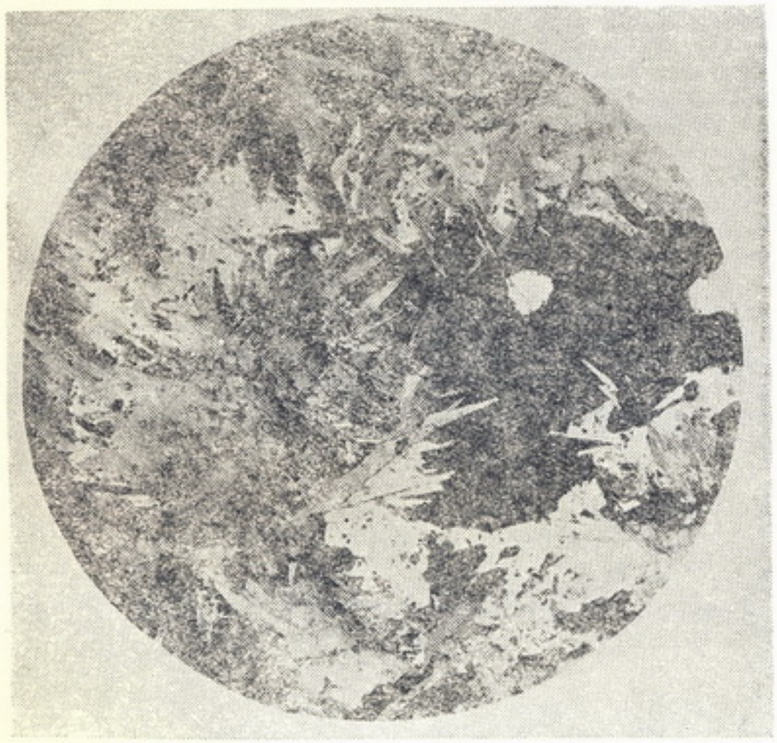


Рис. 23. Двуотражение, наблюдаемое у молибденита в поляризованном свете при одном николе-поляризаторе.
Белые и серые пластинки радиальнолучистых агрегатов — молибденит; белый с черными точками — пирротин; черный — нерудный.
Увеличение 20×.

те обычной (50—70 вт) электролампы. При сильном свете и скрещенных николях цветной эффект легко различается вблизи нормальных положений минерала.

Двуотражение для сильно анизотропных минералов обычно наблюдается вполне отчетливо (рис. 23).

Важнейшие рудные минералы этой группы: ковеллин, молибденит, стибнит, марказит, пирротин, арсенопирит, никелин.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

При наблюдениях явлений поляризации легко допустить ошибки и принять изотропный минерал за анизотропный или наоборот. Эти ошибки могут возникнуть при следующих обстоятельствах:

1. Неровная поверхность минерала с ямками, выбоинками и штрихами может дать при повороте столика микроскопа затухания и просветления. Поэтому полированные шлифы должны быть высокого качества.

2. Косо монтированный полированный шлиф будет просветляться и угасать при вращении столика через 180°. Поэтому необходим точный монтаж полированных шлифов прессом.

3. Естественные косо наклоненные грани кристалла (например, пирита) будут угасать и просветляться через 180° (рис. 24).

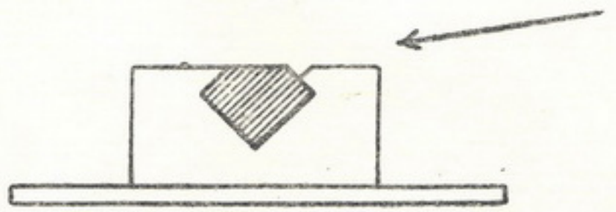


Рис. 24. Полированный шлиф с кристаллом пирита, естественная грань которого обнажена. При косом освещении у такого пирита обнаруживается ложная анизотропия (схематический рисунок).

4. Анизотропные минералы имеют изотропные сечения, поэтому одного наблюдения недостаточно, нужно повторить наблюдение на двух-трех зернах.

5. При слабом свете или при небрежной установке опак-иллюминатора и николей явления анизотропии у минерала можно не заметить.

6. У некоторых минералов при скрещенных николях выступают очень резкие внутренние рефлексы, которые маскируют явления анизотропии.

7. Объективы (особенно сильные) и призма опак-иллюминатора сами могут являться источником эллиптической поляризации.

8. По мнению некоторых исследователей, в процессе полирования (особенно на тканях) минералы покрываются аморфной пленкой, маскирующей анизотропность минерала. Поэтому при изготовлении полированных шлифов надо тщательно доводить последние на стекле, чтобы сократить время полирования на суконном круге. Полированные шлифы для наблюдения явлений поляризации лучше изготовлять по методу безрельефного полирования.

УПРАЖНЕНИЯ

Установка микроскопа для наблюдения явлений поляризации

Работа производится с объективом 9× или № 3. Сначала нужно тщательно отрегулировать свет. Явление анизотропии рекомендуется наблюдать при сильном свете. Для этого лучше пользоваться специальным осветителем, но можно пользоваться и обычной 50—70-ваттной лампой, которую необходимо установить так, чтобы световая нить ее была против трубочки с николем в опак-иллюминаторе. Затем нужно тщательно отгородиться картонным экраном от бокового света. Микроскоп лучше поставить вертикально. Далее производятся наводка на фокус, установка опак-иллюминатора и тщательная центрировка микроскопа (без этого наблюдения в поляризованном свете невозможны). Диафрагма должна быть прикрытой. Николи скрещиваются путем вращения поляризатора до наибольшего затемнения какого-нибудь изотропного минерала. После скрещения николей необходимо удалить рассеивающее свет матовое стекло.

Ознакомление с сильно анизотропными минералами

Предварительно рекомендуется ознакомиться с сильно анизотропными минералами по сводным таблицам (глава XIII) и соответствующим микрофотографиям настенных таблиц.

Для наблюдения на столик микроскопа нужно установить полированный шлиф с сильно анизотропным минералом. Просматривая ряд сечений минерала, нужно выбрать такое, в котором явление анизотропии выражено наиболее резко. Вращают столик микроскопа и в это время записывают замеры (в градусах) для положений затемнения и просветления, а также отмечают цвета, которые наблюдаются вблизи нормальных положений минерала. Затем выключается анализатор и наблюдается двуотражение (отражательный плеохроизм).

Таким путем рекомендуем просмотреть следующие минералы: молибденит, ковеллин, стибнит, марказит, пирротин, арсенопирит, никелин, пиролюзит, графит.

Ознакомление со слабо анизотропными и изотропными минералами

Предварительно нужно ознакомиться с этими минералами по сводным таблицам (глава XIII).

Для наблюдения устанавливается микроскоп с сильным источником света. Рекомендуется просмотреть при скрещенных николях следующие минералы: халькопирит, халькозин, вольфрамит (из слабо анизотропных) и сфалерит, блеклую руду, хромит, пирит, самородную медь (из изотропных).

Рекомендуется просмотреть с масляной иммерсией несколько слабо анизотропных минералов.

Все проведенные наблюдения должны быть записаны в тетрадь.

ГЛАВА IX

ТВЕРДОСТЬ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Твердость минералов обычно определяется методом царапания и измеряется по шкале Мооса. Эта шкала не является совершенной, так как интервалы между ее ступенями не равнозначны. Поэтому при точном определении твердости этой шкалой не пользуются, а выражают твердость нагрузкой (в граммах) на острие алмаза.

Твердость минерала часто не однозначна по разным направлениям, т. е. является величиной векториальной.

Кроме того, следует отметить, что результаты измерения твердости для некоторых веществ могут различаться в зависимости от определения ее различными методами.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

В минераграфии твердость определяется следующими методами:

1) по характеру полированной поверхности;
2) по рельефу, распознаваемому по светлой линии;
3) по рельефу, распознаваемому путем косого освещения;
4) по абразивным штрихам;
5) металлическими иглами;
6) минералами шкалы Мооса;
7) микросклерометром Талмеджа;
8) вдавливанием с помощью прибора Хрущева и Берковича.

По характеру полированной поверхности. Характер полированной поверхности различен для разных минералов. Способность минералов принимать полировку зависит главным образом от их твердости, хотя большое значение при этом имеют и другие свойства: хрупкость, ковкость, спайность. Обычно минералы более твердые имеют неровную, шероховатую поверхность, на которой заметны ямки и глубокие незаполированные штрихи. Таковы, например, пирит, касситерит, хромит. Лучше других полируются минералы средней твердости: сфалерит, халькопирит, блеклая руда. Некоторые мягкие минералы (молибденит) размазываются при полировании, и из них трудно получить хороший полированный шлиф.

Минералы, обладающие весьма совершенной спайностью, как, например, галенит, обнаруживают под микроскопом характерные треугольные ямки, которые образуются от выкрашивания осколков минерала по спайности.

У мономинеральных агрегатов, особенно твердых минералов, при несовершенной полировке можно наблюдать их структуру: в то время как одни зерна уже совершенно гладкие, другие, иначе ориентированные, будут еще шероховатыми. Подобное явление характерно для руд хромита и титано-магнетита.

Если поверхность минерала отполирована безупречно, то все зерна будут одинаково гладкими и строение агрегата можно различить только в поляризованном свете или с помощью травления.

При полировании на сукне более мягкие минералы стираются скорее и образуют впадинки, в то время как твердые минералы выступают в виде островков. Границы последних чаще всего не вертикальные, а полого закругленные, вследствие чего падающий на эти наклонные поверхности свет из опак-иллюминатора отражается в сторону и границы представляются под микроскопом в виде черного ободка. Такие черные ободки обычно окружают очень твердые минералы, например пирит, касситерит, хромит и др.

Точно также находящиеся среди твердых мягкие минералы имеют черные ободки или колечки.

По рельефу, распознаваемому по светлой линии. Если разница в твердости двух соприкасающихся минералов небольшая, то черный ободок между ними узкий и почти незаметен для глаза, но при поднятии тубуса микроскопа со стороны минерала более твердого параллельно теневой кайме идет узенькая светлая каемочка. Эту каемочку (светлую линию) хорошо видно при объективах 40×, 20× (№ 5) и при слабом окуляре (6×). С масляной иммерсией светлая линия незаметна. Таким образом, при поднятии тубуса микроскопа микрометренным винтом светлая линия перемещается от минерала более твердого к минералу более мягкому; при опускании тубуса — наоборот.

В микроскопах МП-4 завода «Русские самоцветы» тубус неподвижный, а перемещается столик микроскопа. Поэтому при работе на указанных микроскопах, наоборот, при поднятии столика микроскопа микрометренным винтом светлая линия перемещается от ми-

нерала более мягкого к минералу более твердому.

При помощи описанного метода можно различить минералы, имеющие близкую твердость, как, например, халькопирит и сфалерит.



Рис. 25. Теневые каймы вокруг твердого минерала — пирита. Серая основная масса — сфалерит.
Увеличение 20×.

Видимость светлой линии значительно улучшается, если апертурную диафрагму перед опак-иллюминатором сомкнуть до минимального отверстия. Если у осветителя апертурной диафрагмы нет, ее можно легко сделать самому. Для этого нужно взять тонкий листик латуни или жести и проколоть в нем круглое отверстие диаметром около 1 мм. Это приспособление помещается между осветительной лампочкой и опак-иллюминатором. При этом нужно следить за тем, чтобы свет и апертурная диафрагма были точно центрированы.

Метод определения твердости минерала по светлой линии особенно ценен тем, что он позволяет определять твердость минералов в мельчайших зернах, размером в сотые и даже в тысячные доли миллиметра.

По рельефу, распознаваемому путем косого освещения. Этот метод И. С. Волынский рекомендует применять для минералов с резко различной твердостью, у которых наблюдать светлую линию не удается. Косое освещение создается путем слабого сдвига призмы опак-иллюминатора и лампочки осветителя. В результате происходит концентрация света на одной стороне выпуклых или вогнутых выделений и появление тени на противоположной стороне. Сначала характер рельефа определяют по двум минералам, относительный рельеф которых известен, или на границах пустот выкрашивания, имеющих отрицательный рельеф. При косом освещении выпуклости на полированном шлифе освещены (или затемнены) с одной стороны, а вогнутости — с противоположной (рис. 26). Определив характер освещения рельефа, приступают к сравнительной оценке его в определяемом минерале.

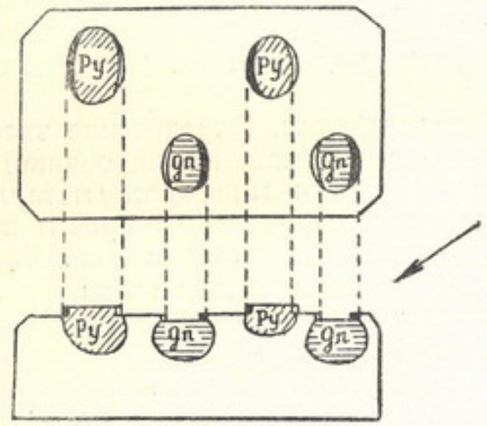


Рис. 26. Определение твердости по рельефу, распознаваемому путем косого освещения (схема).
Py — твердый минерал (пирит); Gn — мягкий минерал (галенит). Вверху полированный шлиф в разрезе, внизу — в плане.

И. С. Волынский уделяет большое внимание методу определения твердости по рельефу и широко использует его при диагностике рудных минералов. По рельефу все рудные минералы разбиваются им на семь групп относительной твердости. В каждой из групп минералы располагаются по твердости в последовательном порядке, установленном систематическими наблюдениями.

По абразивным штрихам. При обычном методе изготовления полированных шлифов на всех минералах остаются царапинки и штрихи от абразивных материалов.

По штрихам, образующимся в последнюю стадию полировки, можно определить относительную твердость минералов. Для этого находят под микроскопом тонкий штрих, который проходит через два близких по твердости соприкасающихся минерала. На минерале с большей твердостью абразивный штрих будет мельче и уже; наоборот, на минерале менее твердом штрих будет шире и глубже. Рассматривать абразивные штрихи следует при сильном увеличении и при сомкнутой диафрагме поля зрения.

Однако при пользовании этим методом нужно учитывать, что резкие штрихи от грубого шлифовального материала лучше сохраняются на твердых минералах, а на мягких минералах они могут быть заполированы. В подобном случае, пользуясь приведенным выше правилом, можно сделать как раз противоположный вывод о твердости.

Описанные методы определения твердости по характеру поверхности, по светлой линии, путем косого освещения и по абразивным штрихам ценны в том отношении, что позволяют производить определения на очень мелких зернах. Кроме того, полированный шлиф при этих методах не портится и может подвергаться дальнейшим испытаниям. Последнее важно в том случае, если мы имеем единичные зерна какого-нибудь редкого минерала.

Металлическими иглами. Определение твердости этим методом заключается в царапании полированного шлифа.[1]

Определение твердости минералов металлическими иглами — наиболее распространенный прием в минераграфии. Здесь определяется так называемая «пассивная» твердость (царапание испытуемого минерала), в отличие от минералогических методов, которыми определяются и «пассивная» и «активная» (царапание испытуемым минералом) твердости. Надо заметить, что «пассивная» и «активная» твердости для одного и того же минерала не всегда совпадают.

А. Г. Бетехтин предложил определять твердость двумя иглами — медной и стальной. Медная игла, изготовляемая из провода красной меди длиной 70—80 мм и диаметром около 2 мм, заостряется с одного конца; в качестве стальной иглы может быть использована швейная игла. С помощью этих игл легко разбить все минералы по твердости на три группы:

1) низкой твердости — чертятся медной (и, конечно, стальной) иглой (твердость по шкале Мооса ниже 3);

2) средней твердости — чертятся стальной и не чертятся медной иглой (твердость по шкале Мооса от 3 до 5);

3) твердые — не чертятся обеими иглами (твердость по шкале Мооса выше 5).

Этот прием в практике минераграфии наиболее удобен и распространен. Этот метод определения твердости, несмотря на свою простоту, довольно объективен, и нами он положен в основу определительных таблиц, приведенных в настоящем руководстве.

Твердость иглами определяется под микроскопом при слабом увеличении, обычно с объективом 3,7× (№ 1). При объективе 9× (№ 3) определять твердость иглой трудно, но при некотором навыке все же возможно. Игла зажимается между указательным и большим пальцами правой руки в 20—25 мм от ее острого конца; мизинец и безымянный палец должны опираться на столик микроскопа. Иглу держат под углом 30—40° к поверхности полированного шлифа и проводят штрих, наблюдая через окуляр, слева направо.

Обычное затруднение у начинающих заключается в неумении координировать свои движения с перевернутыми под микроскопом изображениями. Когда иглу ведут слева направо, при наблюдении в микроскоп кажется, что она идет справа налево. Чтобы быстрее привыкнуть, рекомендуется штрихи все время вести слева направо. Штрихи лучше проводить небольшими и располагать их на границе двух соприкасающихся минералов. В этом случае по ширине штриха, наблюдаемого при объективах 9× (№ 3) или 20× (№ 5), можно судить об относительной твердости каждого из соприкасающихся минералов. Сильно нажимать на иглу не надо, игла не должна заметно гнуться и тем более ломаться. Конец иглы все время должен быть острым, для чего иглу, особенно медную, необходимо систематически подтачивать на наждачной шкурке или бруске. Проверить заточку иглы можно под микроскопом при слабом увеличении.

Минералами шкалы Мооса. При помощи металлических игл можно определять твердость в пределах от 1-й до 5-й ступеней шкалы Мооса. Между тем имеется значительное число минералов, твердость которых выше 5. Так, например, из общего числа в 192 минерала, помещаемых в минераграфических таблицах, на долю твердых, т. е. не царапающихся стальной иглой, приходится около 50. Эти минералы также можно разделить по твердости с помощью минералов шкалы Мооса: ортоклаз — 6, кварц — 7, топаз — 8 и корунд — 9.

Определение твердости минералов в полированных шлифах производят следующим образом. Берут небольшие кристаллики (8—10 мм длиной и 3—4 мм в поперечнике) указанных минералов, заостряют их концы в виде пирамидок на шлифовальном круге, вставляют в латунные трубочки и зачеканивают их свинцом или баббитом. Полученными «иглами» проводят по линеечке (вне микроскопа) черту через весь полированный шлиф. Затем рассматривают черту под микроскопом, передвигая полированный шлиф на столике с помощью координатных салазок или просто руками. Если испытуемый минерал не чертится ортоклазом, его испытывают кварцем, а если потребуется, то топазом и корундом.

Таким методом автор изучал твердость хромитов (хромшпинелидов) и доказал, что она колеблется в пределах от 6 до 8 (по Моосу).

Микросклерометром Талмеджа. Склерометром называется прибор для определения твердости. Известно несколько кон-

[1] Полированный шлиф, на котором определялась твердость минерала царапанием, перед дальнейшими испытаниями иногда приходится доводить на стекле с минутником и подполировывать заново на сукне с магнезией или крокусом.

струкций этих приборов, но в минераграфии нашел применение только микросклерометр Талмеджа. Он состоит в основном из качающегося коромысла, к концу которого прикреплена наклонно алмазная игла и по которому передвигается грузик. Когда грузик находится на нулевом делении, коромысло будет в равновесии; когда же грузик будет передвинут, коромысло наклонится, что обусловит давление на алмазное острие.

Склерометр типа Талмеджа может быть изготовлен в любой мастерской своими средствами. Алмазная игла может быть заменена корундовой иглой, употребляющейся для проигрывания долгоиграющих пластинок.

На столике микроскопа в координатные салазки укрепляют полированный шлиф, вставляют объектив 3,7× (№ 1). Прибор устанавливают так, чтобы алмазная игла касалась испытуемого минерала и была видна под микроскопом в центре поля зрения.

Коромысло должно быть в горизонтальном положении. Передвигают грузик и тем самым сообщают некоторую нагрузку алмазной игле. Передвигают полированный шлиф в координатных салазках, и на испытуемом минерале иглой проводится черта. Сравнивают ширину полученной черты с эталонным штрихом, за который может быть принята одна из черточек (делений) окуляр-микрометра. Меняя нагрузку на алмазное острие путем передвигания грузика, добиваются получения черты на минерале одинаковой ширины с эталонной чертой окуляр-микрометра. Прибор требует предварительной градуировки, при которой необходимо установить положение грузика и нагрузки на острие для семи эталонных минералов шкалы твердости Талмеджа (табл. 8). Твердость испытуемого минерала выражается той или иной буквой этой шкалы.

Таблица 8

Обозначение твердости		Типичный минерал	Положение гирьки на коромысле	Давление на острие г
Низкая	A	Аргентит	0,2	0,105
	B	Галенит	0,4	0,210
	C	Халькопирит	0,7	0,365
Средняя	D	Тетраэдрит	1,0	0,520
	E	Никелин	1,5	0,775
Высокая	F	Магнетит	2,0	1,035
	G	Ильменит	3,0	1,550

Классификация Талмеджа не нашла широкого практического применения. Но данные о твердости минералов по Талмеджу являются весьма полезными при определении твердости сравнительными методами, к которым мы часто прибегаем.

Таким образом, при пользовании описанным прибором за мéру твердости минерала принимается по существу нагрузка в граммах на алмазное острие, при которой чертится штрих стандартной ширины. Более точные результаты можно получить, если наносить штрих при стандартной нагрузке, а затем измерять его ширину при сильном увеличении с помощью винтового окуляр-микрометра.

Вдавливанием с помощью прибора Хрущева и Берковича [1]. Твердость этим методом определяется с помощью прибора ПМТ-2, представляющего собой микроскоп, снабженный специальным приспособлением с квадратной алмазной пирамидкой.

Твердость минерала определяется вдавливанием пирамидки и вычисляется (в кг/мм²) по формуле:

$$H = 2 \operatorname{Sin} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{d^2},$$

где α — угол между противоположными гранями пирамидки;
P — нагрузка в кг;
d — диагональ наблюдаемого в микроскоп отпечатка от вдавливания в мм.

Прибор ПМТ-2 служит также для наблюдения свойств упругости, пластичности и хрупкости минералов путем изучения формы отпечатков, фигур давления и трещин.

3. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК И ПРАКТИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ

Приводимые ниже указания относятся к методам определения твердости путем царапания.

1. Притупленные иглы не дадут надежного штриха. Поэтому металлические иглы нужно систематически подтачивать на шкурке, а кристаллики минералов — на шлифовальном круге.

У склерометра время от времени следует проверять градуировку.

2. При пологом наклоне иглы черта может не получиться, так как минерала будет касаться не острие иглы, а ее боковая

[1] С. Д. Дмитров. Применение прибора микротвердости ПМТ-2 конструкции М. М. Хрущева и Е. С. Берковича для диагностики минералов. Зап. Всесоюзн. минерал. об-ва, № 4, 1949.

часть. Поэтому иглу нужно держать под углом не менее 30—40°.

3. Поверхность полированного шлифа может быть загрязненной (слоем мастики, кедровым маслом и т. д.). Игла, раздвигая тонкий слой загрязнения, оставит черту, которую по неопытности принимают за черту в минерале. Поэтому перед началом испытаний на твердость необходимо полированный шлиф тщательно протереть или подполировать.

4. Мягкая игла на твердом минерале оставляет след. Например, медная игла оставит след меди на сфалерите, стальная игла оставит след стали на касситерите, ортоклазовая «игла» оставит след ортоклаза на хромите и т. д. Этот след нельзя принимать за черту. Рекомендуется, после того как черта проведена, обтереть полированный шлиф (можно и не снимая с микроскопа) маленькой волосяной кисточкой.

5. Определение твердости очень мелких зерен и тонких жилочек с помощью игл ненадежно. Во-первых, иглой трудно коснуться маленького зерна, а во-вторых, при включении мелкого, мягкого минерала в твердом игла перескочит через мягкий минерал, не повредив его. Поэтому твердость мелких зерен определяют другими методами (по светлой линии и по характеру поверхности).

Твердость некоторых минералов является непостоянной, и это затрудняет определение данных минералов. Так, например, плотный лимонит имеет высокую твердость, а охристый — низкую или среднюю. То же относится и к пиролюзиту и ваду. Борнит может иметь твердость среднюю или низкую, что зависит, вероятно, от наличия в нем в твердом растворе переменных количеств халькозина. Вольфрамит имеет твердость Е (5—5,5), стальная игла оставляет на нем след лишь при сильном нажиме, поэтому его твердость можно считать высокой, а не средней. То же самое относится к шмальтину и хлоантиту. Магнетит обычно в минераграфических определителях относится к группе твердых минералов, но стальная игла оставляет в нем ясный след. Это обстоятельство учитывается в определителях рудных минералов. В сводных таблицах (глава XIII) данного руководства все подобные минералы повторяются в разных группах.

УПРАЖНЕНИЯ

Определение твердости по характеру полированной поверхности

Сначала рекомендуется ознакомиться при объективе 9× (№ 3) с характером полированной поверхности пирита, халькопирита и галенита и определить их относительную твердость. Затем при объективах 3,7× (№ 1) и 9× (№ 3) следует провести наблюдение за наружными теневыми каймами у пирита (или хромита, магнетита), а также за внутренними теневыми каймами у включений галенита в пирите. Далее следует провести наблюдение с бинокулярной лупой, с помощью которой легко можно заметить рельеф минералов, а следовательно, и определить их относительную твердость.

Определение твердости по светлой линии

Сначала находят под микроскопом два соприкасающихся минерала, заметно разнящихся по твердости (сфалерит и галенит) и наблюдают у них светлую линию и направление ее движения при поднятии тубуса микроскопа. После этого производят более трудное определение для двух соприкасающихся минералов, незначительно отличающихся по твердости (халькопирит и сфалерит, сфалерит и теннантит). Найдя под микроскопом при объективе 40×, 20× (№ 5) контакт этих минералов, при сомкнутой диафрагме и медленном поднимании тубуса микрометренным винтом устанавливают направление движения светлой линии и относительную твердость для данной пары минералов.

Определение твердости способом косого освещения

Косой свет (одностороннее освещение) создается путем небольшого наклона призмы опак-иллюминатора. В косом свете следует сначала провести наблюдение за расположением света и тени у пустот выкрашивания, имеющих отрицательный рельеф, после чего можно перейти к сравнительной оценке твердости минералов и этим способом определить твердость искомого минерала.

Определение твердости металлическими иглами

Сначала работа производится при объективе 3,7× (№ 1). Предварительно под микроскопом нужно проверить, достаточно ли остры медная и стальная иглы, в противном случае их следует подточить на шкурке или бруске. Испытуемый минерал устанавливают в середину поля зрения микроскопа и делают на нем медной иглой короткий штрих. Если штрих не получился, то вторично штрих проводят стальной иглой. Затем определяют, к какой из трех групп твердости следует отнести минерал. Это испытание полезно проделать еще на двух-трех минералах.

После этого можно приступить к определению твердости при объективе 9× (№ 3).

ГЛАВА X

МАГНИТНОСТЬ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

1. МАГНИТНОСТЬ

Испытание с магнитной стрелкой. Некоторые минералы обладают магнитными свойствами. К числу сильно магнитных минералов относятся: самородное железо, магнетит, магнезиоферрит, пирротин и кубанит (хальмерзит).

Умеренно или слабо магнитными являются: железистая платина, тролит, железистые хромшпинелиды, якобсит, франклинит, ферберит, вольфрамит, маггемит и мельниковит.

Если магнитная стрелка отклоняется по направлению к минералу и тянется за ним или даже прилипает к нему, это значит, что минерал магнитен. Магнитность определяется в градусах угла отклонения стрелки. Если установлено, что полированный шлиф магнитен, приступают к отысканию магнитного минерала. Для этого замечают на полированном шлифе участок, который действует на магнитную стрелку, и тщательно просматривают его потом под микроскопом.

Испытание с помощью прибора Мак-Кинстри. Метод наблюдения магнитных минералов под микроскопом, предложенный Мак-Кинстри, заключается в следующем:

От швейной иглы отламывают ушко (подковку), которое в течение суток намагничивают подковообразным магнитом. Затем эту подковку приклеивают к концу упругого черного конского волоса длиной около 10 см; другой конец волоса прикрепляют к палочке. Полученную «удочку» приделывают к штативу (рис. 27).

Устанавливают микроскоп с объективом 3,7× (№ 1) вертикально. Прибор устанавливают так, чтобы подковка была в центре поля зрения и на 1—2 мм выше полированного шлифа. Затем двигают полированный шлиф с помощью координатных салазок. Как только подковка окажется над магнитным минералом, она или прилипнет к нему, или волосок сильно согнется.

Испытание порошка минерала. Испытывать на магнитность можно и порошок минерала, который получают с помощью стальной или алмазной иглы. Если к полученному указанным способом порошку минерала поднести под микроскопом при объективе 9× (№ 3) магнитную стрелку или магнитную иглу, частички минерала, если он магнитен, будут прилипать к стрелке или ориентироваться в направлении ее, задерживаясь у края царапины.

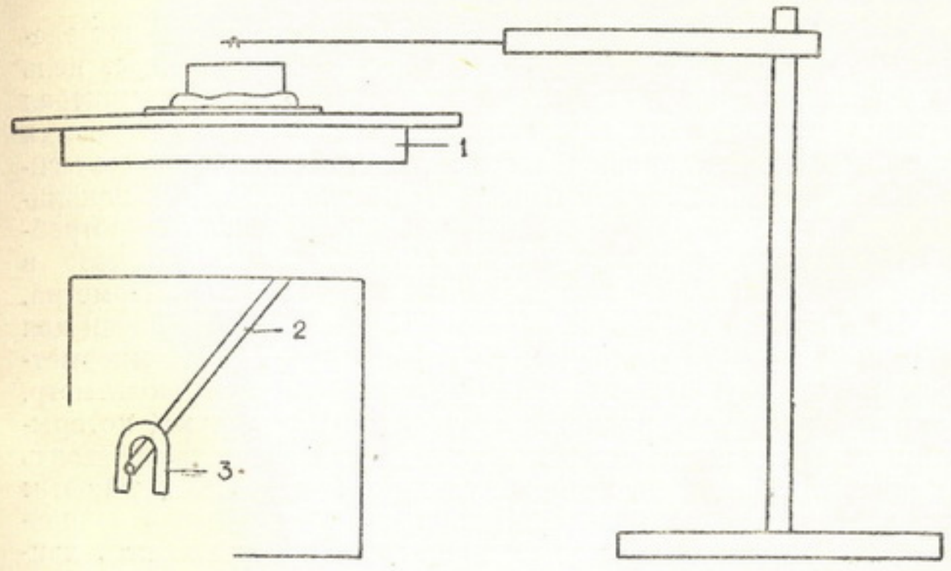


Рис. 27. Схема прибора для испытания на магнитность.
1 — столик микроскопа; 2 — волосок; 3 — магнитное ушко иглы.

Такой метод испытания рекомендуется для слабо магнитных минералов (якобсит, ферберит, платина).

2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

Минералы имеют различное сопротивление по отношению к проходящему через них электрическому току. Некоторые минералы (например, самородная медь и серебро) — совершенные проводники, другие же, наоборот, почти не проводят электричества (слюда, кальцит). Большинство рудных минералов хорошо проводит электрический ток.

Электропроводность рудных минералов изучалась несколькими исследователями.

Деви и Фарнгам предложили измерять электропроводность рудных минералов с помощью сухой батареи карманного фонаря и вольтметра. С помощью такого прибора они установили три группы минералов:

I группа — минералы, обладающие электропроводностью, как медь;

II группа — минералы, проводящие электрический ток хуже, чем медь;

III группа — минералы, не проводящие электричества.

Более усовершенствованный прибор для измерения электропроводности применялся в лаборатории ЦНИГРИ. Устройство этого прибора следующее.

Электрический ток от батареи из двух или трех сухих элементов проходит последовательно через минерал и через цепь из 6 электрических лампочек по 2 v каждая или через минерал и через миллиамперметр. Первое соединение применяется при высокой электропроводности минералов; в этом случае о силе электрического тока в цепи судят по числу заметно накаливающихся электрических лампочек. Второе соединение употребляется при более слабой электропроводности минералов; в этом случае о силе тока судят по показанию миллиамперметра.

Весь прибор собран на эбонитовой дощечке. Лампочки для него можно взять от карманного фонарика. Миллиамперметром может служить карманный миллиамперметр-вольтметр, употребляемый для радио. Между стальными иглами, которыми касаются исследуемого минерала, рекомендуется поставить резиновый клинышек, который следует закрепить резиновым же колечком. Такое приспособление позволит в очень небольших пределах изменять расстояние между концами игл, двигая клинышек вперед и назад, что очень важно при исследовании мелких зерен. Кроме того, эта резиновая прослойка не позволит иглам сомкнуться в момент нажима на исследуемый минерал.

При помощи описываемого прибора все рудные минералы по электропроводности разбиты на 6 классов:

Очень высокая Высокая Средняя	испытываются с помощью электрических лампочек
Нижесредняя Слабая	испытываются с помощью миллиамперметра
Очень слабая	показания миллиамперметра незаметны.

Более точные измерения электропроводности были произведены Гарвеем. Его прибор состоит из потенциометра с медными и платиновыми игольчатыми наконечниками. Внешняя пара медных иголок включается в электрическую цепь с сухими батарейками и служит проводником тока через минерал, внутренняя же — платиновая пара — соединяется с потенциометром. Электропроводность определяется измерением омического сопротивления. Сила тока в цепи измеряется с помощью гальванометра, а сопротивление минерала вычисляется по закону Ома.

И. С. Волынский сконструировал специальное приспособление для измерения электропроводности минералов по методу Гарвея, которое представляет собой миниатюрное устройство, укрепленное на объективе микроскопа с помощью откидного хомутика. Установка И. С. Волынского (рис. 28) состоит из

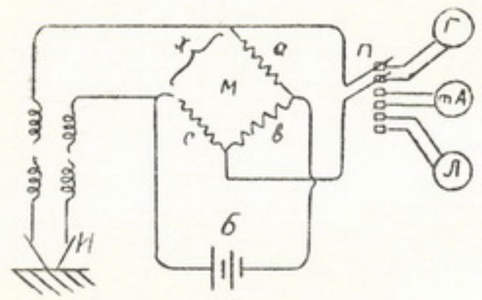


Рис. 28. Схема установки для измерения электропроводности (по И. С. Волынскому)

Б — батарея питания; М — мостик Уитстона; И — измерительное приспособление; П — переключатель; Л — лампочка; mA — миллиамперметр; Г — гальванометр.

батареи питания (Б) (4,5 в), мостика Уитстона (М) и измерительного приспособления (И), включаемого в одно из плеч мостика. В качестве прибора, контролирующего отсутствие тока в диагонали мостика, применяется лампочка (Л) от карманного фонаря, миллиамперметр (mA) или чувствительный гальванометр (Г). При отсутствии тока в диагонали мостика сопротивление минерала x вычисляется по формуле:

$$x = a \cdot \frac{c}{b}$$

Результаты измерений Гарвея представлены в виде таблицы, в которой минералы расположены в порядке их возрастающего сопротивления (табл. 9).

Таблица 9

Электропроводность главнейших рудных минералов

Степень электропроводности	Показания миллиамперметра, ма	Минералы	Сопротивление, ом
Высокая	10–15	Серебро	10^{-5}
		Медь	10^{-4}
		Миллерит	10^{-4}
		Никелин	10^{-4}
		Висмут	10^{-3}

Степень электропроводности	Показания миллиамперметра, ма	Минералы	Сопротивление, ом
Высокая	10—15	Ковеллин	10^{-3}
		Пентландит	10^{-2}
		Пирротин	10^{-2}
		Арсенопирит	10^{-1}
		Борнит	10^{-1}
		Магнетит	10^{-1}
Низкая	1—9	Пирит	1
		Галенит	1
		Халькопирит	10
		Марказит	10^{2}
		Теннантит	10^{2}
		Ильменит	10^{3}
		Псиломелан	10^{5}
		Куприт	10^{6}
		Касситерит	10^{7}
		Браунит	10^{8}
Незаметная	Менее 1	Киноварь	10^{8}
		Лимонит	10^{8}
		Стибнит	10^{8}
		Сфалерит	10^{8}
		Хромит	10^{8}

УПРАЖНЕНИЯ

Испытания на магнитность

Предварительно полированный шлиф проверяют на магнитность с помощью стрелки компаса; при этом отмечают, в какой части шлифа находятся наиболее магнитные точки.

Микроскоп устанавливают вертикально. Наблюдение ведут при слабом увеличении (объектив 3,7×, № 1). Затем устанавливают прибор Мак-Кинстри так, чтобы магнитное ушко было в середине поля зрения и на высоте 1—2 мм от полированной поверхности. Медленно передвигая полированный шлиф в координатных салазках, следят в микроскоп за положением магнитного ушка. По колебанию его устанавливают, какой из минералов обладает магнитными свойствами.

Измерение электропроводности рудных минералов

Точное измерение электропроводности минералов требует специальной аппаратуры. В практике минераграфии обычно бывает достаточно определения лишь трех степеней электропроводности: высокой, низкой, незаметной.

Показания миллиамперметра для трех указанных степеней электропроводности см. в табл. 9.

Для этой цели может служить вышеописанный прибор, применяющийся в лаборатории ЦНИГРИ.

Измерения рекомендуется производить преимущественно по миллиамперметру, так как показания лампочек менее надежны.

Микроскоп должен находиться в вертикальном положении. Работа должна производиться при объективе 3,7× (№ 1). Устанавливается на столике микроскопа в координатные салазки полированный шлиф. Приключается батарейка к зажимам прибора. Включается миллиамперметр.

Под микроскопом находится испытуемый минерал, которого касаются обеими иглами и в то же время замечают показания миллиамперметра. Показания записываются в тетрадь.

Испытание следует повторить еще на 2—3 зернах того же минерала. После этого уже можно сделать вывод, к какой из трех групп следует по электропроводности отнести испытуемый минерал.

Рекомендуется испытание на электропроводность произвести:

а) с медью и пирротином (хорошие проводники);

б) с галенитом и халькопиритом (слабые проводники) и

в) с лимонитом, сфалеритом и антимонитом (практически не проводники).

Разбивка минералов с помощью миллиамперметра (или с помощью лампочек от карманного фонаря) на три указанные выше группы не представляет затруднений. Это определение может быть выполнено на простом приборе в несколько минут и дает полезный диагностический признак.

ГЛАВА XI

ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В минераграфии травлением называют изменение полированной поверхности минерала вследствие химического воздействия на нее. В зависимости от назначения различают: а) диагностическое травление и б) структурное травление. В первом случае задача сводится к получению характерного признака для определения минерала; этот случай и будет разобран в настоящей главе. Во втором случае задача заключается в выявлении скрытой, внутренней структуры минерала; этот вопрос рассматривается ниже (глава XV).

В зависимости от условий и методики травления различают:

1. Химическое травление, когда на минерал воздействуют каплей реактива.

2. Электролитическое травление, когда действие капли реактива активизируется электрическим током.

3. Световое травление, когда на минерал воздействуют сильным светом.

Химическое и световое травление разбирается в настоящей главе; электролитическое травление применяется для выявления структур и поэтому рассматривается ниже.

2. СВЕТОВОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Применение светового травления в практике минераграфии весьма ограничено. Многие соединения серебра под влиянием света химически разлагаются и темнеют. Поэтому некоторые серебросодержащие минералы при сильном освещении их под микроскопом тускнеют, например при освещении светом вольтовой дуги через опак-иллюминатор.

Стефенс приводит следующие данные о времени, которое требуется для светового травления различных минералов с помощью вольтовой дуги при объективе 4 мм:

Серебряный блеск Ag_2S	4 сек.	Андорит 2 PbS. Ag_2S. 3 Sb_2S_3	10 сек.
Штромейерит $(Ag, Cu)_2S$	4 „	Стефанит 5 $Ag_2.S\ Sb_2S_3$	15 „
Полибазит 8 $Ag_2S.Sb_2S_3$	5 „	Пираргирит 3 $Ag_2S.Sb_2.S_3$	20 „
Петцит $(Ag, Au)\ Te_2$	6 „	Прустит 3 $Ag_2S.As_2S_3$	90 „
Гессит $Ag_2\ Te$	10 „		

Дневной и рассеянный искусственный свет светового травления не вызывает.

Результат светового травления выражается в появлении шероховатости на полированной поверхности вследствие покрытия ее мельчайшими пузырьками, металлическими шариками, рытвинками.

Рекомендуется световому травлению подвергать свежеотполированные поверхности и во время травления прикрывать часть поля зрения диафрагмой или черной фотобумагой. Закрытая часть минерала не изменится от света и может служить для сравнения.

Световое травление является вспомогательным диагностическим признаком, относящимся к очень небольшому числу минералов.

3. НАБОР РЕАКТИВОВ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Травление с помощью капли реактива, помещаемой на полированную поверхность минералов, имеет широкое применение в минераграфии.

Во многих определителях рудных минералов под микроскопом химическому травлению отводится ведущая роль.

К реактивам для травления предъявляются следующие требования:

1. Реактив должен оказывать сильное и притом растворяющее действие.

2. Результаты реакции по различным кристаллографическим направлениям одного и того же минерала должны быть близкими.

3. Реактив должен быть химически чистым и хорошо сохраняющимся.

4. Реакция должна идти на холоду, без подогревания образца или реактива.

Обычно для диагностических целей употребляется следующий набор реактивов:

1. Азотная кислота (HNO_3 1 : 1).
2. Соляная кислота (HCl 1 : 1).
3. Царская водка.
4. Едкий калий (KOH) — 40%-ный раствор.
5. Цианистый калий (KCN) — 20%-ный раствор.
6. Хлорное железо ($FeCl_3$) — 20%-ный раствор.
7. Сулема ($HgCl_2$) — 5%-ный раствор.

Отношение рудных минералов к травлению этими реактивами описано во всех определительных таблицах.

Для диагностики некоторых минералов употребляют еще следующие реактивы:

1. Перекись водорода H_2O_2—3%- и 30%-ные растворы—для марганцевых минералов.

2. Азотнокислое серебро $AgNO_3$—насыщенный водный раствор — для различия золота и халькопирита: в течение 1 минуты золото не изменяется, а халькопирит чернеет.

3. Хлорное олово $SnCl_2$ — насыщенный водный раствор — для марганцевых минералов.

4. Марганцевокислый калий $KMnO_4$ — насыщенный водный раствор — для марганцевых минералов.

5. Железосинеродистый калий $K_3Fe(CN)_6$ — 25%-й водный раствор — для отличия теннантита (темнеет) от тетраэдрита.

Многие реактивы, употребляющиеся для структурного травления, имеют определенное диагностическое значение. Например, $KMnO_4 + H_2SO_4$ — для сфалерита, HNO_3 концентрированная — для халькозина, HCl концентрированная — для магнетита и др.

Реактивы рекомендуется хранить в стеклянных флаконах, емкостью 10—20 $см^3$ каждый.

Флаконы с кислотами должны закрываться стеклянными притертыми пробками, а остальные реактивы — резиновыми. Стеклянные притертые пробки для растворов солей неудобны: соли, испаряясь, дают осадок, который крепко прихватывает пробку. На каждом флаконе белой эмалью наносят пятно, на котором тушью записывают название реактива.

Набор реактивов нужно хранить в деревянном футляре, в котором для каждого флакона имеется свое гнездо.

Реактивы берутся из флаконов с помощью пипеток или стеклянными палочками с шариком на конце. Последний прием лучше, так как пипетки загрязняются и часто ломаются и, кроме того, ими трудно без навыка посадить на минерал маленькую капельку реактива.

Для каждого реактива нужно употреблять свою палочку или пипетку, которые лучше закрепить в пробке флакона; это будет гарантировать чистоту реактивов.

Наложение маленьких капель реактива удобно производить с помощью острых клинышков, нарезанных из плотной

бумаги. Такие клинышки заготовляются в достаточном количестве заблаговременно, и каждый из них пригоден для пользования один раз.

Из других принадлежностей для травления требуются: стаканчик с водой (дистиллированной или кипяченой), в которой обмываются пипетки (если они общего пользования) и травленое место полированного шлифа; кусочки фильтровальной бумаги для снятия капель, марля или вата для обтирания полированного шлифа. Под руками также должна быть суконная дощечка, на которой можно вручную с крокусом или с магнезией подправлять полированные шлифы.

4. ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ТРАВЛЕНИИ

Действие реактива на минерал сводится к химической реакции, в результате которой часть вещества минерала переходит в раствор или в осадок, а часть выделяется в виде газа.

При изготовлении полированные шлифы покрываются тонкой (тысячные доли миллиметра) аморфной пленкой из минералов, слагающих руду. Этот аморфный материал заполняет микроструктурные трещины и поры минералов.

В начальные стадии травления, через несколько секунд, аморфная пленка растворяется, и выявляются некоторые структурные особенности минерала. Дальнейшее действие реактива вызывает растворение минерала, образование некоторых осадков и выделение пузырьков газа.

Наблюдение за результатом травления начинается с момента наложения капли на полированную поверхность минерала. При этом под микроскопом в отраженном свете можно наблюдать:

1. Выделение пузырьков газа или даже бурное вскипание. Например, выделение пузырьков газа при действии HNO_3 1 : 1 на арсенопирит и пирит. Вскипание у халькозина и куприта при действии на них HNO_3 1 : 1.

2. Окрашивание капли реактива (наблюдается в косом свете). Например, капля HCl 1 : 1 при действии на магнетит желтеет. Кислоты, действующие на медьсодержащие минералы, синеют.

Дальнейшие наблюдения производят после осторожного снятия капли с помощью фильтровальной бумажки. Тогда на месте капли под микроскопом можно заметить появление осадка, который удобнее рассматривать в косом свете. Например, при действии KOH на сурьмяный блеск немедленно отлагается характерный оранжево-желтый осадок. При действии капли царской водки на блеклую руду на последней отлагается желтый осадок серы. На куприте под действием HNO_3 1 : 1 образуется осадок металлической меди.

Образовавшийся при травлении осадок удаляют: вытирают травленое место марлей или ватой или легко протирают на сукне. После этого можно под микроскопом на месте капли заметить:

1. Окрашивание поверхности минерала. Например, халькозин от действия HNO_3 1 : 1 или $FeCl_3$ 20%-ного окрашивается в голубой цвет. Борнит под действием $FeCl_3$ становится оранжевым, а от KCN — коричневым.

2. Потемнение минерала (иногда очень сильное) вследствие разъедания (коррозии) его поверхности. Например, галенит от действия HNO_3 1 : 1 чернеет. Серебро под влиянием того же реактива немедленно темнеет.

3. Образование тонкой иризирующей пленки на поверхности минерала. По существу это очень тонкий слой плотного осадка на полированной поверхности. Например, при действии KOH на пирротин последний получает радужное потускнение. Шмальтин под действием $HgCl_2$ окрашивается в радужные цвета. $KMnO_4 + H_2SO_4$[1] оставляет на халькопирите сильную иризирующую пленку.

4. Появление трещин спайности, двойников, зонального строения (подробно этот вопрос разбирается ниже, в главе XV). Например, у халькозина травлением HNO_3 1 : 1 выявляется мелкозернистая структура; то же можно наблюдать у халькопирита, протравленного $KMnO_4$ + KOH[1]. У сфалерита после травления царской водкой или $KMnO_4 + H_2SO_4$ часто выявляются двойниковое строение и спайность; у шмальтина от действия HNO_3 1 : 1 — зональное строение.

5. Образование кольца. Некоторые минералы не изменяются под действием жидкого реактива, но пары его действуют на минерал и образуют кольцо (ореол) вокруг капли. Такой ореол можно наблюдать у висмутина и джемсонита под действием паров HCl или у пирита и сфалерита под действием паров HNO_3.

Если при травлении будет наблюдаться хотя бы одно из описанных выше явлений, следует считать, что реактив действует, т. е. реакция положительная, что обозначается знаком + (плюс). Если же минерал после снятия капли и вытирания совершенно не изменяется, считается, что реактив не действует, т. е. реакция отрицательная, и это обозначается знаком — (минус).

5. МЕТОДИКА ТРАВЛЕНИЯ

Травление рекомендуется начинать более слабыми реактивами и кончать более сильными. Реактивы следует применять в таком порядке: $HgCl_2$, $FeCl_3$, KCN, KOH, HCl, HNO_3, царская

[1] Эти реактивы обычно применяются при структурном травлении.

водка. Для многих минералов (хотя и не для всех) этот порядок обеспечит травление с наименьшей порчей полированного шлифа.

Пипеткой или стеклянной палочкой капля реактива накладывается на минерал. Размер капли должен быть не более 1—2 мм в диаметре. После наложения капли ведется наблюдение под микроскопом при объективе 3,7× (№ 1), не происходит ли вскипания и не изменяется ли цвет капли.

По прошествии 1 мин. капля снимается полоской фильтровальной бумаги, и под микроскопом изучаются результаты травления. После этого травленое место промывается с помощью пипетки несколькими каплями воды или мокрой полоской фильтровальной бумаги, протирается ваткой или марлей и опять изучается под микроскопом. Результаты травления после снятия капли рекомендуется просматривать под микроскопом не только при малом увеличении (объектив 3,7× или № 1), но и при более сильном (объективы 9× или № 3). Весь ход процесса травления записывается в тетрадь. Если результат отрицательный, то следующую каплю другого реактива можно накладывать опять на это же место полированного шлифа.

Такое исследование испытуемого минерала надо проделать со всеми семью реактивами.

6. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК И ПРАКТИЧЕСКИЕ СОВЕТЫ

Не соблюдая некоторых предосторожностей при травлении, легко допустить ошибку, что приведет к неверному определению минерала. Разберем характерные случаи.

1. Если поверхность полированного шлифа загрязнена от прикосновения пальцев или тонким масляным слоем, оставшимся от предшествующего наблюдения с иммерсией, или просто окислена от долгого пребывания на воздухе, действие реактива может быть ослаблено или остановлено. Поэтому подвергать травлению нужно свежеизготовленные полированные шлифы, которые перед началом травления нужно протирать на сукне.

2. Если руда мелкозернистая, каплю реактива трудно поместить только на одном испытуемом минерале: она покроет одновременно два или более минералов. Разность потенциалов между минералами вызовет слабый электрический ток, вследствие чего действие реактива на один минерал усилится, а на другой ослабнет. Так, например, если соприкасающиеся борнит и галенит покрыты каплей $FeCl_3$, то реакция на борните будет усиленной, а галенит не протравливается. При действии же $FeCl_3$ на эти минералы порознь наблюдается умеренное действие реактива на борнит и сильное на галенит.

Поэтому для травления следует выбирать более крупные зерна, а капли накладывать возможно меньшего размера.

3. Насыщенные растворы реактивов (например, $HgCl_2$) при испарении жидкости на воздухе начинают кристаллизоваться. В капле такого реактива за время травления (1 мин.) успевает образоваться на поверхности минерала тонкий кристаллический налет. Этот налет образуется и в том случае, когда реактив никакого действия на минерал не оказывает. Нельзя смешивать этот налет с осадком.

Поэтому вместо насыщенного раствора $HgCl_2$ рекомендуется применять 5%-ный раствор.

4. В полированном шлифе обычно наблюдаются различные по своей кристаллографической ориентировке сечения какого-либо минерала. Скорость реакции для этих различно ориентированных сечений будет неодинакова. Этим объясняется, почему зерна одного и того же минерала травятся с различной интенсивностью одним и тем же реактивом.

5. Среди рудообразующих минералов нередко присутствует кальцит. Капля кислоты, накладываемая на рудный минерал, может коснуться кальцита, в результате чего, во-первых произойдет вскипание, которое можно ошибочно отнести к рудному минералу, а во-вторых, действие кислоты, нейтрализованной $CaCO_3$, на рудный минерал будет ослаблено. В этом случае можно рекомендовать или травить более крупные рудные зерна или изолировать рудные зерна от карбоната с помощью воска (путем наложения восковых дисков с дырочками).

6. Иногда реактив разлагается, не действуя на минерал. Например, перекись водорода иногда разлагается на марганцевых минералах и дает как бы вскипание, на самом же деле травления не происходит.

7. Мелкие пузырьки воздуха могут вытесняться из микротрещин и пор минерала каплей реактива. Это явление не надо смешивать с выделением пузырьков газа при реакции травления.

8. Руды из верхних частей залежей содержат значительно выветрелые минералы, которые легче поддаются травлению. Так, А. Г. Бетехтин указывает, что халькопирит и тетраэдрит из зоны окисления травятся HNO_3, обычно же этот реактив на них не действует. Платина из серпентинизированных пород травится царской водкой значительно легче, чем платина из свежих дунитов.

9. Изоморфные примеси в минерале могут влиять на результаты травления в ту или иную сторону. Например, блеклые руды в зависимости от состава различно реагируют с HNO_3 и KCN.

При определении минералов основываться только на данных травлениях нельзя. Определение минералов производится

на основе физических признаков, к травлению же прибегают по мере надобности, как к дополнительному или поверочному испытанию.

УПРАЖНЕНИЕ

Диагностическое травление

Для выполнения данного упражнения необходимо иметь:
1) полированный шлиф руды для травления;
2) набор реактивов (стр. 102);
3) стаканчик с водой, пипетку, вату, полоски фильтровальной бумаги;
4) обтянутую сукном дощечку.

Микроскоп устанавливается вертикально; при слабом увеличении находятся достаточные по величине зерна для травления.

При травлении минерала следует учитывать методические указания, приведенные в разделах 5 и 6 настоящей главы. Перед проведением травления необходимо:
1) протереть полированный шлиф на суконке или замше;
2) вымыть пипетки, если они общие для нескольких реактивов;
3) отметить места травления на контуре полированного шлифа в тетради и записать результаты травления.

Рекомендуется подвергнуть испытанию травлением некоторые из следующих минералов:
1) борнит, куприт, халькозин (вскипающие с HNO_3 1 : 1);
2) галенит, пирротин, антимонит (реагирующие с HNO_3 1 : 1 без вскипания);
3) халькопирит, псиломелан, аурипигмент (не реагирующие с HNO_3 1 : 1).

Сравните полученные результаты травления с описаниями в главе XIV, где показано отношение этих минералов к травлению основными реактивами.

ГЛАВА XII

МИКРОХИМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Описанные выше физические и химические признаки в подавляющем большинстве случаев позволяют с помощью таблиц определить исследуемый рудный минерал. Но иногда свойства минералов бывают настолько близкими, что различить их при помощи описанных методов не удается. Например, теннантит и тетраэдрит можно различить с помощью реакции на мышьяк (As) или сурьму (Sb). Арсенопирит FeAsS и леллингит $FeAs_2$, свойства которых очень близки, можно различить только с помощью реакции на серу.

Трудность определения минералов обусловливается тем, что их свойства представляют в общем непрерывный ряд, и всякое деление минералов на группы, которые приводятся в таблицах, является в известной мере условным. Есть целый ряд переходных минералов, которые находятся на грани той или иной группы, при определении соответствующих признаков которых легко сделать ошибку.

Во всех подобных случаях качественная химическая реакция на тот или иной элемент позволит сделать точное определение минерала.

Такие качественные реакции могут быть выполнены разными методами: паяльной трубкой, капельным анализом и микрохимическим анализом. В последнее время получил распространение метод отпечатков. В минераграфии, по нашему мнению, наиболее применим микрохимический метод.

Микрохимический анализ заключается в испытании мельчайших крупинок минералов, в получении кристаллических осадков и в наблюдении их под микроскопом.

Преимущества этого метода перед обычным качественным анализом следующие:

1. Возможность работать с мельчайшими крупинками вещества, что позволяет брать минералогически чистые пробы и определять редкие минералы.

2. Реакция может быть выполнена в очень короткое время — 3—5 минут.

3. Не требуется сложного лабораторного оборудования (например, вытяжного шкафа и др.).

4. Минимальный расход реактивов.

2. АППАРАТУРА И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Приспособления для взятия проб. Взятие пробы минерала обычно выполняется с помощью стальных игл. Рекомендуется конец иглы заточить на шлифовальном круге или шкурке в виде долота со скошенной поверхностью под углом 60° к ее оси.

Можно употреблять иглы от швейных машин, вставленные в граненую металлическую ручку.

Взятие пробы твердых минералов иглой вручную довольно затруднительно. В этом случае рекомендуется применять бормашину. Оригинальная конструкция бормашины для взятия микропроб разработана А. К. Русановым. В этом приборе в качестве сверла используется патефонная игла, приводимая во вращение электромоторчиком. Игла укрепляется в стержне, для оси вращения которого в качестве направляющей используется один из тубусов бинокулярной лупы или бинокулярного микроскопа; через другой тубус производится наблюдение за высверливанием зерна минерала.

Пробы очень твердых минералов берутся специальным «алмазным карандашом».

Брать пробы можно и обычным подпилком, с помощью которого легко выпиливать зерна, примыкающие к краю полированного шлифа.

Посуда и прочие принадлежности. Растворение пробы, выпаривание капель и получение осадков — все эти операции выполняются на предметных стеклах размерами 25 × 70 мм [1].

Эти стекла можно нарезать из тонких негативных стекол. Основным условием для успеха микрохимических реакций является содержание стекла в чистоте. На загрязненном стекле капля расплывается в виде большого плоского пятна, которое при нагревании испарится ранее, чем закипит, и растворение пробы может не произойти. Кроме того, в плоской капле условия для кристаллизации хуже, чем в сферической капле, так как в первом случае приток вещества будет неравномерным. И, наконец, при большой плоской капле раствора с испытуемым веществом чувствительность реакции будет понижена.

Перед опытом стекла обмывают хромовой смесью ($K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$), затем теплой водой с мылом и только

[1] Более короткие стекла неудобны, так как при нагревании их на спиртовке можно обжечь пальцы.

после этого — дистиллированной водой. Хранить стекла рекомендуется в стеклянной банке (в эксикаторе), поставив их ребром на фильтровальную бумагу. Брать их нужно пальцами за ребра, не касаясь поверхности стекла.

Наложение жидкого реактива производится стеклянными пипетками или тонкими стеклянными палочками с шариком на конце.

Нагревание капель производится на спиртовой горелке. Удобный нагревательный прибор можно сделать из электрической лампы мощностью в 50—100 вт, помещенной в футляр из жести с круглым вырезом, над которым кладется стекло с каплей.

Нагретые стеклышки нельзя класть на стол (к ним прилипает лак или краска); для этой цели служит мраморная дощечка или пластинка толстого стекла.

Для фильтрования жидкости при микрохимическом анализе нужны капиллярные трубочки. Их можно приготовить самому. Для этого берут стеклянную трубочку и нагревают ее на спиртовой горелке до размягчения, затем вне пламени быстро растягивают.

Перевод в раствор некоторых минералов (вольфрамит, касситерит) производится путем сплавления их с содой или бурой в ушке платиновой проволочки с помощью паяльной трубки.

Реактивы для микрохимических испытаний сохраняются в стеклянных флаконах емкостью 10—15 $см^3$ с резиновыми или стеклянными притертыми пробками. Сбоку каждого флакона наносится эмалевое пятно, на котором тушью записывается название реактива. Набор реактивов нужно хранить в деревянном закрывающемся футляре, в котором для каждого флакона должно быть свое гнездо.

Изучение полученных кристаллических осадков производится под микроскопом в проходящем свете.

3. МЕТОДИКА РАБОТЫ

Взятие пробы. Проба для испытания берется под микроскопом при слабом увеличении. Наиболее удобны для испытания зерна размером от 0,1 до 0,4 мм в поперечнике. При зернах меньшего размера чувствительность реакции будет недостаточной, а при более крупных зернах раствор будет пересыщенный, из которого образуется мелкозернистый, а иногда и аморфный осадок.

Если зерна испытуемого минерала в руде достаточно крупны (0,5—1 мм) и на этот минерал действует при травлении азотная кислота или царская водка, то проба может быть взята путем наложения капли растворителя прямо на полированный шлиф. Капля HNO_3 1 : 1 или царской водки накладывается на испытуемый минерал под микроскопом с помощью пипетки и

оставляется на несколько минут; после этого капля снимается с минерала и переносится пипеткой на стекло.

Если на минерал кислота не действует, то можно попробовать его растворить с помощью кислоты, активизированной электрическим током. Для этого накладывают каплю соляной кислоты на минерал, затем касаются ее верхней части платиновой проволочкой, соединенной с катодом, а минерала близ нижней части капли — стальной иглой, соединенной с анодом. Источником тока может служить батарейка от карманного фонаря.

При размере испытуемого зерна 0,5—0,2 мм его можно изолировать от окружающих минералов с помощью воскового диска. Для этого берут немного воска и делают из него диск размером около 5 мм в диаметре, в середине которого прокалывают иглой дырочку. Этот диск под микроскопом накладывают на испытуемый минерал так, чтобы последний был виден через отверстие, и прижимают его плотно к полированному шлифу. При сжатии воска дырочка будет уменьшаться и достигнет размера испытуемого зерна. После этого на воск накладывают каплю растворителя; при этом следят, чтобы под нее не попал воздушный пузырек, который может помешать действию реактива.

Проба берется иглой следующим образом. Иглу ставят (наблюдая под микроскопом при объективе № 1) на испытуемый минерал под углом около 60° к плоскости полированного шлифа. Вращая иглу на полоборота то в одну, то в другую сторону, стараются протолкнуть ее вперед. Материал выбуривается довольно медленно, особенно на твердых минералах. Иглу время от времени необходимо подтачивать на шкурке. Не рекомендуется глубину ямки делать более половины поперечника испытуемого зерна, так как в противном случае в пробу может попасть другой минерал.

Перенесение и растворение пробы. Перенесение на стекло выкрошенного иглой материала удобно производить с помощью заостренной спички, слегка смоченной дистиллированной водой.

Предварительно на краю стекла помещается капля HNO_3 1 : 1; кончик спички опускается в кислоту, прилипшие к ней крупинки материала освобождаются и попадают в каплю.

Растворение пробы чаще всего производится в HNO_3 1 : 1 при нагревании. Капля кислоты с крупинками минерала помещается на краю стекла [1] и нагревается на электрической лампе или спиртовой горелке; пламя не должно касаться стекла. Капля выпаривается досуха.

Если в сухом остатке остались крупинки минерала, которые можно заметить на глаз или под микроскопом, то наложение

[1] При нагревании капли на середине стекла последнее часто лопается.

капли HNO_3 1 : 1 и выпаривание ее повторяется. Иногда эту операцию приходится делать 3—4 раза.

Если минерал в HNO_3 не растворяется, его пробуют растворить в царской водке. Если и царская водка не действует, тогда минерал сплавляют с содой или бурой в платиновом ушке с помощью паяльной трубки.

Сухой остаток, получившийся на стекле после выпаривания кислоты, следует после охлаждения стекла растворить.

Растворение производится обычно в HNO_3 1 : 7 следующим образом. Пипеткой, в которой находится капля кислоты, касаются сухого остатка; нажимая и отпуская резиновую трубку пипетки, заставляют кислоту выливаться из пипетки на стекло и поступать обратно в пипетку. Так делается до растворения сухой соли. Раствор из пипетки выжимают на чистую часть стекла (или на другое стекло) в виде двух или трех маленьких сферических капель, к которым и добавляется потом реактив.

Фильтрование. Иногда требуется в испытуемой капле отделить какое-нибудь соединение в виде осадка и получить отдельно чистый фильтрат. Это выполняется с помощью капиллярной трубочки. Сначала дают осадку постоять несколько минут, чтобы он уплотнился и осел на дно капли. Затем в каплю опускают капиллярную трубочку; жидкость поднимается в нее по закону капиллярности; вынимают трубочку и выдувают из нее жидкость на другое место стекла. Так поступают несколько раз. Когда большая часть жидкости будет оттянута, добавляют к осадку для его промывки каплю воды, и опять ее оттягивают капилляром.

Наложение реактива (рис. 29). Существует четыре способа введения в каплю испытуемого раствора. Ниже приводится краткое описание их.

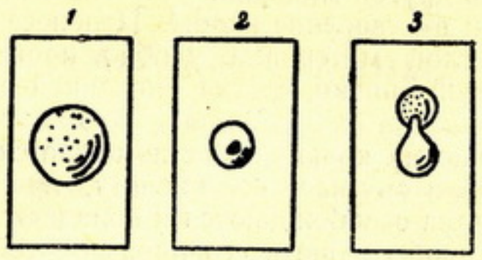


Рис. 29. Методы наложения реактива при микрохимическом анализе.
1 — смешение капель; 2 — введение кристаллика реактива;
3 — слияние капель.

1. Смешение капель. К капле испытуемого раствора добавляют непосредственно каплю реактива. Применяется в том случае, если испытуемый минерал имеется в достаточном количестве.

2. Воздействие твердым реактивом. В каплю испытуемого раствора вводят маленькую крупиночку (не более половины булавочной головки) сухого реактива. Так употребляются реактивы: иодистый калий, хлористый цезий, двухромовокислый аммоний и др.

3. Слияние капель. Капля реактива помещается рядом с каплей испытуемого раствора. Острым концом тонкой стеклянной палочки между этими каплями делается канальчик, по которому реактив вливается в испытуемую каплю. Кристаллы появляются в месте соприкосновения капель. Этот способ наиболее чувствительный, и его следует применять при недостатке испытуемого материала.

4. Добавление капли реактива к сухому остатку. Капля реактива добавляется к сухому остатку, полученному после выпаривания кислоты. Стеклышко должно быть предварительно охлаждено. Таким путем делается реакция на никель с диметилглиоксимом или на мышьяк с молибденовокислым аммонием.

Наблюдение результатов реакции. Изучение кристаллического осадка производится под микроскопом в проходящем свете, обычно при объективах 9× (№ 3) или реже 21× (№ 5).

Если концентрация вещества в капле испытуемого раствора высокая, кристаллы появляются сразу после добавления реактива. В противном случае следует подождать 5—10 мин. или опустить стеклянную палочку в каплю и потереть пластинку. При слабой концентрации раствора кристаллы появляются быстрее по краям капли (при способе 1) или в месте соприкосновения капель (при способе 3).

При изучении кристаллического осадка надо обращать внимание на размеры кристаллов, их форму, цвет и поведение в поляризованном свете при скрещенных николях. Наиболее важными определяющими признаками являются цвет и форма кристаллов.

Присутствие посторонних элементов иногда вредит реакции, и выпадающие кристаллики могут иметь искаженную форму или иной цвет.

Иногда принимают за продукт реакции кристаллы, образующиеся в результате испарения и кристаллизации самого реактива. Чтобы не сделать ошибки, рекомендуется в сомнительных случаях просмотреть под микроскопом усохшую каплю реактива.

Бывают случаи, когда после реакции кристаллы не образуются, а получается лишь окрашивание капли в характерный цвет (например, реакция на железо с роданистым аммонием).

4. ОПИСАНИЕ ВАЖНЕЙШИХ МИКРОХИМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Цинк. Лучшей реакцией на цинк является испытание с роданистой аммонийно-ртутной солью $2NH_4CNS \cdot Hg(CNS)_2$.

Этот реактив употребляется для испытаний на Zn, Cu, Co, Cd, Ni, Fe, Ag, Pb. Способ его приготовления следующий: берут 3,0 г хлорной ртути (сулемы) и 3,3 г роданистого аммония и разводят их в 5,0 см³ воды при комнатной температуре.

Раствор вещества для реакции должен быть нейтральный, или слабо уксуснокислый, или азотнокислый. Из щелочных растворов осадок не выпадает. Реактив добавляется к капле испытуемого раствора в минимальном количестве на кончике заостренной стеклянной палочки.

Продуктом реакции на цинк будут белые перистые кристаллы, похожие на снежинки, двойной роданистой соли цинка и ртути $Zn(CNS)_2 \cdot Hg(CNS)_2$.

Предельная низшая концентрация испытуемого раствора — 0,01% $Zn(C_2H_2O_2)_2 \cdot 2H_2O$ [1]. При концентрации в 1% осадок обычно аморфный. Лучшие результаты получаются при концентрации раствора 0,1—0,2%. Сильно действует на цинковую реакцию медь — образуются смешанные кристаллы. При содержании в растворе 0,5% Zn и 0,2% Cu реакция на цинк будет уже неудовлетворительной.

Медь. Испытание лучше всего производить тем же реактивом и в тех же условиях, что и на цинк. Продуктом реакции будет двойная роданистая соль меди и ртути

$$Cu(CNS)_2 \cdot Hg(CNS)_2.$$

Из растворов довольно высокой концентрации выпадают пучки мохоподобных дендритов зелено-желтого цвета; из менее концентрированных растворов выпадают призматические, игловидные кристаллы зелено-желтого цвета.

Посторонние элементы обычно не мешают испытанию на медь.

Низший предел реакции — 0,01%-ный раствор $Cu(NO_3)_2$.

Кобальт. Испытание вполне аналогично испытанию на цинк и медь. Продуктом реакции будет двойная роданистая соль кобальта и ртути $Co(CNS)_2 \cdot Hg(CNS)_2$.

Из концентрированных растворов выпадают пучки темно-синих призм, из более разведенных растворов — синие сферолиты.

Реакция хорошо протекает в азотнокислом растворе (HNO_3 1 : 7).

---

[1] Подсчет минимального количества соли цинка, которое может быть обнаружено микрохимическим методом, производится следующим образом: одна капля имеет вес около 0,03 г; 0,01% одной капли составит $\frac{0,03 \cdot 0,01}{100} =$ = 0,000003 г, т. е. 0,003 мг.

Предел реакции — 0,04%-ный раствор $Co(NO_3)_2$.

При содержании в растворе большого количества никеля по краю капли появляются синие сферолиты. Небольшое содержание железа не вредит реакции, но при отношении Co к Fe выше, чем 1 : 5, появляются черные или пурпурно-черные призмы и сферолиты.

Никель. Никель может быть открыт с помощью того же реактива, что и Zn, Cu, Co. В результате реакции выпадают светло-коричневые сферолиты $Ni(CNS)_2 \cdot Hg(CNS)_2$.

Когда в растворе имеется железо, сферолиты окрашены в розовый цвет.

Наиболее чувствительным микрохимическим испытанием на никель является испытание с диметилглиоксимом.

Спиртовой 2%-ный раствор этого реактива разводится равным объемом воды (чтобы капля не расплывалась на стекле); получается 1%-ный спиртово-водный раствор. Осаждение происходит в нейтральном, слабо щелочном и слабо уксуснокислом растворе. В результате реакции образуются тончайшие розового цвета иглы $Ni(C_4H_7N_2O_2)_2$, которые при скрещенных николях имеют зеленый цвет.

Двухвалентное железо дает с диметилглиоксимом красноватый осадок, который мешает реакции. Поэтому железо следует предварительно осадить из капли испытуемого раствора 1%-ным раствором аммиака.

Раствор диметилглиоксима добавляют прямо в каплю аммиачного раствора; студенистый осадок гидроокиси железа уже не мешает реакции.

Предел испытания — 0,02%-ный раствор $Ni(NO_3)_2$.

Железо. Железо обычно открывается попутно с Zn, Cu, Co в результате реакции с двойной роданистой солью. В случае присутствия железа раствор окрашивается в кирпично-красный цвет. Эта реакция очень чувствительна [0,02%-ный раствор $Fe(NO_3)_2$] и вполне надежна. Железо можно также открыть железосинеродистым калием — получается синий аморфный осадок берлинской лазури.

Свинец. Лучшее микрохимическое испытание на свинец производится с иодистым калием. Минерал растворяется в HNO_3 1 : 1 (не крепче) при слабом нагревании. После полного испарения капли остаток растворяется 0,5%-ной уксусной кислотой и испытывается с минимальной крупинкой иодистого калия. В результате реакции образуются шестигранные пластинки PbI_2 зеленовато-желтого цвета, которые хорошо видны при объективе 21× (№ 5).

При высыхании капли по ее краю обычно появляются бесцветные иглы двойной соли $2KI \cdot PbI_2$. Медь и висмут мешают этой реакции.

Предел реакции — 0,005%-ный раствор $Pb(NO_3)_2$.

Второе хорошее испытание на свинец производится с помощью HCl 1 : 5. В результате реакции образуются длинные белые игольчатые кристаллы $PbCl_2$. Это испытание ценно в том отношении, что позволяет открывать свинец в присутствии висмута.

Серебро. Обычно серебро открывается с помощью двухромовокислого аммония.

К капле слабо азотнокислого испытуемого раствора добавляется маленькая крупинка $(NH_4)_2Cr_2O_7$. Серебро выделяется в виде двухромовокислой и хромовокислой солей. Первая представлена триклинными кристаллами рубиново-красного цвета, почти не имеющими плеохроизма, вторая — ромбическими желтыми сильно плеохроичными кристаллами.

При испарении капли образуются желтые кристаллы двухромовокислого аммония, которые можно вновь растворить, добавив в каплю 1%-ный раствор HNO_3; серебряные кристаллы в этом случае не растворятся.

Предел реакции — 0,02%-ный раствор $AgNO_3$.

Свинец осаждается в виде аморфного желтого порошка. При отношении Pb к Ag как 10 : 1 открытие серебра этим методом вполне возможно. При большем содержании свинца его необходимо отделить.

Для этого поступают следующим образом. Крупинку серебросодержащего галенита величиной 2—3 мм в поперечнике растворяют в пробирке при слабом нагревании в HNO_3 1 : 1. По охлаждении раствора приливают к нему HCl 1 : 5. Отфильтровывают в воронке на бумажный фильтр белый осадок $PbCl_2$ и AgCl. Промывают этот осадок несколько раз горячей водой для растворения хлористого свинца. AgCl, почти не растворимый в горячей воде в присутствии HCl, остается на фильтре. Осадок AgCl растворяют в капле концентрированного аммиака и наблюдают под микроскопом; по мере испарения по периферии капли образуются маленькие бесцветные высокопреломляющие кубики AgCl.

Золото. Микрохимическое испытание на золото может понадобиться в случае обнаружения теллуридов золота, которые не характерны по своему внешнему виду.

Теллурид Au разлагается HNO_3 1 : 1, в результате чего образуются густая белая аморфная теллуристая кислота и металлическое золото. Теллуристая кислота растворяется в HCl 1 : 5. Оставшееся золото может быть обнаружено по цвету, который нужно наблюдать в косом отраженном свете. Для проверки золото растворяется в капле царской водки при нагревании и разбавляется водой. Для обнаружения Au в растворе применяют одну из следующих реакций:

1. Реактивом служит 5%-ный раствор $SnCl_2$ в HCl 1 : 5. Испытание производится по способу слияния капель. Там, где растворы смыкаются, образуется аморфный красноватый осадок тонкораспыленного металлического золота. Предел реакции — 0,1%-ный раствор хлорного золота. В сходных условиях селеновая кислота дает красный осадок, а теллуровая — тусклочерный. Поэтому они мешают реакции на золото.

Реактивом служит 1 объем пиридина, смешанный с 9 объемами 40%-ного раствора HBr. Испытание также производится по способу слияния капель. В осадке образуются призматические или перистые сильно плеохроичные кристаллы; цвет их меняется от каштанового до оранжевого. Предел реакции — 0,02%-ный раствор хлорного золота.

Олово. Наиболее распространенный оловосодержащий минерал — касситерит. Растворение его производится следующим образом. Крупинка минерала сплавляется с содой в платиновом ушке. Сплав растворяется в HCl 1 : 5.

При определении олова в сульфосолях минерал растворяется в HNO_3 1 : 1. Для удаления нитратов осадок выщелачивается тремя каплями HNO_3 1 : 7 и потом каплей воды. Олово остается в осадке и растворяется каплей HCl 1 : 5. Капля полученного солянокислого раствора испытывается крупинкой хлористого цезия (или хлористого рубидия). В результате реакции получаются бесцветные сильно преломляющие октаэдры цезиевого (или рубидиевого) хлоростанната $CsSnCl_6$ или $RbSnCl_6$.

Предел реакции — 0,01%-ный раствор $SnCl_2$.

Мышьяк. Минерал разлагается HNO_3 1 : 1 или царской водкой. Остаток растворяется HNO_3 1 : 7. Если присутствует сурьма, то она остается в осадке.

Капля, перенесенная на новое место стеклянной пластинки, медленно выпаривается на электролампе или спиртовой горелке. Когда капля почти высохнет, к ней добавляют 1,5%-ный раствор молибденовокислого аммония в HNO_3 1 : 7. Этот раствор вторично медленно выпаривают на высоте не менее 10 см от спиртовой горелки. К высушенному остатку добавляют каплю HNO_3 1 : 7 для растворения избытка молибденовокислого аммония.

При рассмотрении капли под микроскопом при сильном увеличении (объектив № 6) наблюдаются маленькие желтые октаэдры мышьяково-молибденовокислого аммония.

Предел реакции — 0,01%-ный раствор $(NH_4)_3AsO_4$.

Сурьма и висмут. Микрохимические испытания этих элементов одинаковы, поэтому их описание дается совместно.

Минерал разлагается в HNO_3 1 : 1 при нагревании. Сухой остаток растворяется каплей HCl 1 : 5. Капля переносится на другое место пластинки, и к ней добавляется реактив. С одного края капли помещается маленькая крупинка иодистого калия, после растворения которой с противоположной стороны капли кладется маленькая крупинка хлористого цезия.

Если в растворе присутствует сурьма, будут выпадать кри-

сталлы в виде шестиугольников и звезд оранжевого цвета; если присутствует висмут, будут выпадать кристаллы в виде шестиугольников красного цвета.

Предел реакции — 0,01%-ный раствор $SbCl_3$ и 0,005%-ный раствор $BiCl_3$.

Микрохимическое испытание на сурьму и висмут, если они присутствуют совместно, является трудным и не всегда возможным.

Сера. При обработке большинства содержащих серу минералов царской водкой при нагревании часть серы окисляется в H_2SO_4, а часть остается в виде твердого элемента. Высушенный осадок растворяется HCl 1 : 5.

Капля слабо солянокислого раствора испытывается уксуснокислым кальцием. Реактив добавляется к капле в твердом виде. В результате реакции получаются бесцветные игольчатые и призматические кристаллы гипса $CaSO_4 . 2H_2O$, для которых характерны двойники с ласточкиными хвостами. Мышьяковая кислота и хлорное железо замедляют кристаллизацию гипса, но не прекращают ее.

Предел реакции — 0,25%-ный раствор H_2SO_4.

5. КАЧЕСТВЕННЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПО МЕТОДУ ОТПЕЧАТКОВ

Если к полированной поверхности шлифа с испытуемым рудным минералом приложить желатинированным слоем фотобумагу, предварительно смоченную растворителем (раствор соли или кислоты), и после этого фотобумагу поместить в соответствующий «проявитель» (раствор соли, дающей цветные не растворимые в воде осадки с испытуемым элементом), то на бумаге получатся цветные отпечатки, характерные для определенных элементов. По таким локальным цветным реакциям можно определять минералы и уточнять представления об их составе и структуре. Для отпечатков употребляют обычную фотобумагу или пленку, предварительно обработанную раствором гипосульфита для удаления солей серебра, тщательно промытую дистиллированной водой и просушенную. Хорошие результаты получаются также на целлофане.

При работе с минералами, труднорастворимыми, но проводящими электричество, скорость растворения, а также интенсивность отпечатка можно значительно повысить применением электрического тока. Для этой цели образец соединяется с положительным полюсом гальванической батареи; с полированной поверхностью шлифа приводится в контакт смоченная растворителем желатинированная бумага, а сверху прижимается платиновая или алюминиевая пластинка. Последняя прижимается к бумаге небольшим грузом и соединяется с отрицательным полюсом батареи (ток напряжением от 3 до 12 в).

Чтобы обеспечить контакт желатинированной бумаги и полированной поверхности шлифа, используется ручной пресс с грузом или специальный пресс для отпечатков, описанный С. А. Юшко [1].

С одного и того же зерна можно получить несколько отпечатков (для реакции на несколько элементов), не прибегая к восстановлению полированного шлифа. Четкость и интенсивность цветных реакций заметно снижается лишь на пятом-шестом отпечатке.

Для открытия анионов (например, серы) в составе минералов необходимо при электрическом растворении переменить в цепи направление тока: присоединить к минералу отрицательный полюс источника, а к платиновой пластинке — положительный.

С. А. Юшко (1953 г.) приводит следующие условия получения четких и устойчивых отпечатков.

1. Фотобумага перед получением отпечатка должна быть влажной, но не мокрой.

Избыток реактива-растворителя следует удалять с помощью фильтровальной бумаги.

2. При обработке фотобумаги последовательно несколькими реактивами перед нанесением нового реактива избыток предыдущего необходимо снять фильтровальной бумагой.

3. Перед получением отпечатка поверхность полированного шлифа должна быть хорошо отполирована.

4. Время экспозиции, т. е. время растворения минерала, должно быть установлено по качеству и стойкости отпечатка. Качество отпечатка определяется отложением химического элемента только в порах желатины, а не на ее поверхности.

5. Реактив-проявитель должен давать с испытуемым элементом нерастворимые в воде, а следовательно, и несмываемые соли.

Преимущества данного метода заключаются в том, что при нем можно избежать трудоемкой и не всегда доступной операции выделения зерен минералов иглой для микрохимического анализа; кроме того, он дает возможность получать отпечатки, характеризующие структуру руды.

Недостатком этого метода является известная субъективность оценки результатов реакции на тот или иной элемент по цветным отпечаткам, в то время как при микрохимическом методе результат реакции можно оценить значительно увереннее — не только по цвету, но и по форме и оптическим свойствам кристаллов.

Подробное описание метода отпечатков можно найти в книге С. А. Юшко «Методы изучения руд под микроскопом в от-

---

[1] С. А. Юшко. Применение метода отпечатков в минераграфии. Изв. Ак. наук СССР, серия геол., № 3, 1939.

Таблица 10

Таблица некоторых реакций, выполняемых по методу отпечатков
(по С. А. Юшко)

Искомый элемент	Растворитель	Время травления	Проявитель	Окрашивание	Примечание
Вольфрам	Соляная кислота 1:2	2—5 мин.	Хлористое олово в соляной кислоте (горяч.)	Синее	Отпечаток нечеткий
Железо	Соляная кислота 1:20	Э. т[1] 4 в. 30—60 сек.	Желтая кровяная соль, 5 %-ный раствор	Синее	Мешает избыток Cu
Кобальт	Аммиак 25 %-ный	Э. т. 4 в. 1—2 мин.	Рубеановая кислота, 0,5 %-ный спиртовой раствор	Желтовато-оранжевое	Мешают Cu, Ni; нужно отпечаток промыть 1 %-ным раствором KCN
Медь	Аммиак 25 %-ный	Э. т. 4 в. 30—60 сек.	Рубеановая кислота	Темнозеленое	Мешает Ni
,,	Соляная кислота 1:20	Э. т. 4 в. 15—30 сек.	Желтая кровяная соль, 5 %-ный раствор	Розово-коричневое	Мешает избыток Fe
Молибден	Азотная кислота концентрированная	5 мин.	Ксантогенат калия	Фиолетово-красное	
Мышьяк	Аммиак 25 %-ный 5 ч. + пергидроль 1 ч.	Э. т. 4 в. 30—60 сек.	Азотнокислое серебро. 1—2 %-ный раствор	От коричневого до черного	Желтоватое окрашивание дает Sb
Никель	Аммиак 25 %-ный	Э. т. 4 в. 1—2 мин.	Диметилглиоксим, 1 %-ный спиртовой раствор	Малиновое	Мешают железо и медь

Продолжение таблицы 10

Искомый элемент	Растворитель	Время травления	Проявитель	Окрашивание	Примечание
Никель	Аммиак 25 %-ный	Э. т. 4 в. 1—2 мин.	Рубеановая кислота	Розово-фиолетовое	Мешает Cu
Олово	Сулема, насыщенный раствор	1—2 мин.	Анилин	Медленно образуется черное	Отпечаток нестойкий
Свинец	а) Уксусная кислота 1:10	Э. т. 4 в. 30—60 сек.	Иодистый калий с хлористым оловом	Светложелтое	Растворитель готовить перед употреблением. Осадок от прибавления к KJ $Sn\,Cl_2$ растворить в $Cd\,(NO_3)_2$
	б) Уксусная кислота + азотная кислота концентрированная				
Сера	Соляная или азотная кислота 1:20	Э. т. 4 в. обратное направление 1—2 мин.	Прямой отпечаток на бромосеребряной бумаге	От коричневого до черного	Закрепляется отпечаток 5 %-ным гипосульфитом.

[1] Э. т. — электрический ток.

раженном свете» (Госгеолиздат, 1949), в которой приводится рецептура для проведения реакций по методу отпечатков на следующие элементы: Bi, Fe, Co, Mn, Cu, Mo, As, U, Ni, Pb, S, Ti, Zn.

В таблице 10 приведены важнейшие реакции, выполняемые по этому методу.

6. ПЛЕНОЧНЫЕ РЕАКЦИИ

Окрашенные пленки образуются на поверхности минералов после обработки их известными реактивами.

Метод описан С. А. Юшко (1953 г.), которая широко применяет его для определения карбонатов.

Приведем описание некоторых характерных пленочных реакций.

Кальцит. Минерал обрабатывается молярным раствором азотнокислой меди в течение 3—4 часов. На поверхности кальцита должна появиться голубая окраска, которая усиливается от действия 10%-ного раствора аммиака (не более 30 сек.). Эта реакция выполняется на пришлифованных образцах или на полированных шлифах.

В случае очень мелких и тонких обособлений кальцита рекомендуется реакцию проводить на шлифах или на полированных шлифах с помощью фиолетовых чернил, подкисленных HCl 1 : 20. Каплю подкисленных чернил помещают на поверхность непокрытого шлифа и держат не более 1 минуты. Потом каплю снимают, шлиф подсушивают фильтровальной бумагой и наблюдают пленку фиолетового цвета на месте кальцита.

Анкерит можно установить в пришлифованном образце, шлифе, полированном шлифе с помощью 5%-ного раствора красной кровяной соли, подкисленной соляной кислотой. Под действием этого реагента анкерит окрашивается в синий цвет вследствие образования на его поверхности синей пленки турнбулевой сини.

Для выполнения этой реакции образец опускают в 5%-ный раствор красной кровяной соли, к которому добавлено равное по объему количество соляной кислоты (1 : 20). По истечении 1 минуты образец вынимают из раствора, промывают водой и просушивают фильтровальной бумагой.

Реакция на прозрачном шлифе выполняется путем наложения капли реактива. С помощью этой реакции можно открывать в руде и другие железистые карбонаты — пистомезит, сидероплезит, сидерит.

Mn-карбонаты. Если в шлифе присутствуют манганоанкерит или манганокальцит, то при действии только что указанного реактива на них образуется бурая пленка.

Сидерит в прозрачном шлифе под действием солянокислого ализарина покрывается пленкой малинового цвета ализаринового лака.

Англезит. Для определения англезита на полированную поверхность минерала или шлифа накладывают каплю 5%-ного раствора иодистого калия и наблюдают пленку желтую в проходящем свете и сероголубую — в отраженном (церуссит этой реакции не дает).

Церуссит. Для определения этого минерала накладывают каплю иодистого калия, подкисленного серной кислотой, и наблюдают желтую пленку.

Смитсонит, каламин, гидроцинкит. На поверхность шлифа накладывают каплю смеси из азотнокислой меди (1%-ный раствор) и азотной кислоты (1 : 20) в равных объемах, а затем каплю ртутно-родановой соли. В результате получают пленку сине-фиолетового цвета.

Антимонит. На полированную поверхность минерала накладывают каплю 20%-ного раствора едкого калия и после снятия ее наблюдают оранжевую пленку.

Шеелит. На полированную поверхность шлифа накладывают каплю концентрированной соляной кислоты и кусочек олова. Через 1—3 минуты шлиф просушивают фильтровальной бумагой. В результате появляется синяя пленка. Реакция удается лучше, если кислоту подогреть.

Псиломелан, пиролюзит. На поверхность минерала накладывают реактив (уксуснокислый бензидин) и спустя 1 минуту снимают его фильтровальной бумагой. Результат — синяя пленка.

Арагонит. Полированную поверхность образца погружают в горячий раствор азотнокислого кобальта (20%-ный раствор) на 20 минут. Затем промывают и просушивают. В результате образуется пленка розово-лиловая (кальцит такой реакции не дает).

Магнезит. Реактивом служит спиртовой раствор дифенилкарбазида в смеси с равным объемом едкого калия (20%-ный раствор). Полированную поверхность погружают на 5 минут в горячий реактив и промывают горячей водой. Результат—краснофиолетовая пленка (доломит этой реакции не дает).

УПРАЖНЕНИЯ

Ознакомление с характерными кристаллами под микроскопом

Прежде чем приступить к микрохимическим испытаниям, необходимо ознакомиться с кристаллическими осадками, получающимися из чистых растворов требуемой концентрации. Для этой цели имеется в лаборатории следующий набор растворов солей

уксуснокислый цинк	0,5%	азотнокислое серебро	0,5%
азотнокислая медь	0,5%	хлорное олово	0,5%
азотнокислый кобальт	0,5%	мышьяковокислый аммоний	0,5%
азотнокислый никель	0,2%	треххлористая сурьма	0,5%
хлорное железо	0,2%	треххлористый висмут	0,2%
уксуснокислый свинец	0,2%	серная кислота	0,5%
хлорное золото	0,2%		

Рекомендуется провести микрохимические испытания с несколькими солями (3—4) из этого набора. Для этого подбирается требуемый реактив и в соответствующих условиях проводится реакция. Образовавшийся осадок просматривается под микроскопом. Необходимо обратить внимание на форму и цвет кристаллов, а также на поведение их в поляризованном свете (см. разделы 3 и 4 настоящей главы).

Микрохимическая реакция минерала

Нужно найти под микроскопом при слабом увеличении (объектив 3,7× или № 1) минерал, предназначенный для микрохимического испытания. Из него берется проба путем высверливания вручную стальной иглой или с помощью бормашины. Сырой заостренной спичкой высверленный материал переносится с полированного шлифа в каплю HNO_3 1 : 1 или царской водки, находящуюся на стекле. Капля медленно выпаривается.

Если минерал не растворяется в царской водке, то его сплавляют с содой или бурой с помощью паяльной трубки.

Остаток растворяется в HNO_3 1 : 7 или HCl 1 : 5. Капля помещается на новое место стеклянной пластинки и добавляется реактив. Затем капля рассматривается под микроскопом в проходящем свете (объектив 9× или № 3), и изучаются получившиеся кристаллы.

Микрохимические испытания рекомендуется провести с некоторыми из следующих минералов: сфалеритом (Zn), борнитом (Cu), галенитом (Pb), арсенопиритом (As), пентландитом (Ni), кобальтином (Co) и стибнитом (Sb).

Испытание по методу отпечатков

Для работы необходимо иметь: полированный шлиф, пресс, алюминиевую пластинку, гальванические элементы или аккумуляторы, желатинированную бумагу.

Рекомендуется провести испытания и получить отпечатки со следующих минералов: пирита (Fe), халькопирита (Cu), пентландита (Ni) и арсенопирита (As) (см. раздел 5 настоящей главы).

Пленочные реакции

Произведите испытание пришлифованных образцов или полированных шлифов на получение цветных пленок:

а) для кальцита с азотнокислой медью и с подкисленными фиолетовыми чернилами;

б) для анкерита или сидерита с красной кровяной солью;

в) для церуссита с иодистым калием;

г) для шеелита с соляной кислотой и металлическим оловом.

Изучите условия образования цветных пленок и запомните их окраску (см. раздел 6-й настоящей главы).

XIII

ТАБЛИЦЫ МИНЕРАЛОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

Всего в таблицах настоящего руководства приведено 147 рудных непрозрачных и полупрозрачных, а также главнейших сопровождающих минералов. Точное определение сопровождающих (нерудных) минералов минераграфическим методом затруднительно, но знание их свойств в отраженном свете и умение отличать от рудных минералов являются необходимыми.

В список рудных минералов включены почти все минералы, с которыми приходится иметь дело студентам при прохождении курса геологии рудных месторождений. Кроме того, в список вошли многие редкие минералы, известные на территории СССР, а также распространенные и важные полупрозрачные и сопровождающие минералы. Кроме того, учитывая последние достижения в изучении вещественного состава руд, в этот список мы поместили новые, а также интересные в генетическом отношении минералы: вернадит, бравоит, маггемит, мельниковит и др.

По степени распространения в рудных месторождениях приведенные в списке минералы могут быть разделены на четыре группы:

1. Весьма распространенные	— 20	минералов
2. Распространенные	— 43	»
3. Редкие	— 58	»
4. Очень редкие	— 26	»
Всего	147	минералов.

Весьма распространенные и распространенные минералы в нижеприведенных таблицах выделены шрифтом.

2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ ПОД МИКРОСКОПОМ В ОТРАЖЕННОМ СВЕТЕ

В большинстве старых руководств по минераграфии в основу определения рудных минералов положено диагностическое травление. Этот метод имеет недостаток, заключающийся в том, что после его применения в протравленных минералах невозможно установить оптические и физические свойства (цвет, отражательную способность, поляризацию, твердость и др.) без повторной полировки шлифа. К тому же значительная часть рудных минералов может быть определена без применения длительной и кропотливой процедуры травления (дающей не всегда надежные результаты) с помощью физических признаков.

Автор считает необходимым положить в основу минераграфического определения рудных минералов измерение их оптической константы — показателя отражения. В практике минераграфии при определении непрозрачных минералов измерения показателя отражения должны играть столь же важную роль, как измерения показателей преломления при петрографическом исследовании прозрачных минералов. Показатель отражения рекомендуется измерять с помощью микрофотометра, предложенного автором, или путем сравнения с минералами-эталонами, как это описано в главе V. Показатель отражения минералов в таблицах настоящего руководства приведен для желтого света по данным И. С. Волынского и других исследователей.

Вторым ведущим признаком в определительных таблицах является твердость. Твердость определяется медной и стальной иглами, с помощью которых вполне можно по твердости выделять три группы минералов. Если твердость минерала переменная или минерал по твердости стоит на грани двух смежных групп, такой минерал помещен в таблицах два раза. Менее характерное по твердости положение минерала в данной группе обозначается взятием названия этого минерала в квадратные скобки.

Приводимые таблицы предусматривают также определение цвета, двуотражения, явлений поляризации и внутренних рефлексов минералов. Цвета минералов определяются путем сопоставления с минералами-эталонами, указанными в главе VI.

Двуотражение отмечается в случае резкого его проявления указанием крайних значений показателя отражения.

По отношению к поляризованному свету минералы разделяются на изотропные, слабо анизотропные и сильно анизотропные. Если явление анизотропии ослаблено влиянием внутренних рефлексов, то выражение анизотропности заключается в скобки.

Сильно выраженные внутренние рефлексы, хорошо видимые с сухими объективами в косом свете, обозначаются (в); слабо выраженные внутренние рефлексы, видимые лишь с иммерсией или в виде порошка, обозначаются (м)[1].

Определение минералов производится с помощью трех таблиц физических признаков (стр. 158—166) с обязательным использованием описаний отдельных минералов, помещенных в следующей главе XIV. Определение неизвестного минерала выполняется по методу исключения следующим образом.

Сначала надо установить два ведущих признака: показатель отражения и твердость. Это позволит из 22 прямоугольников таблиц остановиться на одном, включающем группу возможных минералов. Далее определяются цвет, двуотражение, отношение к поляризованному свету и внутренние рефлексы минерала. Это позволит остановиться на одном или нескольких минералах в пределах этой группы.

В первом случае определение минерала является по существу законченным и следует лишь внимательно прочесть сводное описание минерала, чтобы окончательно убедиться в правильности его определения. Во втором случае одних физических признаков для определения минерала будет недостаточно и следует прибегнуть дополнительно к травлению. Поясним сказанное примерами.

Пример 1. Для минерала определено: R от 40 до 49%, твердость средняя, цвет желтый, слабо анизотропен, рефлексы отсутствуют.

В таблице II в прямоугольнике 3-м сверху (R от 40 до 49%) из восьми минералов указанным признакам удовлетворяет лишь один халькопирит.

Пример 2. Для минерала установлено: R от 50 до 59%, твердость средняя, цвет желтый, сильно анизотропен, внутренних рефлексов нет.

В таблице II в прямоугольнике 2-м сверху (R от 50 до 59%) находим из пяти минералов лишь один, удовлетворяющий указанным признакам; это будет миллерит. Ясное двуотражение и игольчатая форма зерен окончательно убеждают нас в правильности определения.

Пример 3. Для минерала установлено: R от 30 до 39%, твердость низкая, цвет белый, сильно анизотропен, сильное двуотражение, внутренние рефлексы при наблюдении в воздухе не подмечены.

В таблице I останавливаемся на прямоугольнике 4-м сверху, в котором из 10 минералов установленным признакам близко отвечают три минерала: анимонит джемсонит и бертьерит. Произведенное диагностическое травление показало, что минерал от действия HNO_3 темнеет, а с KOH образует интенсивный осадок оранжевого цвета. Эти дополнительные данные травления указывают, что определяемый минерал будет антимонит.

Пример 4. Установлены следующие признаки минерала: отражение от 10 до 19%, твердость высокая, цвет серый, изотропен, внутренние рефлексы бурые, видимые в масле.

В таблице III в прямоугольнике 6-м сверху из 12 минералов этим признакам отвечают два: хромшпинелид и уранинит. Произведенное травление показало, что все реактивы на них не действуют. Окончательное определение минерала в этом случае может быть произведено после качественной химической реакции на хром и уран.

---

[1] «в» и «м» — первые буквы слов «воздух» и «масло».

В практике минерапрафических исследований определение минерала в полированных шлифах может быть облегчено еще наблюдением некоторых дополнительных свойств (магнитность, форма зерен, спайность, двойники), а также знанием парагенезиса минерала и знакомством с полными химическими анализами руд.

Порядок работы по минерапрафическому определению образца и рекомендуемая форма записи результатов наблюдений приведены в табл. 17.

Нижеприведенные таблицы и сводные описания минералов предназначены автором в основном для учебных целей. При исследовательских работах в области минерапрафии необходимо также использовать полные определители и развернутые описания минералов (см. список литературы).

Наиболее углубленное и полное руководство по минерапрафии на русском языке принадлежит И. С. Волынскому—«Определение рудных минералов под микроскопом», тома I, II, III, Госгеолиздат, 1947, 1949.

Кроме того, в 1955 г. И. С. Волынский выступил со статьей «О взаимосвязи оптических свойств рудных минералов», в которой он рассмотрел зависимость между: 1) отражательной способностью и степенью просвечивания; 2) между цветом минерала в отраженном свете и цветом внутренних рефлексов.

Учитывая эти взаимосвязи, И. С. Волынский предложил новый вариант систематики рудных и главнейших жильных минералов в виде цветной сводной таблицы, в которой обращено внимание на диагностику минералов, обладающих сходными признаками.

Таблица I

СВОДНЫЕ ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Минералы низкой твердости

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Серебро	95	Кремово-белый	Изотропный	Нет
	Электрум	до 90	Светложелтый	„	„
Выше	**Медь**	90	Красный	„	„
60	Золото	84	Желтый	„	„
	Сурьма	68	Белый	Слабо анизотропный	„
	Висмут	68	Кремово-белый	Сильно анизотропный	„
	Алтаит	60	Белый	Изотропный	„
	Мышьяк	58	Белый	Сильно анизотропный	Нет
59—50	Калаверит	56	Светложелтый	Слабо анизотропный	„
	Креннерит	56	Желтый	Сильно анизотропный	„
	Клаусталлит	49	Белый	Изотропный	Нет
	Тетрадимит	48	Кремово-белый	Слабо анизотропный	„
49—40	Сильванит	47	„ „	Сильно анизотропный	„
	Айкинит	46	„ „	Слабо анизотропный	„
	Висмутин	48—42	Белый	Сильно анизотропный	„
	Галенит	43	Белый (эталон цвета)	Изотропный	„

Продолжение таблицы 1

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Гессит	41	Серовато-белый	Слабо анизотропный	Нет
49—40	Менегинит	40	Белый	Анизотропный	Красные (м)
	Цилиндрит	40	Серовато-белый	Сильно анизотропный	Нет
	Петцит	39	Серовато-белый	Слабо анизотропный (из.)	Нет
	Иорданит	38	Белый	Слабо анизотропный	"
	Буланжерит	37	Зеленовато-белый	Сильно анизотропный	Красные (м)
	Аргентит	36	Зеленовато-серый	Слабо анизотропный (из.)	Нет
	Штернбергит	44—34	Кремово-розовый	Сильно анизотропный	"
39—30	**Стибнит (антимонит)**	43—30	Белый	" "	Красные (м)
	Джемсонит	38—32	"	" "	" "
	[Пиролюзит]	33			
	Бертьерит	38—27	Белый	Сильно анизотропный	Нет
	Пираргирит	32	Голубовато-серый	" "	Красные (в)
	Полибазит	29	Серовато-белый	Слабо анизотропный	Красные (м)
29—20	Стефанит	28	" "	Сильно анизотропный	Нет
	зин	29; 22	Голубой	Изотропный (ан.)	"

Продолжение таблицы 1

R %	Минерал	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Киноварь	27	Голубовато-белый	Сильно анизотропный	Красные (в)
	Штромейерит	27	Серовато-белый	" "	Нет
	Прустит	27	Голубовато-белый	" "	Красные (в)
	Кермезит	25	Белый	" "	" "
29—20	Метациннабарит	24	Серовато-белый	Изотропный	Нет
	Молибденит	34—15	Белый до серого	Сильно анизотропный	"
	Аурипигмент	31—26	Серый	" "	Желтые (в)
	Ковеллин	26—18	Синий	" "	Нет
	Клокманнит	30—18	Зеленовато-серый	" "	"
	[Борнит]	21			
	Реальгар	20	Серовато-белый	Анизотропный	Красновато-оранжевые (в)
	Умангит	18—16	Красный	Сильно анизотропный	Нет
	Валентинит	16—14	Серый	Анизотропный	Желтые (в)
	Графит	22—5	Розово-серый	Сильно анизотропный	Нет
	Сера	15—10	Серый	Анизотропный	Желтые (в)
19—10	Кераргирит	12	Серый	Изотропный	Желтые (в)

Продолжение таблицы 1

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
19—10	**Боксит**	—	Серый	Изотропный	Красные, желтые, бесцветные (в)
	Вернадит	—	"	"	Бурые (м)
	Гарниерит	—	Серый	Изотропный	Зеленые (в)
	Хризоколла	—	"	"	Светлозеленые (в)
Ниже	Мельниковит	—	Коричнево-серый	"	Нет
10	Ванадинит	—	Серый	(Слабо анизотропный)	Буро-желтые (в)
	Эритрин	—	"	" "	Розовые (в)
	Слюда	—	Темносерый	" "	Белые (в)
	[Кальцит]	6—4			
	[Барит]	6			

Таблица II

Минералы средней твердости

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Платина	70	Белый	Изотропный	Нет
Выше	Дискразит	66	Кремово-белый	" (ан.)	"
60	Железо	64	Белый	"	"
	Маухерит	60	Розово-белый	"	"
	[Мышьяк]	58			
	Саффлорит-раммельсбергит	57	Белый	Сильно анизотропный	Нет
59—50	Миллерит	56	Желтый	" "	"
	Никелин	56—53	Красный	" "	"
	Пентландит	53	Светлокремовый	Изотропный	"
	Халькопирит	47	Желтый	Слабо анизотропный	Нет
	Линнеит и зегинит	46	Розово-белый	Изотропный	"
49—40	[Полидимит]	45			
	Брейтгуптит	50—40	Нежнорозовый	Сильно анизотропный	"
	Бравоит	41	Бледнофиолетовый	Изотропный	"
	Виоларит	40	**Фиолетовый**	"	"

Продолжение таблицы II

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
49—40	Кубанит	40	Кремовый	Сильно анизотропный	Нет
	[Менегенит]	40			
	Пирротин	38	Кремовый	Сильно анизотропный	Нет
	Троилит	38	„	„ „	Нет
	Виттихенит	43	Кремово-белый	Слабо анизотропный	„
	Пиролюзит	33	Серовато-белый	Сильно анизотропный	„
39—30	Бурнонит	33	Зеленовато-серый	Слабо анизотропный	„
	Фрейбергит	32	Серовато-белый	Изотропный	Красные (м)
	Валлериит	46—15	Кремовый	Сильно анизотропный	Нет
	Теннантит	29	Серовато-белый	Изотропный	Красные (м)
	Тетраэдрит	29	„ „	„	Нет
	Куприт	29	Голубовато-белый	Слабо анизотропный (из.)	Красные (в)
	Алабандин	25	Серый	Изотропный	Зеленые (м)
	Люцонит	25	Оранжево-красный	Сильно анизотропный	Нет
29—20	Фаматинит	25	Розовый	„ „	„
	Станнин	24	Серовато-оливковый	Слабо анизотропный	„
	Энаргит	23	Розовато-серый	Сильно анизотропный	Красные (м)
	Германит	22	„ „	Изотропный	Нет

Продолжение таблицы II

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Борнит	21	Розовато-коричневый	Изотропный (ан.)	Нет
29—20	**[Магнетит]**	20			
	Тенорит	20	Серовато-белый	Сильно анизотропный	Нет
	[Лепидокрокит]	20			
	[Турьит]	—			
	[Гётит]	20			
	Сфалерит	17	Серый	Изотропный	Желтые, бурые (в)
	Вуртцит	17	„	Слабо анизотропный	Желтые, бурые (в)
	Гринокит	17	„	Изотропный	Желтые (в)
	[Лимонит]	17	„		
	Гидрогётит	17	„	Изотропный	Желто-бурые (в)
19—10	Манганит	18—16	„	Сильно анизотропный	Красные (м)
	[Вольфрамит]	16			
	[Гюбнерит]	14			
	Цинкит	11	Серый (розоватый)	Слабо анизотропный	Красные, желтые (в)
	Англезит	10	Серый	„ „	Бесцветные (в)

Продолжение таблицы II

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
19—10	**Шеелит**	10	Серый	(Слабо анизотропный)	Бесцветные (в)
	Церуссит	12—8	„	Слабо анизотропный	Бесцветные (в)
	Галмей (каламин)	—	Серый	(Слабо анизотропный)	Бело-зеленые (в)
	Смитсонит	9—3	„	Анизотропный	Бесцветные (в)
	Малахит	9—6	„	„	Зеленые (в)
	Азурит	9—7	„	„	Синие (в)
Ниже	**Сидерит**	9—6	„	„	Бесцветные, желтые (в)
10	**Родохрозит**	—	„	„	Розовые (в)
	Пироморфит	—	„	(Слабо анизотропный)	Белые, зеленые (в)
	Скородит	8—7	„	„ „	Бесцветные, зеленые (в)
	Кальцит	6—4	Темносерый	Сильно анизотропный	Белые (в)
	Барит	6	Серый	(Слабо анизотропный)	Бесцветные (в)
	[Хризоколла]	—			
	[Мельниковит]	—			
	Флюорит	3	Темносерый	Изотропный	Бесцветные, фиолетовые (в)

Таблица III

Минералы высокой твердости

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
Выше 60	[Платина]	70			
	Осмистый иридий	68	Белый, слегка желтоватый	Слабо анизотропный	Нет
	Скуттерудит	60	Белый	Изотропный	Нет
	Арсенопирит	57	Белый	Сильно анизотропный	„
	Глаукодот	57	Бело-розовый	„ „	„
	Леллингит	56	Белый	„ „	„
	Сперрилит	56	„	Изотропный	„
	Хлоантит	56	„	„	„
59—50	Шмальтин	56	„	„	„
	Марказит	55	Желтовато-белый	Сильно анизотропный	„
	Пирит	53	Светложелтый	Изотропный (ан.)	„
	Кобальтин	51	Розоватый	Слабо анизотропный (из.)	„
	Герсдорфит	49	Белый	Изотропный	Нет
49—40	[Линнеит и зигенит]	46			
	Полидимит	45	Желтый	Изотропный	Нет

Продолжение таблицы III

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
39—30	Полианит?	33			
	Псиломелан	30; 20	Серовато-белый	Изотропный (ан.)	Бурые (м)
	Гематит	25	Серовато-белый	Анизотропный	Красные (м)
	Магнетит	20	Серый	Изотропный	Нет
	Маггемит	23	„	„	Бурые (нет)
	Якобсит	20	Серовато-белый	„	Красные (м)
	Рутил	20	„ „	Слабо анизотропный	Оранжевые (в)
29—20	**Гётит**	20	„ „	Сильно анизотропный	Коричневые (в)
	Турьит	20		Анизотропный	Красные (в)
	Лепидокрокит	20	Серый	Слабо анизотропный	„ „
	Гаусманит	20	„	Сильно анизотропный	Красные, бурые (м)
	Браунит	18	Серый	Слабо анизотропный	Бурые (м)
19—10	Колумбит-танталит	18	Серовато-белый	„ „	Буро-красные (м)
	Лимонит	17	Серый	Изотропный (ан.)	Бурые (в)
	Ильменит	17	Буровато-серый	Сильно анизотропный	Темнобурые (м)

Продолжение таблицы III

R %	Минералы	Показатель отражения	Цвет	Отношение к поляризованному свету	Внутренние рефлексы
	Ферберит	17	Серый	Слабо анизотропный	Красные (м)
	Вольфрамит	16	„	„ „	Красно-бурые (м)
19—10	**Франклинит**	16	„	Изотропный	Красные (м)
	Уранинит	14	„	„	Бурые (м)
	Хромит (хромшпинелид)	14	„	„	Желто-бурые (м)
	Гюбнерит	14	„	Анизотропный	Бурокрасные (м)
	Касситерит	11	„	„	Желто-бурые (в)
	[Шеелит]	10	„		
	Гранат	9	Серый	Изотропный	Бесцветные, бурые (в)
	Оливин	8	Темносерый	(Слабо анизотропный)	Бесцветные (в)
Ниже	Титанит	—	Серый	„ „	„ „
	Полевой шпат	—	Темносерый	„ „	„ „
10	**Пироксен**	—	„	„ „	„ „
	Кварц	4,5	„	„ „	Светлые, иризирующие (в)

ГЛАВА XIV

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛОВ, ВОШЕДШИХ В ТАБЛИЦЫ

Ниже приводится описание отдельных минералов по следующей форме. После наименования минерала указываются его химическая формула и степень распространения; для каждого из минералов приводятся сингония, показатель отражения для желтого света, цвет, твердость, отношение к поляризованному свету, диагностическое травление. Прочие свойства (внутрение рефлексы, магнитность и др.) указываются только для тех минералов, для которых они характерны. Минералы расположены в алфавитном порядке.

1. Азурит $2CuCO_3 . Cu(OH)_2$. Распространенный

Моноклинная. Форма: натечная, радиальнолучистая, неправильные скопления, полигональные зерна. Спайности нет. В отраженном свете имеет серый цвет с еле заметным розовым оттенком.

R 9—7%; двуотражение слабое. В косом свете синий. Твердость средняя (С). Порошок голубовато-белый, иногда с зеленым оттенком. В скрещенных николях эффекту поляризации мешают яркие синие цвета внутренних рефлексов.

HNO_3 — интенсивное вскипание; от растворения поверхность минерала становится шероховатой и выявляется структура полигональных зерен. HCl — действует так же, как и HNO_3. $FeCl_3$ — выявляется структура. От продолжительного действия KOH (10 мин.) слабо выявляется структура. KCN и $HgCl_2$ — не действуют, иногда слабо выявляется структура.

2. Айкинит $Cu_2S . 2PbS . Bi_2S_3$. Редкий.

Ромбическая. Обычны игольчатые формы. R 46%. Двуотражение ясно различимое. Цвет сравнительно с галенитом кремово-белый. Твердость низкая. Ясно анизотропен. HNO_3 — медленно вскипает; поверхность окрашивается в черный цвет.

HCl, KCN, $FeCl_3$ и $HgCl_2$ — отрицательны. Характерна ассоциация айкинита с самородным золотом.

3. Алабандин MnS. Редкий.

Кубическая. R 25%. Цвет серый, похожий на цвет сфалерита. Порошок и внутренние рефлексы зеленовато-желтые. Твердость средняя (С). Изотропен. HNO_3 — вскипает и выделяет H_2S; дает коричневое потускнение; иногда выявляет зернистую структуру. HCl — вскипает и выделяет H_2S; дает черное потускнение. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

4. Алтаит PbTe. Редкий.

Кубическая. R 60%. Цвет галенитово-белый. Твердость низкая (В). Изотропен. HNO_3—вскипает и окрашивается в цвета от радужного до темносерого. HCl—вызывает быстрое радужное потускнение. KCN, KOH и $HgCl_2$ — отрицательны. Спайность кубическая, но выражена слабее, чем у галенита: редкие треугольные ямки.

5. Англезит $PbSO_4$. Распространенный.

Ромбическая. Образует призматические кристаллы, иногда очень мелкозернист; бывает колломорфного строения. R 10%. Цвет в отраженном свете серый. Слабо анизотропен. Твердость средняя (С). Полируется хорошо. В косом свете бесцветный, белый или светлоокрашенный от примесей окислов железа. Порошок белый. HNO_3 — слабо выявляется структура. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH и $HgCl_2$ — отрицательны.

6. Аргентит Ag_2S. Редкий.

Кубическая. R 36%; двуотражение очень слабое. Цвет сравнительно с галенитом зеленовато-серый. Твердость низкая (А). Хорошо режется; порошка не дает. Иногда изотропен. В некоторых случаях имеет аномальную анизотропность. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl — пары дают потускнение; ореол не смывается. KCN — окрашивается неоднородно в черный цвет и выявляется структура. $FeCl_3$ — быстро окрашивается в черный цвет. С вольтовой дугой — световое травление. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — быстро окрашивается в черный цвет.

7. Арсенопирит FeAsS. Распространенный.

Ромбическая. Поперечные сечения часто имеют форму ромбиков. R 57%; двуотражение очень слабое. Цвет галенитово-белый. Твердость высокая. Сильно анизотропен; при плохой полировке явление анизотропии трудно заметить. HNO_3 — медленно вскипает и неоднородно окрашивается в радужный цвет; вскипание наблюдается не всегда. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. От леллингита отличается более белым цветом и микрохимической реакцией на серу.

8. Аурипигмент As_2S_3. Распространенный.

Моноклинная. R 31—26%; двуотражение высокое. Цвет серый. Порошок и внутренние рефлексы желтые. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. HNO_3 и HCl — отрицательны. KCN—окрашивается и выявляется структура. $FeCl_3$—отрицательно. KOH — мгновенно окрашивается в темнокоричневый цвет. $HgCl_2$ — отлагается осадок, но поверхность не окрашивается.

9. Барит $BaSO_4$. Распространенный.

Ромбическая. R 6%. Цвет темносерый. Твердость средняя (C) или низкая. Явление анизотропии не наблюдается. Внутренние рефлексы белые или светлоокрашенные. Не травится в кислотах. Имеет спайность.

10. Бертьерит $FeS \cdot Sb_2S_3$. Редкий.

Ромбическая; форма кристаллов призматическая. R 38—27%; двуотражение высокое. Цвет белый. Твердость низкая. Сильно анизотропен. HNO_3 — неоднородное потускнение от коричневых до радужных цветов. HCl — отрицательна; иногда раствор окрашивается в желтый цвет. KCN и $FeCl_3$ — отрицательны. KOH — дает потускнение. $HgCl_2$ — отрицательна.

11. Боксит — механическая смесь гидроокислов алюминия.

Распространенный.

Землистый, глинистый, иногда натечный, желваки, оолиты. Содержит примеси Fe, Ti, Si, Mg и др. Представляет собой тонкодисперсную смесь минералов: диаспора, гидраргиллита, гидроокислов железа и др. Под микроскопом—цвет серый, отражательная способность низкая. В косом свете—красные, желтые, серые, белые внутренние рефлексы; такой же порошок. Изотропен. Твердость низкая. KOH — поверхность разъедается от растворения. HNO_3, HCl, $FeCl_3$, KCN, $HgCl_2$—отрицательны.

12. Борнит Cu_5FeS_4. Весьма распространенный.

Кубическая. Большей частью встречается в сплошных массах или в виде неправильной формы зерен. R 21%. Цвет розово-коричневый. Твердость низкая до средней (B — C). Обычно изотропен, но иногда имеет слабую аномальную анизотропность. HNO_3 — вскипает; поверхность окрашивается в желтовато-коричневый цвет; иногда выявляются своеобразные трещины спайности. HCl — отрицательна. KCN — окрашивается в коричневый цвет. $FeCl_3$ — окрашивается в оранжевый цвет. KOH и $HgCl_2$ — отрицательны. Обычно ассоцирует с халькопиритом, халькозином и другими минералами меди.

Халькопирит наблюдается в виде пластинчатых вростков в борните, расположенных наподобие решетки, образуется при

распаде твердого раствора; халькозин образует в борните сложные графические прорастания или петельчатые и пятнистые выделения. Борнит известен как первичный (гипогенный) и как вторичный (супергенный) минерал.

13. Бравоит $(Fe, Ni)S_2$. Редкий.

Кубическая. Изометричные кристаллы часто зонального строения, а также неправильные по форме массы, образующиеся при замещении пентландита. R 41%. Цвет бледнофиолетовый, изменчивый. Твердость выше средней (E). Изотропен. HNO_3 — пары дают потускнение, радужное окрашивание и выявляют зональную внутреннюю структуру. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

14. Браунит Mn_2O_3. Распространенный.

Тетрагональная. R 18%. Цвет серый. Слабые бурые рефлексы, заметные с масляной иммерсией. Твердость высокая (G). Слабо анизотропен. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ и царская водка — отрицательны. H_2O_2 — медленно вкипает, поверхность не окрашивается. При царапании дает темнокоричневый порошок. Часто ассоциируется с гаусманитом.

15. Брейтгауптит NiSb. Редкий.

Гексагональная, кристаллы призматические. R 50—40%; двуотражение высокое. Цвет нежнорозовый. Твердость средняя (E). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается неоднородно радужно. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — окрашивается неоднородно радужно. KOH и $HgCl_2$ — отрицательны.

16. Буланжерит $5PbS \cdot 2Sb_2S_3$. Распространенный.

Ромбическая; форма призматическая и игольчатая. R 37%; двуотражение слабое. Цвет белый, сравнительно с галенитом зеленоватый. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. В масле — слабые красные рефлексы. HNO_3 — вскипает, поверхность окрашивается в черный цвет, нередко действие вначале медленное. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$—отрицательны. От джемсонита отличается реакцией с KOH.

17. Бурнонит $Cu_2S \cdot 2PbS \cdot Sb_2S_3$. Редкий.

Ромбическая. R 33%. Цвет светлосерый, сравнительно с галенитом голубовато-зеленоватый. Твердость средняя (C —). Слабо анизотропен. HNO_3 — пары дают медленное потускнение; иногда слегка тускнеет и приобретает светлокоричневый цвет. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — вскипает и окрашивается в радужный цвет. Отличим от тетраэдрита при помощи поляризованного света.

18. Валентинит Sb_2S_3. Обычный.

Ромбическая. R 16—14%. Цвет серый. Твердость низкая. Анизотропен. Двуотражение слабое. Внутренние рефлексы желтые или бесцветные. Отношение к травлению не изучено. Продукт окисления антимонита. Обычны радиальнолучистые формы.

19. Валлериит $Cu_2S \cdot 2Fe_2S_3$. Редкий.

Гексагональная. Наблюдается в виде мелких и мельчайших зернышек изометрической или вытянутой формы. Встречается в медно-никелевых рудах в ассоциации с халькопиритом, кубанитом и пирротином. R 46—15%. Двуотражение очень высокое, что является весьма характерным. Цвет кремово-белый, резко меняющийся благодаря очень сильному двуотражению. O — светложелтый, E — серый или голубоватый. Твердость средняя (C +). Сильно анизотропен. Травится реактивами, выделяющими хлор; обычные средства травления не действуют.

20. Ванадинит $Pb_5Cl(VO_4)_3$. Очень редкий.

Гексагональная. R менее 10%. Форма зерен призматически удлиненная. Цвет серый. Твердость низкая (B). В косом свете светлобуровато-желтый. Порошок светлый. Полируется хорошо. В скрещенных николях наблюдаются внутренние рефлексы. Слабо анизотропен. HNO_3 — темнеет, желтый налет (в косом свете). HCl — то же, что с HNO_3, KCN, $FeCl_3$ и $HgCl_2$ не действуют. KOH — темнеет, образуется белый налет. H_2O_2 — вскипает, образуется желтый налет (в косом свете).

21. Вернадит $MnO_2 \cdot nH_2O$. Распространенный.

Коллоид. Образуется в результате окисления силикатов и карбонатов марганца. Химически редко бывает чистым: всегда присутствуют примеси псиломелана, кремнезема, гидроокислов железа. Наблюдается в виде плотных черных, блестящих в изломе образований или рыхлых порошковатых масс коричневого цвета. Черта коричневая или шоколадно-бурая. Под микроскопом цвет серый. Отражение низкое. Твердость низкая (2—3). Изотропен или слабо анизотропен. В кислотах, особенно в соляной, очень легко разлагается с выделением хлора. При травлении часто выступает колломорфное строение.

22. Виоларит $(Ni, Fe)_3S_4$. Редкий.

Кубическая. R 40%. Цвет фиолетовый, быстро изменяющийся на воздухе. Твердость средняя (C). Изотропен. HNO_3 — медленно вскипает, поверхность окрашивается в коричневый цвет. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH $HgCl_2$ — отрицательны. Наблюдается иногда спайность и треугольные ямки выкрашивания. Ассоциирует с пентландитом и другими никельсодержащими сульфидами, являясь продуктом их замещения.

23. Висмут Bi. Редкий.

Гексагональная. R 68%; двуотражение ясно различимое. Цвет сравнительно с галенитом кремово-белый. Твердость низкая (A). Сильно анизотропен. HNO_3 — вскипает и темнеет. HCl — неоднородно окрашивается в темный цвет; иногда выявляет пластинчатую структуру. KCN — отрицателен. $FeCl_3$ — мгновенно окрашивается в радужный цвет. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — окрашивается пятнами в коричневый цвет; реакция сомнительна. Темнеет на воздухе.

24. Висмутин Bi_2S_3. Редкий.

Ромбическая; форма призматическая. R 48—42%; двуотражение ясно различимо. Цвет белый со слабым кремовым оттенком. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. HNO_3 —медленно вскипает и окрашивается в черный цвет. HCl — пары дают потускнение. KCN, $FeCl_3$, KOH — отрицательны. $HgCl_2$ — окрашивается в светлокоричневый цвет; иногда не действует. Царская водка — слабо вскипает, буреет, выявляется структура. Наблюдаются двойники. Ассоциирует с халькопиритом и самородным висмутом.

25. Виттихенит $3Cu_2S \cdot Bi_2S_3$. Редкий.

Ромбическая. R 34%. Цвет кремово-серовато-белый. Твердость ниже средней (C —). Явление анизотропии заметно только с иммерсией. HNO_3 — иризирующее потускнение. От царской водки быстро становится светлокоричневым. $FeCl_3$ — окрашивается в светлокоричневый цвет. KOH—окрашивается в радужный цвет. HCl, KCN, $HgCl_2$ — отрицательны.

26. Вольфрамит $(Fe, Mn)WO_4$. Распространенный.

Моноклинная. Часто хорошо образованные кристаллы. R 16%. Цвет серый, подобный цвету сфалерита. Твердость выше средней (E); чертится иглой при сильном нажиме. Слабо анизотропен. Отрицателен ко всем реактивам. Имеет спайность в двух направлениях. Дает темнокоричневый порошок. Рефлексы красные или бурые, заметны с иммерсией. Железистые разности обладают слабой магнитностью.

27. Вуртцит ZnS. Редкий.

Гексагональная; часто имеет радиальнолучистое строение и образует колломорфные массы. R 17%. Цвет серый. Внутренние рефлексы бурые или желтые. Твердость средняя (D —). Слабо анизотропен. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Пары царской водки дают потускнение, поверхность окрашивается в коричневый цвет. Встречается чаще всего в виде оболочки на сфалерите и других сульфидах. В штуфах, как и в полированных шлифах,

сфалерит и вуртцит различимы с трудом. Единственный надежный способ их различать — наблюдение осколков этих минералов под микроскопом между скрещенными николями в проходящем свете: сфалерит изотропен, а вуртцит обладает заметным двупреломлением.

28. Галенит PbS. Весьма распространенный.

Кубическая. Обычно встречается в зернистых агрегатах или в виде ксеноморфных вкраплений. Совершенная кубическая спайность. Большинство образцов имеет параллельные треугольные ямки — выкрашивание по спайности. R 43%. Цвет галенитово-белый (эталон белого цвета). Твердость низкая (B). Изотропен. HNO_3 — окрашивается в черный цвет; иногда вскипает; нередко вытравливается эмульсионная структура распада — галенита и аргентита или других микроскопических включений. Следует отметить, что серебро в галените может быть не только в виде механических включений, но и в виде твердого раствора. HCl — дает потускнение в коричневый радужный цвет. KCN — отрицателен. $FeCl_3$ — дает радужное потускнение; эта реакция отрицательна, если галенит находится в контакте с борнитом. KOH и $HgCl_2$ — отрицательны. Иногда при травлении выявляется внутренняя зональная структура.

Галенит встречается почти исключительно в гидротермальных образованиях в парагенезисе со сфалеритом, блеклой рудой и с серебросодержащими минералами. В поверхностных условиях галенит часто замещается по спайности церусситом, который развивается в виде своеобразного «кружевного» узора.

29. Галмей (каламин) $Zn(OH)_2SiO_3$. Распространенный.

Встречается в зоне окисления цинковых месторождений. R менее 10%. Цвет в отраженном свете серый, несколько светлее нерудных минералов (кальцита, кварца и т. д). Твердость выше средней (E); стальной иглой чертится труднее, чем сфалерит. В косом свете имеет цвет водяно-прозрачный, желтый, серый, белый, зеленоватый. В скрещенных николях явление поляризации маскируется цветом внутренних рефлексов. От HNO_3 поверхность минерала становится ямчатой и шероховатой; выявляется структура отдельных призматических зерен. HCl — выявляет структуру в виде отдельных удлиненно-призматических зерен. $FeCl_3$ — выявляет спайность, форму зерен и структуру. KCN, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

30. Гарниерит (Ni, Mg)O . SiO_2 . H_2O. Распространенный.

Встречается вместе с другими никелевыми силикатами в виде почковидных образований, сталактитов и землистых масс. Аморфный. R менее 10%. Цвет серый. Твердость низкая (B); полируется хорошо. Изотропен. В косом свете зеленые внут-

ренние рефлексы. При действии HNO_3 слабо выявляется структура от растворения. KCN — также выявляет структуру. HCl, KOH, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны.

31. Гаусманит Mn_3O_4. Редкий.

Тетрагональная. R 20%; двуотражение слабое. Цвет серый со слабым голубым отливом. Твердость высокая. Хорошая спайность по пинакоиду. Порошок и внутренние рефлексы темнокрасные или бурые. Хорошо полируется. Сильно анизотропен; большинство образцов имеет многочисленные двойники, похожие на двойники плагиоклаза. HNO_3 — пары дают потускнение; на некоторые образцы не действует. HCl — местами неоднородное коричневое потускнение; на некоторые участки не действует. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. H_2O_2 — медленно вскипает, не травя поверхности.

32. Гематит Fe_2O_3. Весьма распространенный.

Гексагональная. Наблюдается в виде призматически удлиненных пластинок, которые в сечении полированного шлифа имеют форму, подобную шестикам или иглам. Замещая магнетит, дает псевдоморфные изометрические формы зерен (мартит). Землистая разность гематита имеет колломорфное сложение. Полируется хуже магнетита, всегда ямчатый. R 25%. Цвет серовато-белый. Сильно анизотропен. Твердость высокая (G), стальной иглой не чертится. Порошок красный, немагнитный. В косом свете в тонких пластинках иногда просвечивает рубиново-красным цветом, с масляной иммерсией внутренние рефлексы видны хорошо. HNO_3, HCl, KOH, $FeCl_3$ — не действуют. HCl (концентрированная) + электрический ток — травится с легким побурением, иногда выявляется структура. HF — выявляется структура. KCN — отрицателен.

33. Германит $Cu_3(Fe, Ge)S_4$. Очень редкий.

Кубическая. R 22%. Цвет розово-серый, подобный цвету розового энаргита. Твердость средняя (C —). Изотропен. Царская водка — медленно окрашивается в светлокоричневый цвет. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

34. Герсдорфит NiAsS. Редкий.

Кубическая. R 49%. Цвет белый. Твердость высокая (F—). Изотропен. HNO_3 — вскипает и окрашивается в радужный цвет; иногда выявляется структура; обычно окрашивается в серый, коричневый цвета; на некоторые образцы не действует. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

35. Гессит Ag_2Te. Редкий.

Кубическая. R 41%. Цвет серовато-белый. Твердость низкая (A). Некоторые образцы изотропны или имеют аномаль-

ную анизотропность. На одной и той же поверхности минерала могут быть участки изотропные и анизотропные. HNO_3 — окрашивается в радужные цвета, иногда чернеет. HCl — медленно окрашивается в черный цвет; отрицательна на небольших площадях. KCN — дает черные пятна, действует слабо. $FeCl_3$ — быстро окрашивается в радужный цвет. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — светлокоричневое потускнение. Характерны полисинтетические двойники. С вольтовой дугой — световое травление.

36. Гётит FeO . OH. Распространенный.

Ромбическая. R 20%; двуотражение ясно различимое. Цвет серовато-белый. Твердость выше средней (E). Порошок коричневый. Анизотропен. Часто имеет волокнистое радиальное строение. Красно-бурые или коричневые внутренние рефлексы. HNO_3 — отрицательна. HCl — сомнительна; после долгого травления пары дают легкое потускнение. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка действует так же, как HCl.

37. Гидрогётит $FeO . OH . nH_2O$. Распространенный.

Ромбическая. Встречается в сплошных массах и в радиальнолучистых агрегатах. R 17%. Цвет серый. Твердость средняя (4). Внутренние рефлексы желто-бурые, у плотных разностей почти отсутствуют. Цвет порошка желто-бурый. Двуотражение и явление анизотропии не наблюдаются. Различные типы ведут себя неодинаково по отношению к HCl и смеси HCl + + $SnCl_2$.

38. Глаукодот (Co, Fe)AsS. Редкий.

Ромбическая. Общий вид кристаллов — как и у арсенопирита, но кристаллы глаукодота более вытянуты по вертикальной оси. R 57%. Цвет белый со слабым розоватым оттенком. Твердость высокая (F). Полируется хорошо (лучше арсенопирита). Сильно анизотропен, но слабее, чем арсенопирит. HNO_3 — радужное потускнение (травится слабее, чем арсенопирит). HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

39. Гранат $R''_3\ R'''_2\ (SiO_4)_2$, где R″ = Ca, Mg, Fe, Mn; R‴ = Al, Fe, Cr, Ti. Распространенный.

Кубическая. Встречается в виде изометричных кристаллов или сплошных зернистых масс. Обычно сопровождающий минерал руд контактово-метасоматических месторождений. R 9%. Цвет серый, темнее сфалерита и магнетита, но светлее кварца и кальцита. Твердость высокая (6,5—7,5). Внутренние рефлексы красные, бурые, желтые, зеленые. Изотропен. Спайность отсутствует.

40. Графит C. Распространенный.

Тригональная. По формам зерен напоминает MoS_2 (удлиненные пластинки). Отличается от MoS_2 хорошей электропроводностью. R 22—5%. Очень высокое двуотражение. Цвет серый с розовым оттенком. Твердость низкая (A). Полируется плохо. Порошок черный. Сильно анизотропен. Все реактивы отрицательны.

41. Гринокит CdS. Очень редкий.

Гексагональная. Встречается в виде налетов и редко в кристаллах, ассоциируя со сфалеритом. R 17%. Цвет серый. Твердость средняя (C). Внутренние рефлексы сильные — желтые, иногда оранжево-красные. Явление анизотропии при скрещенных николях не наблюдается: вероятно, мешают внутренние рефлексы. HNO_3 — поверхность слабо тускнеет, обнаруживаются трещины. HCl — действие неясное. KOH, KCN, $FeCl_3$ — отрицательны.

42. Гюбнерит $MnWO_4$. Распространенный.

Моноклинная. R 14%. Цвет серый, подобный цвету сфалерита. Твердость выше средней (E). В косом свете или с иммерсией дает красные внутренние рефлексы. Порошок желтый. Сильно анизотропен. Не травится всеми обычными реактивами. В отраженном свете трудно отличим от вольфрамита и ферберита.

43. Джемсонит $4PbS . FeS . 3Sb_2S_3$. Редкий.

Моноклинная. Призматический. Совершенная спайность по пинакоиду. R 38—32%; двуотражение ясно различимое. Цвет галенитово-белый. Твердость низкая (B +). Сильно анизотропен. С масляной иммерсией иногда заметны красные внутренние рефлексы. HNO_3 — радужное потускнение при медленном вскипании. HCl — пары дают потускнение. KCN и $FeCl_3$ — отрицательны. KOH — радужное потускнение. $HgCl_2$ — отрицательна.

44. Дискразит Ag_3Sb. Очень редкий.

Кубическая. R 66%. Цвет кремовато-белый. Твердость средняя (C). Почти режется, но при царапании дает порошок. Изотропен; иногда слабо анизотропен. HNO_3 — быстро окрашивается в черный цвет; на некоторых образцах выявляется решетчатая структура. HCl — отрицательна. KCN — медленно окрашивается в коричневый цвет. $FeCl_3$ — быстро окрашивается в радужный цвет и выявляется структура. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — быстро окрашивается в коричневый цвет.

45. Железо Fe. Очень редкое.

R 64%. Цвет белый с красноватым оттенком. Твердость средняя (4—5). Полируется хорошо. Изотропно. Магнитно. HNO_3 — медленно вскипает, темнеет. HCl — медленно вскипает, от паров тускнеет. $FeCl_3$ — темнеет, иризирует. $HgCl_2$ — чернеет. KOH — отрицательна. Как природный минерал очень редко.

46. Зигенит $(CO, Ni)_3S_4$. Редкий.

Кубическая. R 46%. Цвет розовато-белый. Твердость выше средней (E). Изотропен. HNO_3 — не изменяется или медленно становится коричневым. $HgCl_2$ — не изменяется или слабо тускнеет. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH — не действуют. Встречается в медно-пирротиновых рудах.

Микроскопически не отличим от линнеита.

47. Золото Au. Редкое.

Кубическая. Обычно формы золотинок изометричны; иногда в виде жилок, дендритов и каемок. R 84%, несколько меняется от примеси Ag. Цвет желтый. Сильный блеск вследствие очень высокого показателя отражения. Халькопирит в присутствии золота кажется тусклозеленовато-желтым. Мягкое, твердость низкая (B). Ковкое. Полируется трудно. Очень мелкие золотинки, включенные в твердые минералы, могут быть замечены под микроскопом только в безрельефных полированных шлифах. Изотропно. HNO_3 и HCl — отрицательны. KCN — медленно чернеет, шероховатая поверхность от растворения, иногда выявляется структура. $FeCl_3$, $HgCl_2$, KOH — отрицательны. KCN + CaF_2 — гравировка. С Hg — образуется белая амальгама и выявляется структура. Царская водка — выявляется структура. В отличие от халькопирита в течение 1 мин. не изменяется от травления насыщенным раствором $AgNO_3$ (халькопирит — чернеет).

48. Ильменит $FeTiO_3$. Весьма распространенный.

Гексагональная. Форма зерен эвгедральная. Иногда дает решетки призматических зерен в магнетите; содержит включения пластинок гематита. Нередки удлиненные призматические зерна. R 17%; двуотражение слабое. Цвет буровато-серый; в масле по сравнению с магнетитом имеет красновато-коричневый оттенок. С масляной иммерсией можно иногда заметить темнобурые внутренние рефлексы. Твердость высокая (G), иглой не чертится. Полируется средне, как магнетит. Порошок черный, немагнитный. Электропроводность слабая. Сильно анизотропен. Все реактивы не действуют. HCl + электрический ток — травится с образованием осадка. HF — выявляется структура. Ильменит — главный составляющий минерал титано-магнетитовых руд. Он может встречаться здесь или в виде индивидуализированных зерен до 1 мм в поперечнике, или в виде тончайшей решетки с магнетитом.

49. Иорданит $4PbS \cdot As_2S_3$. Очень редкий.

Моноклинная. Встречается в сплошных агрегатах и кристаллах. R 38%; двуотражение очень слабое. Цвет галенитово-белый. Твердость ниже средней (3). Хрупкий. Полируется хорошо. Явление анизотропии заметно при сильном освещении. Царская водка — вскипает, чернеет. HNO_3 — тускнеет. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

50. Калаверит (Au, Ag) Te_2. Редкий.

Моноклинная. Форма призматическая. R 56%; двуотражение слабое. Цвет сравнительно с галенитом светложелтый. Твердость низкая (2,5). Слабо анизотропен. HNO_3 — вскипает, поверхность окрашивается в черный цвет. HCl, KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — на большинстве образцов отрицательно, некоторые медленно окрашиваются в светлокоричневый цвет. KOH и $HgCl_2$ — отрицательны.

51. Кальцит $CaCO_3$. Весьма распространенный.

Тригональная. Цвет темносерый. R 6—4%; двуотражение сильное. Твердость средняя (C). Полируется хорошо. Часто видны двойниковые полоски. Сильно анизотропен, но наблюдению явления анизотропии при скрещенных николях мешают внутренние рефлексы. Легко травится всеми кислотами.

52. Касситерит SnO_2. Распространенный.

Тетрагональная. Форма эвгедрально-изометрическая. R 11%. Цвет серый. Твердость высокая (G), не чертится иглой. Плохо полируется. В косом свете буро-янтарный. Порошок бесцветный. Полируется плохо, всегда ямчатый. В поляризованном свете иногда видны двойники, иногда меняется от серо-зеленого до серо-розового цвета, часто явления поляризации затемняют внутренние рефлексы. Все реактивы не действуют. HCl + электрический ток — слабое побурение. Сплошное травление: минерал погружается полностью в чашку с HCl 1 : 5 и кусочком цинка; после 5—20 минут на касситерите появляется вследствие восстановления водородом тонкий налет металлического олова, который удаляется HNO_3, после чего наблюдается внутренняя структура касситерита.

53. Кварц SiO_2. Весьма распространенный.

Тригональная. R 4,5%. Цвет темносерый. Твердость высокая (G), но полируется хорошо. Светлые, иризирующие внутренние рефлексы. Явление анизотропии незаметно. Все обычные реактивы не действуют.

54. Кераргирит AgCl. Редкий.

Кубическая. R 12%. Цвет серый. В косом свете имеет восковой желтый оттенок. Твердость низкая (A). Очень хорошо режется; это — самое характерное свойство кераргирита. Изотропен. HNO_3 и HCl — отрицательны. KCN — мгновенно окрашивается в серо-коричневые цвета. $FeCl_3$ — отрицательно. KOH — окрашивается в коричневый цвет. $HgCl_2$ — отрицательна.

55. Кермезит $2Sb_2S_3 . Sb_2O_3$. Очень редкий.

Ромбическая или моноклинная. Встречается в виде радиальнолучистых агрегатов и в сплошных массах. Представляет собой промежуточный продукт окисления стибнита. R 25%; заметно двуотражение. Цвет белый с голубоватым оттенком. Твердость низкая (B). Внутренние рефлексы красные. Порошок красновато-коричневый. Сильно анизотропен. Царская водка — вскипает, темнеет. KOH — отлагает желтый налет (очень характерно). HNO_3 — буреет (?). HCl, KCN, $FeCl_3$ $HgCl_2$ — отрицательны.

56. Киноварь HgS. Распространенная.

Гексагональная. Форма зерен неправильная, иногда с кристаллическими очертаниями. Кроме кристаллов, встречается в порошковатых и землистых массах. R 27%; двуотражение ясно различимое. Цвет сравнительно с галенитом голубовато-белый. Твердость низкая (B). Полируется хорошо. В косом свете карминово-красная. Порошок красный. Сильно анизотропна, но внутренние рефлексы мешают определять анизотропность. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, $HgCl_2$, KOH — отрицательны. Царская водка — иризирует, иногда вскипает, налет стирается начисто. Часто ассоциирует с сурьмяным блеском.

57. Клаусталлит PbSe. Редкий.

Кубическая. R 49%. Цвет белый. Твердость низкая (B). Изотропен. HNO_3 — тускнеет, на поверхности образуется красный осадок (смотреть в косом свете). HCl — буреет, иризирует, иногда не изменяется. $FeCl_3$ — тускнеет, иризирует. KCN, KOH, $HgCl_2$ — не действуют. Сходен с галенитом. Отличается повышенным R и пониженным рельефом.

58. Клокманнит CuSe. Очень редкий.

Гексагональная. R 30—18%; двуотражение сильное. Цвет зеленовато-серый. Твердость ниже средней (2—3). Сильная анизотропность, подобная ковеллину. HNO_3 — от паров темнеет. HCl — кислота желтеет, минерал не травится. KCN — быстро чернеет. KOH — медленно окрашивается в коричневый цвет. $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны. Очень сходен с ковеллином, от которого отличается зеленоватым оттенком.

59. Кобальтин CoAsS. Распространенный.

Кубическая. Обычно кристаллизуется в кубах и пентагональных додекаэдрах. R 51%. Цвет розовато-белый. Твердость высокая (G). Некоторые образцы изотропны, другие аномально слабо анизотропны. HNO_3 — в некоторых случаях после долгого травления окрашивается неоднородно радужно, пары ее дают потускнение; иногда отрицательна. HCl, KCN, $FeCl_3$, $HgCl_2$, KOH — отрицательны.

60. Ковеллин CuS. Весьма распространенный.

Гексагональная. Форма ангедральная: жилки, каемки; в халькозине образует иногда удлиненно-призматические зерна. R 26—18%. Двуотражение очень высокое: минерал меняется в цвете от бледноголубого до васильково-синего. Цвет синий. Твердость низкая (B). Полируется хорошо. Сильно анизотропен; в скрещенных николях изменяется в цвете от синего до красного (вследствие мелкозернистости агрегатов явления в поляризованном свете следует наблюдать при сильном увеличении и при сомкнутой до минимума диафрагме). HNO_3 и HCl — отрицательны. KCN — становится красновато-темным, выявляется структура. $FeCl_3$, $HgCl_2$, KOH — отрицательны. $AgNO_3$ — образуется налет металлического Ag. Царская водка — слабо вскипает и слегка краснеет.

61. Колумбит-танталит (Fe, Mn) (Nb, Ta)$_2O_6$. Очень редкий.

Ромбическая. R 18%. Цвет серо-белый. Твердость высокая (G). Эвгедральный. Полируется средне. Иногда красный в косом свете. Слабо анизотропен. Все реактивы не действуют.

62. Креннерит (Au, Ag)Te_2. Очень редкий.

Ромбическая. R 56%. Цвет желтый. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. Двуотражение слабое. HNO_3 — вскипает. $FeCl_3$ и KOH — положительны. HCl, KCN, $FeCl_3$ — отрицательны.

Очень сходен с калаверитом; последний желтее, и эффект анизотропии слабее.

63. Кубанит (чальмерзит) $CuFe_2S_3$. Редкий.

Ромбическая. R 40%; двуотражение слабое. Цвет бледно-кремовый. Твердость средняя (C). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается в светлокоричневый цвет или отрицательна. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Неизменно прорастает халькопиритом и обычно ассоциирует с пирротином. Цвет почти одинаковый с пирротином, несколько желтее. Слабо магнитен, но менее, чем пирротин. Рядом с халькопиритом кубанит рельефа не имеет; пирротин тверже, чем халькопирит, и рельефно выступает.

64. Куприт Cu_2O. Распространенный.

Кубическая. Форма зерен неправильная, жилки, каемки замещения. R 29%. Цвет сравнительно с галенитом голубовато-серо-белый. Твердость средняя (D —). В косом свете красный. Порошок красный. Полируется хорошо. Изотропен, часто аномально слабо анизотропен. HNO_3 — вскипает, появляется осадок металлической меди, от паров тускнеет. HCl — становится бурым, темным, белый налет (в косом свете). KCN — темнеет, выявляется структура. $FeCl_3$ — тускнеет, иризирует. $HgCl_2$ и KOH — отрицательны.

65. Леллингит $FeAs_2$. Редкий.

Ромбическая. R 56%. Цвет белый (сравнительно с арсенопиритом леллингит более серый). Твердость высокая (F —). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается в коричневый радужный цвет; пары дают потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH и $HgCl_2$ — отрицательны.

66. Лепидокрокит $FeO \cdot OH$. Распространенный.

Ромбическая. Диморфная форма гётита. Чешуйчатый. Спайность по (010) совершенная. R 20%; двуотражение слабое. Цвет серовато-белый, но несколько темнее, чем у гётита. Внутренние рефлексы сильные — красные или оранжево-красные. Порошок оранжево-красный. Твердость выше средней (5). Явление анизотропии заметно слабо вследствие полупрозрачности минерала. Обычные средства травления не действуют.

67. Лимонит (гидрогётит) $FeO \cdot OH \cdot n\,H_2O$.
Весьма распространенный.

R 17%. Цвет серый со слабым голубым оттенком в присутствии гематита и магнетита. Твердость высокая (F), не чертится иглой. Охристые разности мягкие. Порошок желто-бурый. В косом свете бурый. Анизотропен. Натечный, аморфный. Всегда вторичный. Встречается в виде жилок, каемок, псевдоморфоз или колломорфных скоплений. Все обычные реактивы не действуют.

68. Линнеит Co_3S_4. Редкий.

Кубическая. R 46%. Цвет розово-белый. Твердость выше средней (E +), но стальной иглой чертится. Изотропен. HNO_3 — пары дают слабое потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH — отрицательны. $HgCl_2$ — неоднородно окрашивается в коричневый цвет; некоторые участки почти не изменяются.

69. Люцонит $3Cu_2S \cdot As_2S_5$. Редкий.

Моноклинная. R 25%; слабое двуотражение. Цвет оранжево-красный. Твердость средняя (C). Сильная анизотропность, хорошо заметная благодаря двойниковому строению. HNO_3 —

очень медленно дает стирающийся налет. KCN — медленно дает налет. HCl, $FeCl_3$, $HgCl_2$, KOH — отрицательны. От весьма сходного энаргита отличается сингонией, двойниковым строением и более слабым травлением KCN.

70. Маггемит Fe_2O_3. Редкий.

Кубическая. R около 23%. Встречается совместно с магнетитом и образуется в результате его изменения. Под микроскопом светлее магнетита. Цвет серый с голубоватым оттенком. Твердость высокая (5). Внутренние рефлексы буро-красного цвета наблюдаются редко. Порошок и черта бурые. Изотропен. Обычные средства травления не действуют. Магнитен. От весьма сходного магнетита отличается по бурой черте (порошку) и по голубоватому оттенку (хорошо заметному с масляной иммерсией). Сравнительно с гематитом серее, менее твердый и обладает магнитностью.

71. Магнетит Fe_3O_4. Весьма распространенный.

Кубическая. Форма зерен обычно эвгедральная, иногда пластинчатая (мушкетовит), образующаяся в результате замещения магнетитом гематита с сохранением его формы. R 20%. Цвет серый; с масляной иммерсией — слабый красноватый оттенок. Изотропен. Твердость высокая (F). Сильно магнитен. HNO_3 — отрицательна. HCl — капли на гладкой поверхности растекаются, пары дают потускнение; раствор желтеет; нередко вытравливается зональная структура. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Раствор царской водки желтеет. При царапании образуется черный порошок. Порошок магнитен. Игла, проведенная по гладкой поверхности, часто оставляет отчетливый след, но это не истинная царапина, так как края царапины не изломаны.

72. Малахит $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$. Весьма распространенный.

Моноклинная. Спайность совершенная по (001). Форма часто колломорфная (натечная) в виде радиальных стяжений и неправильных аморфных скоплений. R 9—6%; двуотражение сильное. Цвет серый с розоватым оттенком. В косом свете зеленый. Твердость средняя (C). Порошок светлозеленый. Полируется хорошо. Явлению поляризации в скрещенных николях мешают внутренние рефлексы. HNO_3 — интенсивное вскипание; поверхность сильно разъедается от растворения и выявляется структура. HCl дает тот же эффект, что и HNO_3. KCN — слабо выявляется структура. $FeCl_3$ — медленное вскипание, минерал приобретает в косом свете желтый налет. KOH — через 15—20 мин. образуется голубой осадок. В парах NH_4OH после 10—15 мин. минерал синеет. $HgCl_2$ — отрицательна.

73. Манганит $Mn_2O_3 . H_2O$. Редкий.

Ромбическая. Форма призматическая. R 18—16%; двуотражение ясно различимое. Цвет серый. Твердость выше средней (E +). Дает коричневый порошок. Внутренние рефлексы кроваво-красные. Сильно анизотропен. HNO_3 — отрицательна. HCl — пары дают потускнение. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. H_2O_2 — медленно вскипает, не окрашивая поверхности.

74. Марказит FeS_2. Распространенный.

Ромбическая. Форма призматическая радиальнолучистая или колломорфная. R 55%; двуотражение ясно различимое. Цвет бледножелтый. Твердость высокая (F —). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается в коричневый, радужный цвет с медленным вскипанием; вскипания иногда не наблюдается. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Марказит цветом слегка бледнее, чем пирит. Единственным верным способом для отличия марказита от пирита является наблюдение в поляризованном свете.

75. Маухерит Ni_3As_2. Очень редкий.

Тетрагональная. Встречается в виде жилок, петель и решеток в других никельсодержащих минералах. R 60%. Цвет светлорозово-желтый (сходный с кобальтином). Твердость средняя (Д). Изотропен или очень слабо анизотропен. HNO_3 — мгновенно вскипает и окрашивается в черный цвет. $FeCl_3$ — дает быстро радужное потускнение. $HgCl_2$ — слегка буреет. HCl, KCN, KOH — отрицательны.

76. Медь самородная Cu. Распространенная.

Кубическая. R 90%. Цвет медно-красный, быстро тускнеющий на воздухе. Твердость низкая (B +); хорошо режется. Изотропна. Сильный блеск вследствие очень высокого отражения. HNO_3 — вскипает; некоторые разновидности, тускнея, окрашиваются в коричневый цвет; другие вскипают без потускнения. HCl — отрицательна; некоторые разновидности, медленно тускнея, приобретают коричневый цвет. KCN — медленное побурение. $FeCl_3$ — быстрое потемнение. KOH — быстрое потускнение и окрашивание в коричневые радужные цвета. $HgCl_2$ — быстрое почернение.

77. Мельниковит FeS_2. Редкий.

Мельниковитом называются черные, землистые (рыхлые и плотные) разновидности двусернистого железа; скрытокристаллические разности имеют структуру марказита и пирита. Мельниковит встречается как в осадочных породах в виде плотных масс и почковидных, сферических и ветвистых форм,

так и в колчеданных рудах в виде сажистых скоплений и округлых почек. Под микроскопом имеет низкий показатель отражения, коричневый цвет и обладает способностью давать металлический блеск после «полировки» (приглаживания) иглой. Твердость низкая (2—3). Магнитен (?). Изотропен. Легко травится HNO_3, HCl, KCN.

78. Менегинит $4PbS . Sb_2S_3$. Очень редкий.

Ромбическая. Встречается в виде игольчатых кристаллов и в виде волокнистых, лучистых или плотных агрегатов. R 40%; двуотражение заметно на границах зерен. Цвет белый, рядом с галенитом — чуть голубоватый. Твердость низкая и до средней (2—3). Явление анизотропии в поперечных и косых разрезах выражено сильно, в продольных слабее. С масляной иммерсией заметны красные внутренние рефлексы. HNO_3 — вскипает, чернеет. HCl дает потускнение. KOH — слегка окрашивается в синеватый или красноватый цвет, иногда реакция сомнительна. KCN, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны.

79. Метациннабарит HgS. Очень редкий.

Кубическая. R 24%. Цвет серо-белый. Твердость низкая (B). Внутренних рефлексов не имеет; черта черная. Изотропен. Царская водка — вскипает и чернеет. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны. Почти неизменно прорастается киноварью. В отличие от нее не имеет красных рефлексов и часто содержит многочисленные двойники.

80. Миллерит NiS. Редкий.

Гексагональная. Обычно волокнистый. Характерна игольчатая форма кристаллов. R 56%; двуотражение ясно различимое. Цвет латунно-желтый, промежуточный между пиритом и халькопиритом. Твердость средняя (E). Сильно анизотропен. HNO_3 — медленно окрашивается в коричневый цвет; пары дают потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH — отрицательны. $HgCl_2$ — медленно окрашивается в коричневый цвет.

81. Молибденит. MoS_2. Распространенный.

Гексагональная. Совершенная спайность по пинакоиду; R 35—15%. Цвет галенитово-белый до серовато-белого. Твердость низкая (B +). При одном николе наблюдается резко выраженное двуотражение; при скрещенных николях — сильная анизотропность. Сечения по пинакоиду изотропны. Призматические сечения минерала имеют почти параллельное погасание. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH и $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — медленно вскипает, некоторые участки не изменяются. Характерны двойники, иногда деформированные.

82. Мышьяк (самородный) As. Редкий.

Гексагональная. Хорошая спайность по пинакоиду. Цвет белый. R 58%; двуотражение низкое. Сильно анизотропен. Твердость низкая до средней. HNO_3 — медленно вскипает; поверхность окрашивается в радужный цвет. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — быстро окрашивается в радужный черный цвет. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — медленно окрашивается в светлокоричневый цвет; некоторые участки почти отрицательны. На воздухе быстро тускнеет от окисления.

83. Никелин NiAs. Редкий.

Гексагональная. R 56—53%; двуотражение ясно различимое. Цвет медно-розовый. Твердость средняя (E). Сильно анизотропен. HNO_3 — неоднородное потускнение со вскипанием. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — медленно неоднородно окрашивается в коричневый радужный цвет. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — окрашивается в коричневый радужный цвет. $KMnO_4 + H_2SO_4$ — выявляется структура.

84. Оливин (Mg, Fe)$_2$ SiO$_4$. Распространенный.

R 8%. Цвет темносерый. Твердость высокая (G). Полируется хорошо. Явление анизотропии при срещенных николях незаметно. Бесцветные или бледнозеленые внутренние рефлексы. Травление не изучено. Действует концентрированная HCl.

85. Осмистый иридий. Os, Ir. Редкий.

Тригональная. R 68%. Цвет белый, сравнительно с платиной чуть желтоватый. Твердость высокая (G). В скрещенных николях слабо анизотропен. Все обычные реактивы не действуют.

86. Пентландит (Ni, Fe) S. Распространенный.

Кубическая. R 53%. Цвет бледнокремовый, заметно светлее и желтее пирротина. Твердость средняя (D —). Изотропен. HNO_3 — пары дают потускнение; минерал медленно окрашивается в коричневый цвет. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Несовершенная кубическая спайность. Немагнитен. Почти неизменно ассоциирует с пирротином и халькопиритом.

87. Петцит (Ag, Au)$_2$Te. Очень редкий.

Кубическая (?). Наблюдается в плотных или зернистых агрегатах. R 39%. Цвет серо-белый. Твердость низкая (A). Изотропен или слабо анизотропен. HNO_3 — вскипает, темнеет. $FeCl_3$ — иризирует. $HgCl_2$ — медленно окрашивается в коричневый цвет. KCN, HCl, KOH — отрицательны. С вольтовой дугой — световое травление. Обычно прорастается гесситом.

Петцит более его, имеет более гладкую поверхность; содержит треугольнички выкрашивания по спайности.

88. Пираргирит 3Ag$_2$S . Sb$_2$S$_3$. Редкий.

Гексагональная. R 32%; двуотражение слабое. Цвет сравнительно с галенитом светлосиневато-серый. Твердость низкая. Порошок и внутренние рефлексы рубиново-красные. Сильно анизотропен. HNO_3 — пары на некоторых участках дают легкое потускнение; на других — отрицательны. HCl — отрицательна. KCN — окрашивается неоднородно в серый, коричневый цвета. $FeCl_3$ — отрицательно; на некоторых участках, повидимому, дает легкие потускнения. KOH—мгновенно дает радужное потускнение. $HgCl_2$ — окрашивается в коричневый цвет. С вольтовой дугой — световое травление.

89. Пирит FeS$_2$. Весьма распространенный.

Кубическая. Форма сечений зерен в полированных шлифах квадратная, прямоугольная, многоугольная, неправильная и округлая. Встречаются сложные, петельчато-зональные колломорфные образования, как редкий случай призматические или волокнисто-шестоватые разности. R 53%. Цвет бледно-желтый. Твердость высокая (F). Иногда трудно полируется; вокруг зерен обычны теневые каймы. Большинство образцов пирита изотропно; изредка аномально слабо анизотропен. HNO_3 — пары дают потускнение; некоторые образцы медленно вскипают; при мелкозернистом строении или плохой полировке поверхности реакция может быть отрицательной. HCl, $FeCl_3$, KOH KCN, $HgCl_2$ — отрицательны. Пары царской водки—дают потускнение; некоторые образцы медленно вскипают. При электролитическом травлении NH_4OH или при травлении $HNO_3 + CaF_2$ часто выявляется внутренняя зональная структура. Пирит является самым распространенным минералом в сульфидных рудах. Правильные кристаллографические формы зерен и постоянно наблюдаемое замещение его другими сульфидами (халькопиритом, сфалеритом, галенитом) позволяют считать пирит одним из ранних минералов сульфидных руд. Иногда наблюдается в рудах несколько генераций пирита, и тогда возрастные взаимоотношения минералов устанавливаются с трудом. Часто пирит содержит мельчайшие «пойкилитообразные» включения халькопирита, сфалерита, блеклой руды, а изредка и золота. Иногда пирит является кобальтсодержащим. Нередко бывает трещиноватым и раздробленным.

90. Пироксен n Ca(Mg, Fe)Si$_2$O$_6$. m(Al, Fe)$_2$O$_3$.
Распространенный.

R менее 10%. Цвет темносерый. Твердость высокая (G). Явление анизотропии не наблюдается. Сильные внутренние

рефлексы, заметные в воздухе. Обычные средства травления не действуют.

91. Пиролюзит MnO_2. Распространенный.

Ромбическая. Призматический; совершенная спайность по призме; обычно аморфный. Часто колломорфный. Некоторые образцы пачкают пальцы. R 33%; анизотропность и двуотражение ясно выражены у кристаллических разностей. Цвет серовато-белый с характерным желтым (телесным) оттенком. Твердость низкая или средняя (B — D); дает черный порошок. HNO_3 — отрицательна. HCl — капля становится коричневой, но поверхность не окрашивается. KCN, $FeCl_3$, KOH и $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — то же, что и HCl. H_2O_2 — капля сильно вскипает, но поверхность не окрашивается. $H_2O_2 + H_2SO_4$ — поверхность неоднородно окрашивается в черный цвет.

92. Пироморфит $Pb_5Cl(PO_4)_3$. Редкий.

Гексагональная. Спайность очень неясная. Форма выделений в виде удлиненных призм или неправильных скоплений и жилок. R менее 10%. Твердость средняя (C). Цвет в отраженном свете серый, несколько светлее кальцита. В косом свете зеленый, желтоватый, водяно-прозрачный, до бурого. Порошок белый. Цвет внутренних рефлексов затемняет явление поляризации в скрещенных николях. HNO_3 — становится ямчатым от растворения. HCl — дает тот же эффект. KOH — выявляется структура травления. $FeCl_3$, $HgCl_2$, KCN — отрицательны.

93. Пирротин $Fe_n\ S_{n+1}$. Распространенный.

Гексагональная. R 38%; двуотражение ясно различимое. Цвет кремовый. Твердость средняя (D —). Сильно анизотропен. HNO_3 — медленно окрашивается в светлокоричневый цвет; пары дают потускнение. HCl — раствор иногда желтеет, но минерал не изменяется. KCN и $FeCl_3$ — отрицательны. KOH — дает потускнение радужных цветов. $HgCl_2$ — отрицательна. Отчетливо магнитен. Пирротин является неустойчивым сульфидом: он разлагается и переходит или во вторичный пирит, отличающийся пористым строением, или, чаще, в марказит.

94. Платина Pt. Редкая.

Кубическая. R 70%. Цвет белый. Твердость средняя (D). Полируется хорошо. Форма зерен изометрическая или неправильная. Иногда магнитна. Изотропна. Сильный блеск вследствие очень высокого показателя отражения. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH — отрицательны. Царская водка — медленно выявляется структура. CrO_3 + HCl концентрированная выявляется структура. Платина, содержащая Fe и Pd, травится легче, чем с примесью иридия. Медистая платина травится разбавленной царской водкой.

95. Полевой шпат. Весьма распространенный.

Моноклинная и триклинная. R менее 10%. Темносерый цвет. Высокая твердость. Явление анизотропии не наблюдается. Двойники, типичные для плагиоклазов, в отраженном свете незаметны. Травление мало изучено. Основные плагиоклазы травятся HF и HCl.

96. Полибазит $8Ag_2S \cdot Sb_2S_3$. Редкий.

Моноклинная. R 29%. Цвет серовато-белый, сравнительно с галенитом чуть зеленоватый. Твердость ниже средней (C —). Слабо анизотропен. Порошок темный рубиново-красный; если частицы его крупные, то кажется черным. Внутренние рефлексы красные; не всегда видимы. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl — отрицательна. KCN — быстро чернеет. $FeCl_3$ — дает радужное потускнение. KOH — дает медленное радужное потускнение; на некоторых образцах отрицательна. $HgCl_2$ — быстро чернеет. С вольтовой дугой — световое травление.

97. Полидимит Ni_3S_4. Редкий.

Кубическая. Встречается в сплошных зернистых массах и кристаллах. Характерны двойники. R 45%. Цвет латунно-желтый (белый с кремовым или красноватым оттенком). Твердость высокая (F). Изотропный. HNO_3 — медленное вскипание и окрашивание в радужный цвет. HCl — капля зеленеет. KOH, $FeCl_3$, $HgCl_2$, KCN — отрицательны.

98. Прустит $3Ag_2S \cdot As_2S_3$. Редкий.

Гексагональная. R 27%; двуотражение ясно различимое. Цвет голубовато-белый (сравнительно с галенитом). Твердость низкая (B). Цвет порошка и внутренние рефлексы рубиново-красные. Сильно анизотропен. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl — отрицательна. KCN — быстро окрашивается в черный цвет. $FeCl_3$ — тускнеет. KOH — окрашивается в черный цвет. $HgCl_2$ — окрашивается в черный цвет. Не отличим от пираргирита по цвету и по испытанию травлением. Необходимо микрохимическое испытание на мышьяк. С вольтовой дугой — световое травление.

99. Псиломелан-вад $nMn_2O_3 \cdot MnO_2 \cdot mH_2O$. Распространенный.

Минерал переменного состава и различного строения — от кристаллического псиломелана до сажистого вада. Часто колломорфная текстура. Показатель отражения псиломелана R 30%; 20%, а вада 10%. Цвет серовато-белый до серого. Твердость от высокой до низкой. Псиломелан изотропен или анизотропен, а вад изотропен. Бурые внутренние рефлексы с трудом наблюдаются с масляной иммерсией. Массивные гроздеобразные или почковидные структуры. Полированные по-

верхности обычно имеют концентрическую покосчатость. HNO_3 — иногда окрашивается в светлокоричневый цвет; пары дают потускнение. HCl — окрашивается в коричневый — черный цвета; действие интенсивнее, чем от HNO_3. KCN — отрицателен. $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$—отрицательны. H_2O_2—сильно вскипает без травления.

100. Реальгар AsS. Редкий.

Моноклинная. R 20%. Цвет серовато-белый. Твердость низкая (B). Ясно анизотропен; минерал прозрачен, и большая часть падающего на него света поглощается. В косом свете красноораижевые рефлексы. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$ — отрицательны. KOH — мгновенно окрашивается в черный цвет. $HgCl_2$ — отрицательна. Царская водка — вскипает, буреет.

101. Родохрозит $MnCO_3$. Распространенный.

R менее 10%. Цвет серый. Твердость средняя (C). Порошок белый. В косом свете розовые или бурые рефлексы. Ясно анизотропен. Травится кислотами. Кроме родохрозита, довольно обычны в месторождениях марганца манганокальцит (Ca, Mn) CO_3 и олигонит (Mn, Fe) CO_3. Свойства их под микроскопом в отраженном свете близки с родохрозитом.

102. Рутил TiO_2. Распространенный.

Тетрагональная. Форма зерен эвгедральная, призматическая. Часты коленчатые двойники. Порошок бесцветный. R 20%. Цвет серо-белый, светлее касситерита и сфалерита. Твердость высокая (G). Полируется хорошо. В косом свете оранжевый или красный. В поляризованном свете желтые, бурые или красноватые внутренние рефлексы, затемняющие явление анизотропии. Травление — все реактивы не действуют.

103. Саффлорит—раммельсбергит $CoAs_2$ — $NiAs_2$. Редкий.

Ромбическая. R 57%; двуотражение низкое. Цвет белый. Твердость выше средней (E). Явление анизотропии при скрещенных николях выражено очень хорошо. HNO_3 — вскипает, окрашивается в темный цвет и выявляется структура. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — окрашивается в коричневый цвет. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — отрицательна, иногда медленно окрашивается в коричневый цвет. Концентрированная HNO_3 в течение 3—15 сек. выявляет двойники или зональное строение.

104. Сера S. Обычна.

Ромбическая. R 15—10%. Цвет серый. Твердость низкая. Заметный анизотропизм. Двуотражение сильное. Внутренние рефлексы желтые или бесцветные. Встречается в зоне окисления сульфидных месторождений, в сыпучках колчеданных руд и в осадочных месторождениях.

105. Серебро Ag. Редкое.

Кубическая. R 95%. Цвет сравнительно с галенитом кремово-белый. Сильный блеск, так как показатель отражения очень высокий. Твердость низкая (B); хорошо режется. Изотропно. HNO_3 — вскипает и окрашивается в серый цвет. HCl в парах тускнеет; ореол не смывается. KCN — некоторые образцы тускнеют в серый-коричневый цвета, другие отрицательны. $FeCl_3$ — мгновенно окрашивается в радужные цвета. На воздухе быстро тускнеет.

106. Сидерит $FeCO_3$. Распространенный.

Тригональная. R 9—6%; двуотражение сильное. Цвет в отраженном свете серый, несколько светлее кварца и кальцита, но темнее сфалерита и лимонита. В косом свете прозрачно-белый, желтый или красноватый от окислов Fe. Порошок белый. Полируется хорошо. Твердость средняя (C). В скрещенных николях изменяется от светлосерых до темносерых тонов с выявлением зернистости. При действии HNO_3 от растворения получается шероховатая поверхность и выявляются отдельные различно протравленные зерна, обнаруживается спайность. HCl — дает в общем тот же эффект, что и HNO_3, но вызывает иногда, перед высыханием капли, вскипание. $FeCl_3$, KOH — слабо выступает структура. $HgCl_2$, KCN — отрицательны, иногда лишь слабо выступает структура [1].

107. Сильванит (Ag, Au)Te_2. Очень редкий.

Моноклинная. Встречается в виде одиночных кристаллов и дендритов. Характерны двойники. R 47%; двуотражение сильное. Цвет кремово-белый. Твердость низкая (1,5—2). Сильно анизотропен; при скрещенных николях цвета меняются от коричневого до розово-белого. HNO_3 — медленно вскипает, поверхность окрашивается в радужный цвет. Царская водка — вскипает. KCN, HCl, KOH, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны.

108. Скородит $FeAsO_4 . 2H_2O$. Редкий.

Ромбическая. Встречается в зоне окисления в виде корочек или мелких кристаллов. Часто колломорфный. R 8—7%; дву-

[1] Чистый сидерит в природе встречается редко; обычно в нем содержатся изоморфные примеси. Различают:

Брейнерит (Mg, Fe) CO_3	до 30% $FeCO_3$
Мезитит (Mg, Fe) CO_3	30—50% $FeCO_3$
Пистомезит (Fe, Mg) CO_3 . . .	50—70% $FeCO_3$
Сидероплезит (Fe, Mg) CO_3 . . .	70—95% $FeCO_3$

Минераграфическим путем эти разновидности определены быть не могут.

отражение слабое. Цвет серый, светлее нерудных минералов. Твердость средняя (3,5—4). В косом свете светлозеленый или буровато-желтый; внутренние рефлексы, затемняющие явление анизотропии. HNO_3 — становится слегка ямчатым от слабого растворения. HCl — ямчатость от растворения и структура. KOH — налет окиси железа вследствие разложения. $FeCl_3$, KCN, $HgCl_2$ — отрицательны.

109. Скуттерудит $CoAs_3$. Редкий.

Кубическая. R 60%. Цвет белый с кремовым оттенком. Твердость высокая (F). Изотропен. HNO_3 — травится очень медленно или отрицательна. HCl, KCN, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны.

Наблюдается в виде кубических, похожих на пирит кристаллов. Иногда кристаллы имеют зональное строение.

110. Слюда. Весьма распространенная.

Моноклинная. R менее 10%. Цвет темносерый, темнее кварца. Твердость низкая (B). Полируется недостаточно хорошо. Заметная спайность. С масляной иммерсией светлые (перламутровые) рефлексы. Явление анизотропии незаметно. Травление не изучено. Богатые Fe слюды химически не стойки.

111. Смитсонит. $ZnCO_3$. Распространенный.

Тригональная. R 9—3%; двуотражение высокое. Цвет серый, но несколько светлее кальцита и других нерудных минералов. Полируется хорошо. Твердость средняя или выше средней; чертится стальной иглой с трудом. В скрещенных николях цвет полированной поверхности изменяется от светлосерых до темносерых тонов, с выявлением мелких полигональных зерен. В косом свете водяно-прозрачный, мутный, иногда со слабыми оттенками бурого, синеватого, зеленоватого цветов. Порошок бесцветный. HNO_3 — минерал растворяется с медленным вскипанием, причем выявляется структура мелких полигональных зерен или колломорфного вида. HCl — тот же эффект, что и при HNO_3. $FeCl_3$ — поверхность становится шероховатой. KCN и KOH — выявляется структура. $HgCl_2$ — отрицательна.

112. Сперрилит $PtAs_2$. Очень редкий.

Кубическая. R 56%. Цвет белый. Твердость высокая (F). Изотропен. HNO_3, HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — слегка вскипает и местами окрашивается в светлокоричневый цвет. Встречается в виде небольших изометричных кристаллов.

113. Станнин Cu_2FeSnS_4. Распространенный.

Тетрагональная. R 24%; двуотражение слабое. Цвет светлокоричневато-серый, по сравнению с галенитом зеленоватый оттенок. Твердость средняя (D —). Некоторые разности слабо анизотропны; другие сильно анизотропны. HNO_3 — окрашивается в радужный цвет; пары дают потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Обычно ассоциирует с халькопиритом.

114. Стефанит $5Ag_2S \cdot Sb_2S_3$. Редкий.

Ромбическая. Встречается в кристаллах и сплошных массах. R 28%; двуотражение слабое на воздухе, но более ясное в иммерсионном масле. Цвет серовато-белый. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. Внутренние рефлексы отсутствуют. HCl — пары дают потускнение. KCN — окрашивается в темносерый цвет и выявляются царапины. $FeCl_3$ — дает потускнение. KOH — быстро окрашивается в черный цвет. $HgCl_2$ — окрашивается в радужный цвет. HNO_3 — отрицательна. С вольтовой дугой — световое травление.

115. Стибнит (антимонит) Sb_2S_3. Распространенный.

Ромбическая. Форма призматическая. R 43—30%; двуотражение очень сильное. Цвет белый. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. С масляной иммерсией иногда удается подметить красные внутренние рефлексы. HNO_3 — окрашивается в различные радужные цвета. HCl — пары иногда дают легкое потускнение; обычно реакция отрицательна. KCN — выявляются царапины и иногда слегка травится. $FeCl_3$ — отрицательно. KOH — мгновенно производит коричневое потускнение и дает желтый налет; это наиболее характерная для стибнита реакция. $HgCl_2$ — отрицательна. Твердость и цвет минерала иногда изменяются вместе с ориентировкой.

116. Сурьма Sb. Очень редкая.

Гексагональная. R 68%. Цвет белый. Твердость низкая (B). Слабо анизотропна. HNO_3 — быстро чернеет. KCN — окрашивается в светлокоричневый цвет. $FeCl_3$ — окрашивается в черный цвет. $HgCl_2$ — иризирует. HCl — отрицательна, иногда потускнение от паров. KOH — отрицательна. Спайность по ромбоэдру; содержит треугольные ямки.

117. Сфалерит (Zn, Fe)S. Весьма распространенный.

Кубическая. Встречается в зернистых агрегатах, реже в виде хорошо образованных кристаллов. Иногда вместе с пиритом или самостоятельно образует колломорфные текстуры. R 17%. Цвет серый. Твердость средняя (C +). Изотропен. Многие образцы имеют внутренние рефлексы желтой, бурой и красно-бурой окраски. Некоторые содержат треугольные ямки. Порошок от белого до коричневого цвета. Если пропорция железа значительна, то порошок может быть с металлическим блеском. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH,

$HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — вскипает и окрашивается в темнокоричневый цвет; пары дают потускнение, выявляется внутренняя структура (двойники и спайность). Кроме того, внутренняя структура хорошо выявляется травлением $KMnO_4 + H_2SO_4$ в течение 10—20 сек. Сфалерит часто содержит мелкие эмульсиевидные включения халькопирита и реже пирротина или станнина. Является главным составляющим минералом сульфидных полиметаллических (Pb, Zn, Ag) руд. Обычно содержит примеси редких элементов: кадмия, германия, индия и галлия. В супергенных условиях сфалерит очень легко замещается ковеллином, который развивается в нем в виде жилочек, петель и неправильных выделений.

118. Теннантит $3Cu_2S \cdot As_2S_3$. Распространенный.

Кубическая. R 29%. Цвет серо-белый; в контакте с галенитом теннантит имеет отчетливый зеленоватый оттенок. Твердость средняя (D). Некоторые образцы дают красновато-коричневый порошок, другие — черный металлический порошок. Изотропен. HNO_3 — пары дают потускнение. HCl — отрицательна. KCN — обычно отрицательна, иногда окрашивается в светлокоричневый цвет и на некоторых образцах выявляет царапины. $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — тускнеет, иризирует. $K_3Fe(CN)_6$ темнеет (в отличие от тетраэдрита).

119. Тенорит CuO. Редкий.

Моноклинная или триклинная. Форма зерен неправильная, часто колломорфный. R 20%; двуотражение слабое. Цвет серо-белый с коричневатым оттенком. Твердость средняя (E—). Полируется хорошо. Порошок черный. Сильно анизотропен. HNO_3 — от паров темнеет, буреет, некоторые места не травятся. HCl — темнеет, буреет неодинаково в различных местах; от паров темнеет, капля кислоты становится зеленой. KCN, $HgCl_2$ и KOH — не действуют. $FeCl_3$ — иногда слабо буреет. Царская водка — такое же действие, как и от HCl.

120. Тетрадимит Bi_2Te_2S. Редкий.

Гексагональная. Встречается в сплошных листоватых массах и таблитчатых или ромбических кристаллах. R 48%. Цвет белый с кремовым оттенком. Твердость низкая (B). Слабо анизотропен. HNO_3 — вскипает, окрашивается в коричневый цвет. HCl — медленно окрашивается в светлокоричневый цвет. некоторые участки не травятся. $FeCl_3$ — становится радужным. KCN, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны.

121. Тетраэдрит $3Cu_2S \cdot Sb_2S_3$. Распространенный.

Кубическая. R 29%. Цвет серовато-белый. Твердость средняя (D). Одни образцы дают красновато-коричневый порошок,

другие — черный металлический порошок. Изотропен. HNO_3 — пары обычно дают потускнение; некоторые образцы радужно тускнеют при действии реактива более одной минуты. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$—отрицательны. С царской водкой слабо вскипает. KOH (насыщенный раствор) + $KMnO_4$ (насыщенный раствор) + H_2O_2 (30%) — выявляется структура (в отличие от теннантита).

122. Титанит $CaTiSiO_5$. Редкий.

Моноклинная. R менее 10%. Цвет серый, несколько светлее нерудных минералов. В косом свете желтые или зеленоватые внутренние рефлексы. Твердость высокая (5—5,5). Порошок белый. В скрещенных николях иногда проявляется явление анизотропии. Все обычные средства травления не действуют.

123. Троилит FeS. Очень редкий.

Гексагональная. Встречается в метеоритах в форме желваков, зерен и неправильных выделений. А. Г. Бетехтин установил троилит в перидотитах. В отраженном свете очень сходен с пирротином. R 38%. Цвет кремово-розовый. Твердость средняя (4). Сильно анизотропен. По указанию большинства авторов, немагнитен. HNO_3 и HCl — вскипает с выделением H_2S. KOH — медленно вызывает иризацию. $FeCl_3$, KCN, $HgCl_2$ — отрицательны. В отличие от пирротина имеет более кремовый цвет и активно реагирует с HNO_3 и HCl.

124. Турьит — механическая смесь гидроокислов железа. Распространенный.

Турьит представляет собой механическую смесь гидрогётита и гидрогематита, находящихся в тесных прорастаниях. Встречается в плотнозернистых или охристых массах; иногда колломорфный или в виде радиальнолучистых стяжений. Цвет серо-белый. Твердость средняя или высокая. Порошок красный. Травление — все реактивы не действуют.

125. Умангит Cu_3Se_2. Очень редкий.

R 18—16%; двуотражение слабое. Цвет пурпурный, похожий на потускневший борнит. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен; цвет в диагональном положении огненно-оранжевый. HNO_3 — пары дают потускнение, поверхность становится синей. HCl — поверхность синеет. KCN — дает неоднородное потускнение и выявляет зернистую структуру. $FeCl_3$ и $HgCl_2$ — поверхность синеет. KOH — отрицательна. Ассоциирует с клокманитом и клаусталлитом.

126. Уранинит UO_2. Очень редкий.

Кубическая. Встречается в кубических кристаллах или в виде зернистых агрегатов. Колломорфные разности называют

урановой смолкой, а сажистые — урановой чернью. В поверхностных условиях вокруг уранинита образуются налеты желтого или оранжево-красного цвета, которые хорошо заметны под микроскопом в косом свете. Эти реакционные каемки для уранинита являются хорошим диагностическим признаком. R 14%. Цвет серый с легким коричневым оттенком. Твердость высокая (G), но изменчивая. Изредка заметны слабые темно-коричневые внутренние рефлексы. Изотропен. $FeCl_3$ — дает медленное потускнение в темнокоричневый цвет. HNO_3, HCl, царская водка, KCN, $HgCl_2$ — отрицательны. Уранинит обладает радиоактивностью и поэтому дает отпечаток на фотопластинке, что отличает его от весьма сходного с ним под микроскопом хромшпинелида.

127. Фаматинит $3Cu_2S \cdot Sb_2S_3$. Очень редкий.

Ромбическая. Призматическая спайность. R 25%. Цвет розовато-белый, светлее борнита, похожий на розовый энаргит. Твердость средняя (D). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается неоднородно в радужный цвет; пары дают потускнение. HCl — отрицательна. KCN — окрашивается неоднородно в темный цвет; реакция медленнее, чем у энаргита. $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Царская водка — слабое вскипание, бурый налет.

128. Ферберит $FeWO_4$. Редкий.

Моноклинная. R 17%. Цвет серый, подобный сфалериту. Твердость выше средней (E). Слабо анизотропен. Порошок темный, почти металлический. Слабо магнитен. Все реактивы отрицательны. Подобен вольфрамиту, от которого отличается отрицательной реакцией на марганец, выполняемой микрохимическим методом.

129. Флюорит CaF_2. Распространенный.

Кубическая. R 3%. Цвет темносерый, темнее кварца. Твердость низкая. Полируется хорошо. Изотропен. Сильные внутренние рефлексы. Травление не изучено.

130. Франклинит $(Fe, Zn, Mn)O \cdot (Fe, Mn)_2O_3$. Очень редкий.

Кубическая. R 16%. Цвет серый, сходный с цветом магнетита; густокрасные внутренние рефлексы. При царапании получается темнокоричневый порошок. Порошок иногда магнитен. Изотропен. Твердость высокая (F +). HNO_3 — отрицательна. HCl — обычно отрицательна, но пары ее дают иногда потускнение; раствор желтеет. KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Раствор царской водки желтеет.

131. Фрейбергит $3(Cu, Ag)_2S \cdot Sb_2S_3$. Очень редкий.

Кубическая. R 32%. Цвет серо-белый. Цвет порошка красный до черного. Внутренние рефлексы красные, видны не всег-

да. Твердость средняя (D). Изотропен. HNO_3—медленно окрашивается в коричневый цвет. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — иногда тускнеет, иризирует. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — оставляет пятнистый осадок; чаще отрицательна.

132. Халькозин Cu_2S. Весьма распространенный.

Кубическая и ромбическая. R 29; 22% (изменчив). Цвет белый (для чистого халькозина), голубовато-белый (присутствие в виде твердого раствора ковеллина) и розовато-серый (присутствие в виде твердого раствора борнита). Твердость низкая (B). Гипогенный халькозин, содержащий не более 8% растворенного ковеллина, изотропен. Очень мелкозернистый супергенный халькозин также, очевидно, изотропен. В большинстве случаев и гипогенный и супергенный халькозин слабо анизотропен. HNO_3 — сильно вскипает; минерал окрашивается в синий цвет; в некоторых изотропных разностях выявляется октаэдрическая спайность травления, но очень мелкозернистый супергенный халькозин такой спайности не выявляет. HCl — отрицательна, некоторые разности слабо тускнеют. KCN — быстро окрашивается в черный цвет; сначала выявляется спайность, но если оставить каплю на более продолжительный срок, остается шероховатая изъеденная поверхность. $FeCl_3$ — окрашивается в синий цвет; на некоторых изотропных образцах выявляется октаэдрическая спайность. KOH — отрицательна. $HgCl_2$ — дает легкое потускнение.

На основе рентгенометрических исследований Бюргера выделяют еще так называемый дигенит Cu_9S_5, который выглядит так же, как голубой халькозин, и обладает изотропностью. Дигенит был получен искусственно проф. Д. П. Григорьевым.

133. Халькопирит $CuFeS_2$. Весьма распространенный.

Тетрагональная. Встречается в виде неправильных выделений, петель, жилок и в сплошных массах; кристаллы редки. Известны случаи колломорфной текстуры халькопирита. R 47%. Цвет латунно-желтый, в контакте с золотом заметен слабый зеленоватый оттенок. Твердость средняя (C). Большинство образцов слабо, но явно анизотропно, лишь небольшая их часть, повидимому, изотропна. HNO_3—пары дают потускнение, для некоторых разностей отрицательна. HCl, KCN, $FeCl_3$, KOH, $HgCl_2$ — отрицательны. Пары царской водки дают неоднородное потускнение и выявляют зернистую структуру; площадь, покрытая каплей, обычно медленно окрашивается в коричневый цвет, но некоторые участки остаются почти незатронутыми. H_2O_2 (30%) + NH_4OH — выявляется структура. Под действием насыщенного раствора $AgNO_3$ темнеет (отличие от золота). HNO_3 (концентрированная) + $KClO_3$ (кристаллическая) — выявляется структура. Легко царапается иглой, что отличает его от пирита. Халькопирит — важнейший медьсо-

держащий минерал, встречающийся в месторождениях различного генезиса. Характерен парагенезис халькопирита с пиритом, пирротином, сфалеритом, борнитом и др.

134. Хлоантит $NiAs_2$. Редкий.

Кубическая. Форма зерен изометрическая, иногда ангедральная. R 56%. Цвет белый. Твердость выше средней (E +). Полируется достаточно хорошо (лучше пирита). Изотропен. HNO_3 — иногда вскипает, медленно буреет, выявляется зональная структура. HCl, KCN, $HgCl_2$ и KOH — отрицательны. $FeCl_3$ — слабо буреет, выявляется структура. H_2O_2 — буреет, темнеет, выявляется зональная структура. Царская водка — вскипает.

135. Хризоколла $CuSiO_3 . 2H_2O$. Редкая.

Встречается в виде налетов и плотных масс в зоне окисления. Аморфный минерал. R менее 10%. Цвет серый с еле заметным кремовым оттенком. В косом свете светлозеленая или голубая. Порошок светлоголубой или бесцветный. Твердость от низкой до средней (2—4). Изотропна. HNO_3 и HCl — выявляется колломорфное строение. $FeCl_3$ действует не всегда. $HgCl_2$, KOH и KCN — отрицательны.

136. Хромит (хромшпинелид) $(Fe, Mg)(Al, Cr)_2O_4$.
Весьма распространенный.

Кубическая. Изометричен. Идиоморфен, иногда ксеноморфен. R 14%. Цвет серый, темнее магнетита и ильменита. Твердость высокая (G +; 6—7,5 по Моосу). Полируется плохо, часто ямчатый. Изотропен. Немагнитен. Метаморфизованный хромит обладает магнитными свойствами. Внутренние рефлексы желто-бурые или красные; видимы не всегда. Порошок светлокоричневый. Диагностическое травление — все реактивы отрицательны. Сплошное травление смесью $KClO_3 + H_2SO_4$ при кипячении в течение 30—60 мин. выявляет спайность.

137. Церуссит $PbCO_3$. Распространенный

Ромбическая. Форма зерен кристаллическая, чаще неправильная, в виде жилок, каемок и колломорфных скоплений. R 12—8%; двуотражение сильное. В отраженном свете имеет серый цвет, заметно светлее кальцита и других нерудных минералов. В косом свете белый, бесцветный, иногда с желтым оттенком от окрашивающих окислов железа. Порошок белый. Полируется хорошо. Твердость средняя (C). В скрещенных николях заметно явление анизотропии. HNO_3 — вскипание и потемнение минерала от растворения полированной поверхности. HCl — вскипание, образуется бесцветный кристаллический осадок $PbCl_2$ (смотреть в косом свете). $FeCl_3$ и KOH — выявляется структура. $HgCl_2$ — слабо выступает структура.

H_2SO_4 — дает белый осадок $PbSO_4$ (смотреть в косом свете). Церуссит в присутствии англезита (и в отличие от него) от действия холодного раствора 1% CrO в течение одной минуты покрывается яркожелтым налетом хромата.

138. Цилиндрит (килиндрит) $6PbS . Sb_2S_3 . 6SnS_2$. Очень редкий.

Тетрагональная. R 40%. Цвет серо-белый. Твердость ниже средней (C —). Сильно анизотропен. HNO_3 — пары дают потускнение; медленно окрашивается в радужный цвет. HCl — пары дают потускнение, после двухминутного травления слегка окрашивается. KCN — отрицателен. $FeCl_3$ — окрашивается в слегка коричневый цвет. KOH—окрашивается в светлосерый, местами радужный цвет. $HgCl_2$ — отрицательна. Царская водка — буреет, иризирует, от паров тускнеет.

139. Цинкит ZnO. Очень редкий.

Гексагональная. R 11%. Цвет светлорозово-серый. Твердость средняя (D). Внутренние рефлексы желтые до карминово-красных. Явление анизотропии незаметно — мешают рефлексы. Травление не изучено.

140. Шеелит $CaWO_4$. Распространенный.

Тетрагональная. R 10%. Цвет в отраженном свете серый, значительно светлее нерудных минералов (кварца, кальцита и др.). В косом свете желтоватый или бесцветно-прозрачный. Порошок белый. Твердость выше средней (E); черта получается с большим нажимом. В скрещенных николях явление поляризации незаметно из-за внутренних рефлексов. В шлифе иногда заметна спайность. HNO_3 действует слабо. $FeCl_3$, KOH и KCN — отрицательны. HCl — выявляются слабые штрихи по спайности.

141. Шмальтин $CoAs_2$. Редкий.

Кубическая. R 56%. Форма зерен ангедральная, иногда с зональным строением. Цвет белый. Твердость выше средней (E +). Полируется несколько лучше кобальтина, менее ямчатая. Изотропен. HNO_3 — вскипает энергично, темнеет, после смывания — серый, зональная структура. HCl и KCN — отрицательны. $FeCl_3$ — становится бледнокоричневым, выявляется структура, иногда отрицательно. $HgCl_2$ — медленно буреет, стирается. KOH — отрицательна. H_2O_2 — иризирует, выявляется зональная структура. $KMnO_4 + H_2SO_4$ — выявляется структура.

142. Штернбергит $Ag_2S . Fe_4S_5$. Редкий.

Ромбическая. Кристаллы таблитчатые, обычно в веерообразных агрегатах. R 44—34%; двуотражение сильное. Цвет кремовый с розовым оттенком. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. HNO_3 — окрашивается в серый цвет. KOH —

быстро окрашивается в светлокоричневый цвет. KCN, HCl, $FeCl_3$, $HgCl_2$ — отрицательны.

143. Штромейерит (Ag, Cu)$_2$S. Очень редкий.

Имеет две модификации — кубическую и ромбическую, с температурой превращения около 100°. Встречается в сплошных массах и кристаллах. R 27%; двуотражение очень слабое. Цвет серовато-белый с фиолетово-розовым оттенком. Твердость низкая (B). Сильно анизотропен. HNO_3 — дает потускнение, от паров коричневатый налет. KCN—быстро окрашивается в коричневый цвет. HCl (концентрированная) — сразу темнеет, от паров — иризирующий налет. $FeCl_3$ — иризирующий, легко удаляющийся налет. $HgCl_2$ — окрашивается радужно. KOH—отрицательна. С вольтовой дугой — световое травление.

144. Электрум Au, Ag. Редкий.

Кубическая. Форма зерен изометрическая или неправильная: жилки, дендриты и т. д. R до 90% (изменчив). Цвет светложелтый. Твердость низкая (B). Сильный блеск. Ковкий. Полируется хорошо. Изотропен. HNO_3 — от паров тускнеет, слабо вскипает. HCl — отрицательна. KCN — темнеет, после смывания становится ямчатым, теряет желтый оттенок, благодаря растворению Au. $FeCl_3$ — отрицательно; иногда буреет, иризирует. $HgCl_2$ — буреет, иризирует (до черного). KOH — отрицательна.

145. Энаргит $3Cu_2S.\ As_2S_5$. Распространенный.

Ромбическая. R 23%; двуотражение слабое. Цвет у одной разновидности светлосерый, у другой розоватый; обе разновидности можно наблюдать в одном и том же образце. Твердость средняя (D). Сильно анизотропен. В масле иногда красные рефлексы. HNO_3 — пары дают слабое потускнение; иногда отрицательна. HCl — отрицательна. KCN — травит в черный цвет и иногда выявляется параллельная структура. $FeCl_3$ и KOH — отрицательны. $HgCl_2$ — иногда слегка окрашивается.

146. Эритрин $Co_3As_2O_8.8H_2O$. Редкий.

Моноклинная. Встречается в землистых скоплениях и в виде лучисто-листоватых агрегатов. R менее 10%. Цвет серый. Розовые внутренние рефлексы. Твердость низкая. Порошок белый или розовато-белый. Явление поляризации маскируется цветом внутренних рефлексов. HNO_3 и HCl—шероховатая поверхность от растворения. KOH — иризирует, стирается начисто. $FeCl_3$, KCN, $HgCl_2$ — отрицательны.

147. Якобсит $MnFe_2O_4$. Редкий.

Кубическая. R 20%. Серовато-белый с оттенком оливкового. Твердость высокая (6). Изотропен. Красные внутренние рефлексы изредка наблюдаются в иммерсионном масле при скрещенных николях. Все обычные средства травления не действуют. Обладает магнитностью.

ГЛАВА XV

ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ РУД

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при исследовании руд является изучение их строения, т. е. выяснение их текстурных и структурных особенностей. Это имеет большое научное и прикладное значение.

При изучении текстур руд выясняются возрастные соотношения между минеральными агрегатами, а при изучении структур руд выявляется последовательность образования отдельных минералов. Знание возрастных соотношений минералов и минеральных агрегатов в рудах помогает выяснению генезиса месторождения.

Изучение текстур и структур руд имеет также большое прикладное значение. При механическом обогащении руд необходимо знать размеры и формы зерен, характер их срастания, включения, степень трещиноватости зерен и другие факторы, которые выясняются при исследовании текстур и структур руд. Изучение характера срастаний минералов также необходимо при разработке наиболее эффективных методов технологической переработки руд.

Задача минераграфии заключается в расшифровке наблюдаемых текстурных и структурных форм, познании их генетической сущности, выяснении физико-химических условий процесса рудообразования.

Изучение строения руд производится следующими методами: 1) геологической документацией рудных забоев; 2) геологической документацией рудного керна; 3) макроскопическим изучением штуфов руд; 4) макроскопическим изучением отполированных штуфов; 5) микроскопическим исследованием полированных шлифов.

При документации рудных забоев изучается площадь руды в несколько квадратных метров. При макроскопическом изуче-

нии штуфов и отполированных штуфов эта площадь составляет 1—2 дм². При микроскопических исследованиях изучаемая площадь измеряется 1—3 см².

Изучение строения руды начинается с наблюдений в забоях особенностей строения рудной залежи и завершается кропотливым исследованием под микроскопом строения зерна. Только одно микроскопическое изучение полированных шлифов руд может привести к неправильной трактовке генетической сущности наблюдаемых текстур и структур руд.

Ниже приводятся основные определения понятий текстура и структура.

Текстура определяется формой, размерами и сочетанием агрегатов минералов.

Структура определяется формой, размерами и соотношением зёрен минералов.

По А. Г. Бетехтину, структура возникает в результате раскристаллизации жидкости или твердого минерального вещества или кристаллизации возгоняющихся газообразных продуктов. В некоторых случаях она может быть обусловлена явлениями катаклаза. Поскольку составной единицей структурного рисунка является кристаллическое зерно, постольку, естественно, образование его регулируется кристаллизационными факторами (способностью к кристаллизации вещества, линейной скоростью роста кристаллических индивидов, силой кристаллизации), находящимися, в свою очередь, в зависимости от физико-химических условий образования кристаллического агрегата.

Текстуры руды, характеризующиеся в основном наличием неравнозначных минеральных агрегатов, могут точно так же возникнуть в средах любого физического состояния. Однако закономерности расположения или, вернее, сочетания минеральных агрегатов в пространстве регулируются в подавляющем большинстве случаев геологическими факторами (сегрегацией, метасоматозом, инъекцией и др.). В некоторых случаях текстурный рисунок может быть обусловлен неоднородностью химического состава в разных точках минерального вещества к моменту его раскристаллизации.

2. ТЕКСТУРЫ РУД

Текстуры обычно изучаются путем макроскопического просмотра и зарисовок полированных штуфов или образцов руд. В случае очень крупнозернистых агрегатов текстурные срастания необходимо изучать путем документации забоев или иных геологических обнажений. Это относится, например, к шлировым текстурам месторождений хромитов, или к линзовой

текстуре колчеданных месторождений, или жеодовой текстуре бурожелезняковых месторождений.

Изучение тонких текстурных срастаний производится обычно под микроскопом, например некоторых текстур коллоидов (колломорфная текстура) или петельчатых текстур сульфидных руд из зоны цементации.

Ниже приводится краткая характеристика важнейших текстур руд различных генетических типов рудных месторождений и их классификация (табл. 11).

ОПИСАНИЕ ТЕКСТУР РУД

Текстуры руд магматических месторождений

Типичными магматическими месторождениями являются месторождения хромита и титано-магнетита. Весьма распространенной для них будет массивная текстура, характеризующаяся однородным строением руды, представляющей собой агрегат тесно соприкасающихся между собой рудных зерен. Если рудные зерна, не соприкасаясь друг с другом, равномерно рассеяны в массе сопровождающих минералов, такая текстура носит название равномерновкрапленной. Нередко в указанных месторождениях наблюдается такситовая, или шлировая, текстура, которая характеризуется наличием в руде участков, отличающихся составом, или структурой, или и составом и структурой одновременно (рис. 30).

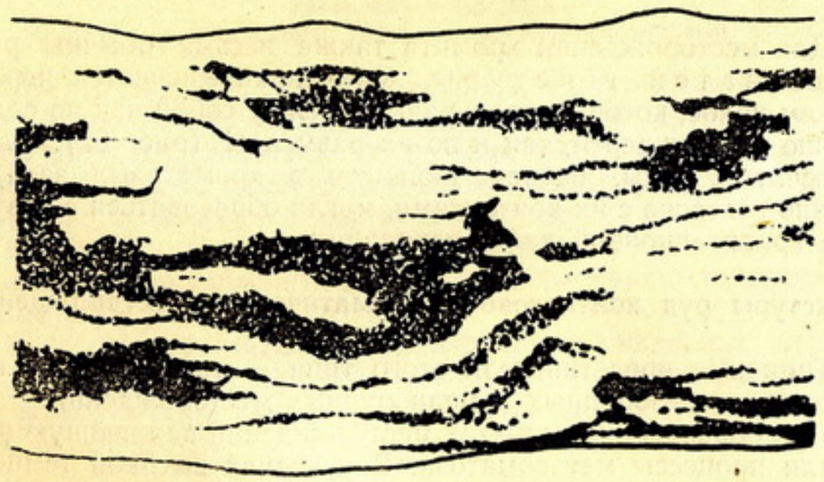


Рис. 30. Шлировая текстура. Зарисовка с натуры.
0,4 натуральной величины.
Черное — хромшпинелид; белое — серпентинизированный дунит.

Нодулярная, или бобовая, текстура часто наблюдается в рудах месторождений хромита; она характери-

зуется выделением среди основной массы сопровождающих минералов овальных или, реже, округлых агрегатов зерен (нодулей) хромита (рис. 31). Иногда нодули хромита располагаются обособленными полосами. Наличие нодулярных текстур в рудах хромитовых месторождений является показателем образования некоторых из них в результате ликвации основной магмы.

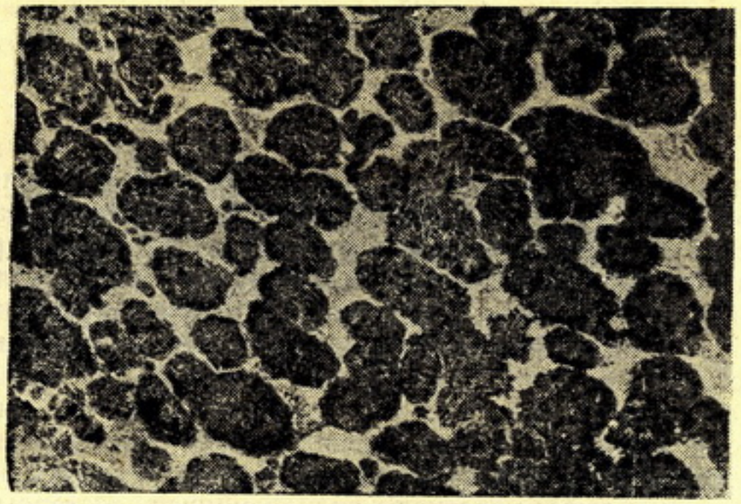


Рис. 31. Нодулярная текстура. Фотография полированного образца. Увеличено в 1,5 раза.
Черное — агрегаты зерен хромшпинелида; белое — серпентинит.

Для месторождений хромита также весьма обычны руды полосчатой текстуры. Они характеризуются чередованием полос, которые различаются между собой как по содержанию рудных зерен, так и по их размерам (рис. 32). Такие полосчатые руды, располагающиеся в хромитовых залежах обычно согласно с их контактами, могли образоваться в результате гравитационной дифференциации.

Текстуры руд контактово-метасоматических месторождений

Типичные представители этого типа — текстуры руд контактовых железорудных и меднорудных месторождений.

При образовании руд этих месторождений важнейшую роль играли процессы метасоматоза. В условиях высокой температуры и большой активности растворов, богатых летучими компонентами, происходило полное метасоматическое замещение породы рудным материалом, в результате которого и образовалась массивная текстура руды.

В случае избирательного метасоматоза может возникнуть реликтовая текстура, для которой характерно замещение

рудным минералом лишь одних прослоев в породе, например халькопиритом известковых прослоев в туфогенных породах.

Нередко в месторождениях описываемого типа встречаются вкрапленные и пятнистые текстуры, которые характеризуются обособлением сплошных рудных пятен в массе вкрапленной руды или пятен вкрапленности в пустой породе.

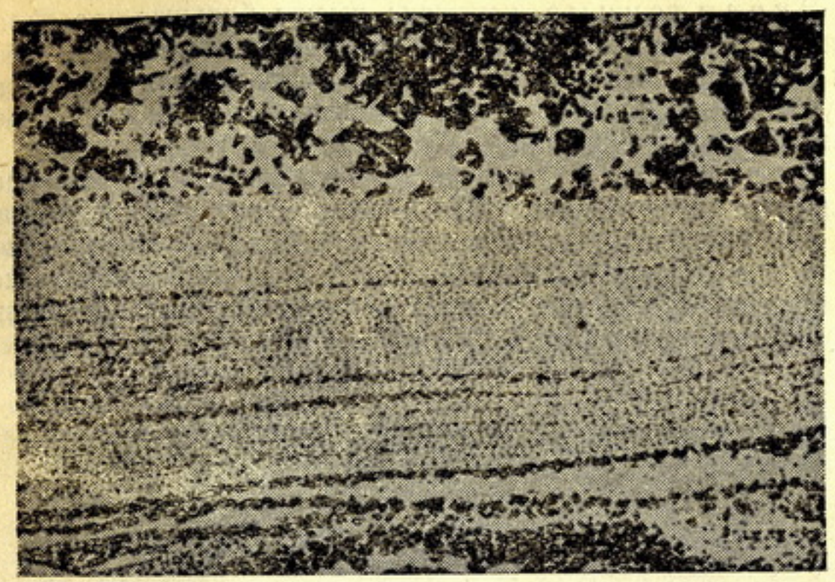


Рис. 32. Полосчатая текстура. Зарисовка с фотографии. Увеличено в 1,5 раза.
Черное — хромшпинелид; белое — серпентинизированный дунит.

Примером своеобразной пятнистой текстуры являются так называемые оспенные руды, в которых среди агрегатов зерен магнетита выделяются крупные пятна полевого шпата. Образование этих текстур некоторые исследователи связывают с процессом избирательного метасоматоза.

Друзовые текстуры образуются на стенках полостей и характеризуются развитием хорошо образованных кристаллических агрегатов.

В контактово-метасоматических месторождениях нередко наблюдаются текстуры очень сложного рисунка, возникновение которых объясняется наложением гидротермальной фазы, следующей за основной пневматолитовой фазой контактового процесса.

Текстуры руд гидротермальных месторождений

Представителями гидротермальных месторождений могут служить многие золоторудные и редкометальные жильные месторождения, месторождения вкрапленных медных руд, ме-

дистых песчаников, полиметаллические месторождения и колчеданные месторождения.

Многочисленные представители месторождений этой категории обладают рудами, весьма различными в текстурном отношении.

Массивные текстуры руды обычны для медноколчеданных и полиметаллических месторождений.

Вкрапленные текстуры имеют большое распространение в гидротермальных месторождениях. Руды этой текстуры встречаются почти во всех месторождениях совместно с другими текстурными типами и, кроме того, слагают самостоятельные месторождения.

Полосчатая текстура наблюдается в рудах многих сульфидных месторождений. Она характеризуется чередованием линейно-вытянутых агрегатов различного минералогического состава. Полосчатые руды обычны в колчеданных месторождениях Урала, где в одних полосах преобладает пирит, в других — халькопирит, в третьих — сфалерит и т. д. (рис. 33).



Рис. 33. Полосчатая руда одного из колчеданных месторождений Урала. Светлое — пирит и халькопирит; темное — сфалерит. Полированный шлиф. Увеличено в 4 раза.

Обычно полосчатость этих руд согласна с ограничением рудных залежей и сланцеватостью вмещающих пород. Образование полосчатых руд объясняется метасоматическим замещением слоистых или рассланцованных вмещающих пород сульфидами гидротермальных растворов.

Довольно своеобразной является жильная текстура, или текстура пересечения. В рудах колчеданных месторождений Урала иногда наблюдаются секущие рудную

залежь в поперечном или диагональном направлении сульфидные жилки с хорошо образованными кристаллами халькопирита, сфалерита и теннантита. Почти полное отсутствие в этих жилках наиболее распространенного минерала колчеданных руд — пирита дает основание рассматривать их как наиболее позднюю стадию минерализации медными и цинковыми сульфидами.

Линзовая текстура представляет собой обособление линз и линзочек колчедана в массе вкрапленной руды или вмещающей породы; руды этой текстуры встречаются на многих колчеданных месторождениях Среднего Урала.

Крустификационная текстура характерна для выполнения открытых трещин и полостей. Она образуется в результате периодического отложения минерального (рудного) вещества от периферии к центру в виде узких, выдержанных по мощности и параллельных как между собой, так и стенке трещины слоев или зон. Как разновидность этой текстуры различают симметрично-крустификационную текстуру, когда слои отлагались симметрично по обе стороны трещины. Крустификационные текстуры наблюдаются в место-

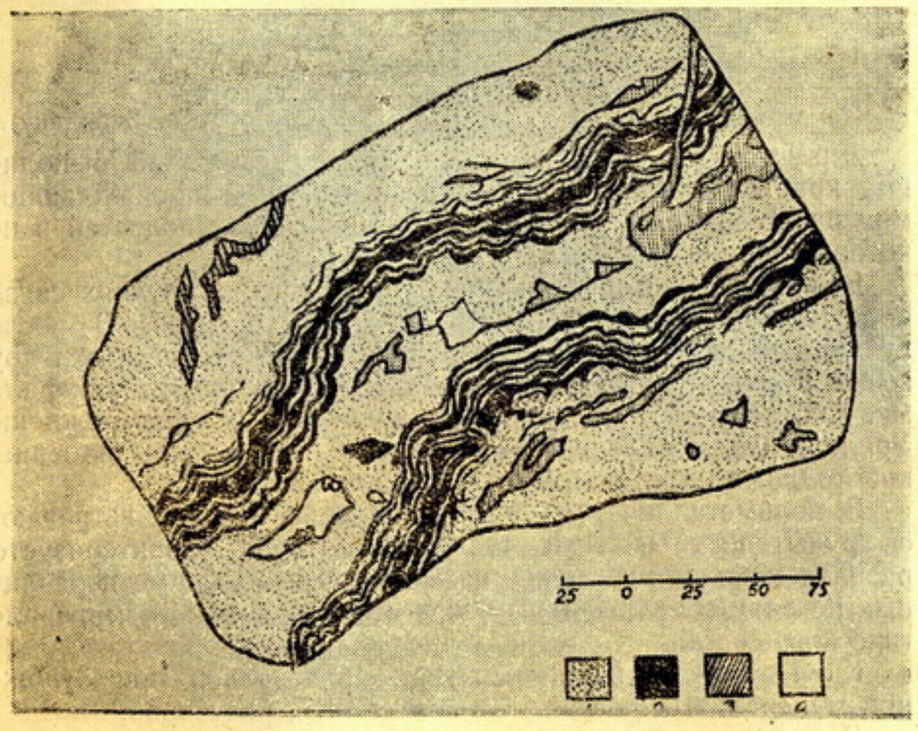


Рис. 34. Симметрично-крустификационная текстура колчеданной руды. Зарисовка по фотографии полированного образца. 1 — пирит; 2 — сфалерит; 3 — кварц, выполняющий пустоты; 4 — пустотки. Увеличение 2,5×

рождениях, образовавшихся на небольшой глубине и при незначительном давлении (рис. 34).

Кокардовая текстура встречается редко; она характерна для месторождений небольших глубин. Руды этой текстуры образовались в результате отложения сульфидов и других рудных минералов вокруг обломков или округлых телец вмещающей породы (рис. 35, 36).

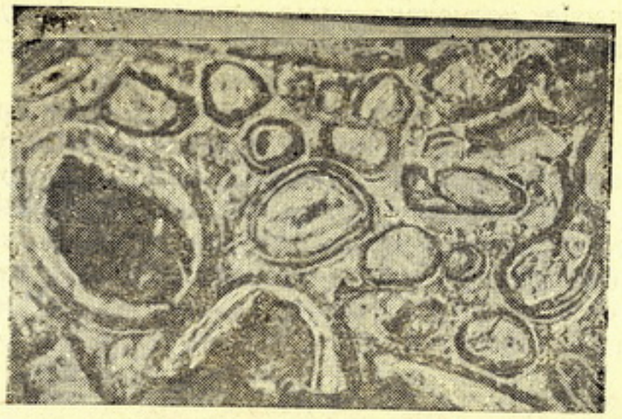


Рис. 35. Кокардовая текстура.
Светлое — известняк; темное — сульфиды.
0,9 натуральной величины
(По В. Алявдину и А. Бетехтину).

Друзовая текстура образуется в результате выполнения кристаллическими щетками рудных и сопровождающих минералов внутренней поверхности небольших полостей в некоторых рудных залежах.

Возникновение друзовых текстур во многих случаях связано с наличием в растворах газовых компонентов. В последующие стадии развития гидротермального процесса эти друзовые пустоты могли заполняться теми или иными минералами. Так, например, на одном из колчеданных месторождений Урала в руде наблюдаются небольшие полости, выполненные кристаллами пирита, галенита и кварца.

В полиметаллических месторождениях нередко встречаются руды пятнистой текстуры, которая характеризуется развитием более или менее изометричных по форме и различных по размеру сульфидных агрегатов переменного минералогического состава.

Колломорфная текстура образовалась при отложении минеральных веществ из коллоидных растворов.

Коллоиды играют важную роль не только при образовании экзогенных месторождений, как считали раньше, но и при образовании эндогенных месторождений, что признается теперь многими учеными.

Гидротермальные растворы могут выделять ряд своих компонентов в виде гелей, которым присуще колломорфное строение.



Рис. 36. Кокардовая текстура магнетита (черное), отложенного вокруг обломков скарнированной породы (светлое). Одно из железорудных месторождений Ангаро-Илима.
0,6 натуральной величины.
(По Г. В. Рослякову).

Колломорфная текстура представляет собой сложный агрегат, состоящий из извилистых параллельных полосок и округлых зональных почек (рис. 37).

Следует отметить, что еще не каждое образование, имеющее петельчато-зональное и почковидное строение, произошло из коллоидного геля. Для последнего очень характерны трещинки, радиально располагающиеся в округлых почках и образовавшиеся в результате сокращения отвердевающего геля (рис. 38). Подобные узоры могут слагаться одним минеральным веществом (пирит, марказит) или послойными, тесно че-

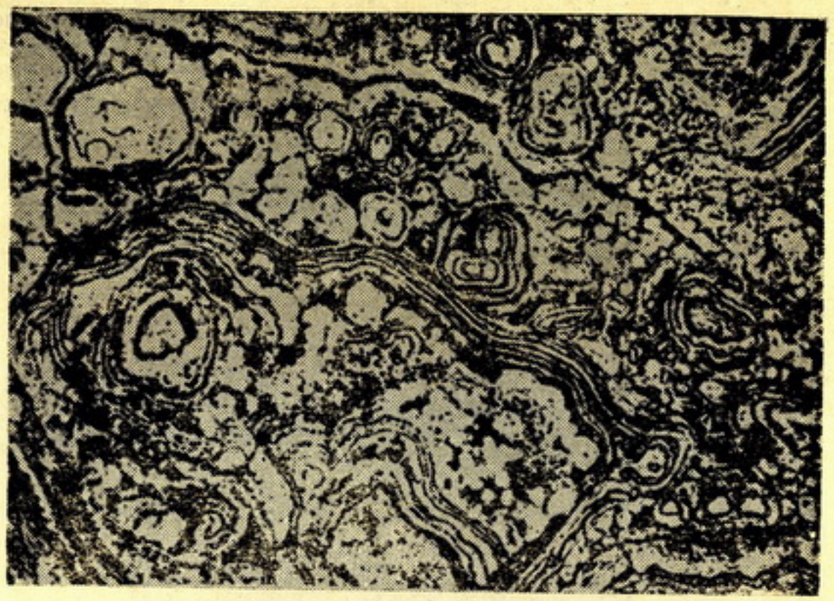


Рис. 37. Полосчато-колломорфное и крустификационное строение колчеданной руды. Фотография полированного образца.
Белое — пирит; серое — сфалерит.
Натуральная величина.

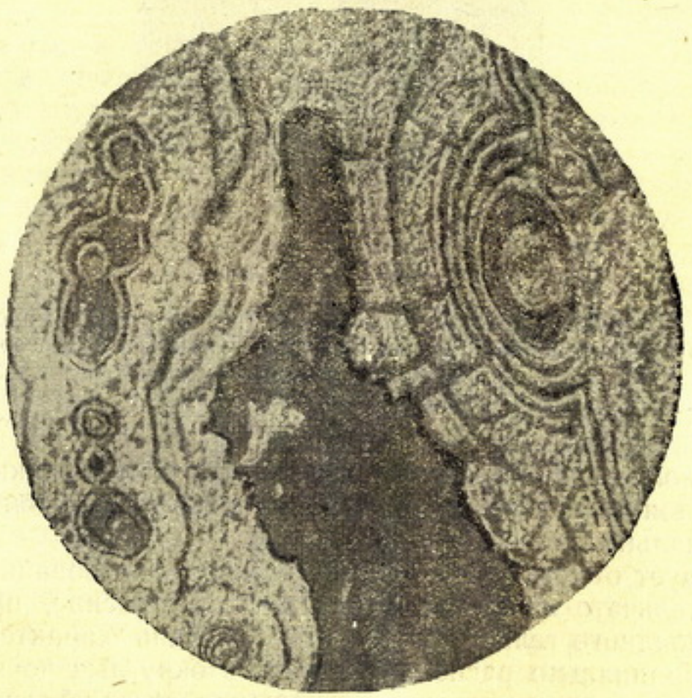


Рис. 38. Концентрически-зональная почка пирита с радиально расположенными трещинками сокращения геля. Из колчеданных месторождений Урала.
Увеличение 52×.

редующимися узкими зонами минералов, например: пирита и халькопирита, пирита и сфалерита, вуртцита и халькопирита и др.

Колломорфное строение руд можно наблюдать как макроскопически (рис. 37), так и под микроскопом (рис. 39).

Прекрасно выраженные колломорфные текстуры наблюдаются на колчеданных месторождениях Южного Урала и Кавказа.

Брекчиевидная текстура возникает в результате избирательного метасоматического замещения сульфидами тектонических или вулканических брекчий. Руды этой текстуры представляют собой брекчию, в обломках которой может быть как руда, так и вмещающая порода, цемент же обычно бывает рудный. Такие брекчиевидные текстуры хорошо представлены на некоторых колчеданных месторождениях Урала. Руды этой текстуры могут наблюдаться как в виде гигантских брекчий в забоях, так и в виде микробрекчий в полированных шлифах.

Брекчиевая текстура в отличие от брекчиевидной характеризуется наличием в руде обломков остроугольной формы. Примером брекчиевой текстуры могут служить руды полиметаллических месторождений Нагольного кряжа в Донбассе,

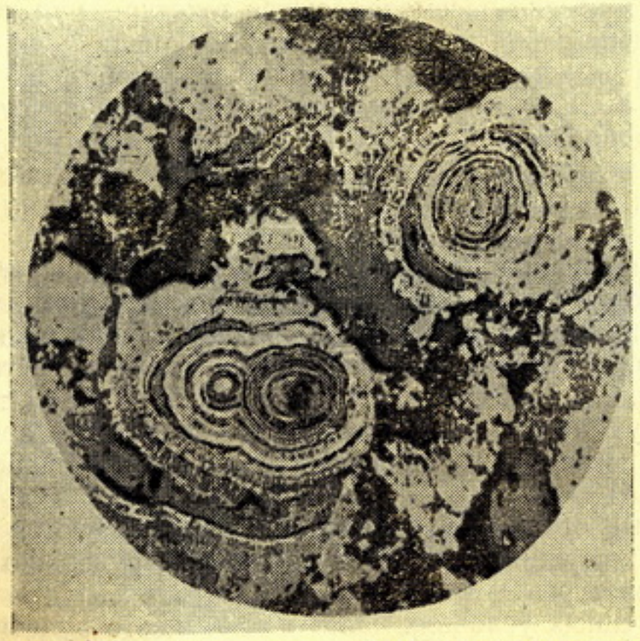


Рис. 39. Колломорфная микротекстура. Чередование слоев пирита и халькопирита. Из колчеданных месторождений Урала.
Увеличение 50×.

в которых остроугольные обломки сланца и сфалерита цементируются жильными минералами, а также руды некоторых колчеданных месторождений Урала (рис. 40).

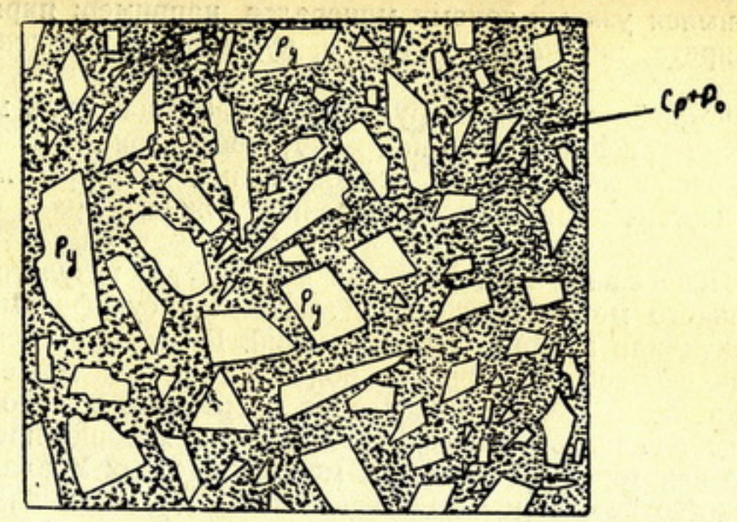


Рис. 40. Брекчиевая текстура колчеданной руды. Обломки представлены пиритом, а цементирующая масса — пирротином, халькопиритом и нерудным минералом.
Натуральная величина.

Текстуры руд месторождений выветривания

В этом разделе рассматриваются текстуры руд латеритных месторождений (бурых железняков), конкреционных месторождений (бурых железняков), секреционных месторождений (никелевых), а также зон окисления и цементации сульфидных месторождений.

В первые стадии выветривания образуются так называемые корковые текстуры, примером которых могут служить лимонитовые корки на дуните.

При выщелачивании легко растворимых минералов образуются пористые текстуры. При интенсивном выщелачивании силикатного вещества образуется ячеистая, или сотовая, текстура, которая обусловливается оставшимися от силикатного вещества перегородками. Примером такой текстуры могут служить ячеистые руды, сложенные кремнистым каркасом, в ячейках которого наблюдается порошковатый лимонит.

Конечные стадии выветривания характеризуются рыхлыми рудными скоплениями, которые образуют руды порошковатой текстуры.

В экзогенных условиях часто имеют место рудные новообразования, происшедшие из коллоидных растворов.

В процессе гелевого замещения может развиваться колломорфная текстура, для которой характерны извилистые, согласные по расположению слои тонкозернистых или скрытокристаллических агрегатов. Такая текстура образуется, например, при замещении в зоне окисления колчеданных месторож-

дений пирита гидроокислами железа или сульфидов меди малахитом и азуритом.

При заполнении пустот возникают жеодовые, друзовые и крустификационные текстуры. Их можно наблюдать в месторождениях бурых железняков конкреционного типа или в окисленных рудах сидеритовых железорудных месторождений. В открытых полостях образуются под влиянием силы тяжести почковидные и сталактитовые текстуры, характерные для гидроокислов железа, малахита, смитсонита и др. Кроме общеизвестных примеров этой текстуры, следует отметить крупные сталактиты, образованные сульфатами железа и меди (мелантеритом и халькантитом), наблюдаемые в выработках колчеданных месторождений. Характерны почковидные текстуры окисленных свинцово-цинковых руд в месторождениях Южного Казахстана.

Нередко в рыхлых породах происходит образование рудных стяжений (конкреций). Конкреции представляют собой характерные формы коллоидных образований. В этом случае имеют место конкреционные текстуры, например в силикатно-никелевых месторождениях или в зоне окисления марганцевых месторождений.

При процессах замещения сульфидов в зоне цементации образуются петельчатые текстуры. Например, при замещении халькопирита вторичными сульфидами развиваются неправильные полосы (петли), состоящие из агрегата вторичных сульфидов: борнита, халькозина, ковеллина.

Особо следует отметить каркасные (ячеистые) текстуры, определяющиеся развитием в трещинной системе сульфидных масс кремнисто-лимонитового ячеистого скелета, в той или иной мере выполненного супергенными минералами.

Гидроокиси железа, замещая сульфиды различного состава, нередко дают характерные «индикаторные» текстуры, по которым можно установить исходные сульфидные руды.

Начало изучения таких реликтовых текстур лимонитов было положено в 1920 г. группой геологов США, возглавляемой А. Локком. Особенно много в этом направлении было сделано Р. Блэнчардом (R. Blanchard) и П. Босуэллом (P. Boswell). В СССР индикаторные текстуры лимонитов, имеющие большое значение при оценке железных шляп сульфидных месторождений, изучались В. М. Крейтером и С. С. Смирновым.

Среди ячеистых текстур С. Смирновым выделяются «ящичные» и «губковые».

Ящичные текстуры обладают ячейками более или менее одинакового размера и обычно угловатыми по форме (что особенно характерно). Различные типы текстур в пределах этой подгруппы выделяются по форме ячеек, их размерам и толщине стенок. Эти ящичные текстуры характерны для лимонитов, образующихся за счет халькопирита, борнита, гале-

нита и тетраэдрита (фиг. 41). Считается, что пирит подобных ящичных текстур не дает. Но в условиях сухого климата и вкрапленных сульфидных руд пирит может давать прямоугольные ячеистые текстуры, которые были установлены на колчеданных месторождениях Мугоджар.

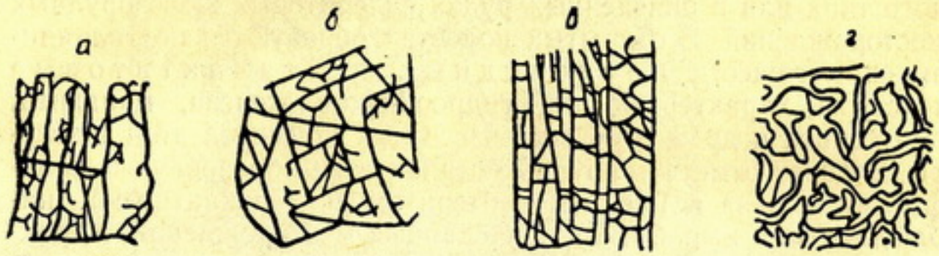


Рис. 41. Ящичные текстуры лимонитов, образовавшиеся за счет: а) халькопирита, б) борнита, в) галенита, г) блеклой руды.
(По Блэнчарду и Босуэллу).

Губковые текстуры имеют ячейки округлой формы, и размеры этих ячеек колеблются в широких пределах. Подобные губковые текстуры особенно характерны для лимонитов, возникших за счет пирита (фиг. 42).

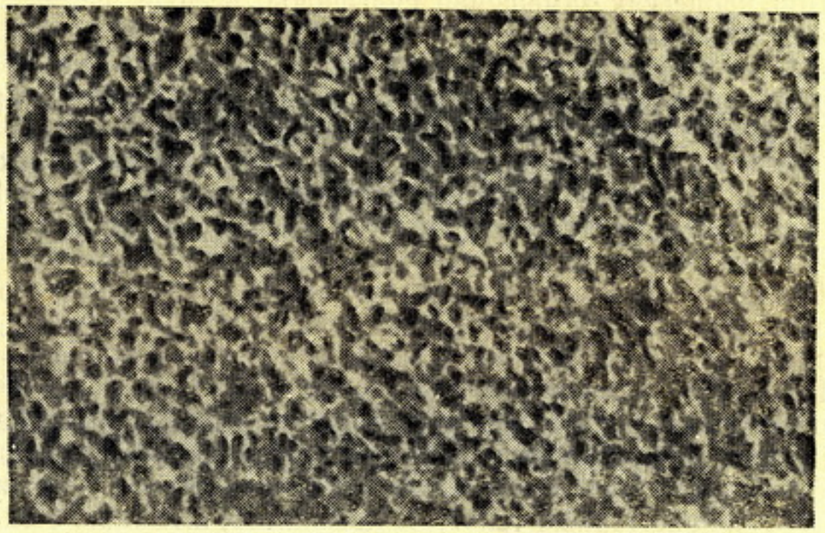


Рис. 42. Губковая текстура лимонита, образовавшаяся из пирита.
(По Блэнчарду и Босуэллу).

Кроме ячеистых, выделяют еще группы плотных текстур. Из них следует отметить текстуру так называемого «рельефного лимонита», особенно характерную для халькозина. Это внешне порошковатая, но слегка устойчивая масса, напоминающая под лупой толченый сахар.

Наиболее благоприятные условия для возникновения индикаторных текстур таковы:

1. Малоактивный характер среды и медленное выделение минералов из растворов.

2. Вкрапленный характер исходных руд, так как в сплошной руде (особенно богатой пиритом) происходит такое тесное взаимоотношение между продуктами окисления, что трудно ожидать развития специфических текстур.

В месторождениях выветривания не представляет большой редкости органогенная (реликтовая) текстура. Довольно обильные органические остатки отмечены в рудах месторождений пермских медистых песчаников, в марганцевых рудах Башкирии и в других месторождениях.

Текстуры руд осадочных месторождений

К осадочным рудным месторождениям относятся месторождения железа, марганца, бокситов и аллювиальные россыпи. Образование руд этих месторождений происходит вследствие выпадения в водных бассейнах химических и механических осадков.

Химические осадки выпадают главным образом из молекулярных электролитических растворов, но известное участие в процессах седиментации принимают и коллоидные растворы. Выносимые с суши речными водами коллоидные растворы свертываются под действием электролитов морской воды. В результате возникают коллоидные разновидности морских осадков. Известны следующие текстурные типы руд осадочных месторождений.

Слоистая текстура определяется согласным чередованием рудных слоев как между собой, так и с осадочными вмещающими породами. Рудные слои имеют небольшую мощность, но распространяются на значительных площадях. Классические примеры этой текстуры можно наблюдать на месторождениях марганца.

Линзовидная текстура—это частный вид слоистой текстуры. Она образуется, когда рудные слои быстро теряют мощность по простиранию и наконец совсем выклиниваются.

Для осадочных месторождений весьма характерна оолитовая текстура. Она образуется вследствие послойного отложения рудного вещества вокруг взвешенных в воде песчинок.

Оолиты представляют собой агрегаты, характерные для минералов коллоидного генезиса. Оолитовые текстуры широко распространены в рудах железорудных и марганцеворудных осадочных месторождений.

Конгломератовая текстура характеризует внутреннее строение слоя руды, состоящего из округлых галек в каком-либо цементе. Примером этой текстуры могут служить некоторые конгломератовые руды с лимонитовым цементом.

Примером брекчиевой (обломочной) текстуры в осадочных месторождениях могут служить обломочные руды железорудных месторождений или бокситовые брекчии в месторождениях Урала.

Органогенная текстура (реликтовая) в осадочных месторождениях встречается редко. Она характеризуется наличием в руде оруденелых остатков фауны (например, ожелезненные ракушечники).

Текстуры руд метаморфогенных месторождений

В месторождениях этой группы руды претерпевают изменения как в вещественном составе, так и в своих морфологических особенностях.

В условиях незначительных температур и давлений происходит частичная перекристаллизация вещества, а текстуры сохраняются как реликтовые. Например, такую текстуру имеют оолитовые гематитовые руды западного склона Урала.

При глубинном региональном метаморфизме происходит изменение не только первичного состава, но и текстуры руды, в которых первичная слоистость может и не совпадать со сланцеватостью.

Если плоскости слоистости собраны в мелкие складки, такую текстуру называют плойчатой (рис. 43). Если руды подвергались дроблению (катаклазу) и последующей цементации минеральным веществом, они обладают брекчиевой текстурой



Рис. 43. Плойчатая текстура.
0,5 натуральной величины.
Светлое — мартит; темное — кварцит.
(По К. Богдановичу).

При одностороннем давлении могут возникать полосчатые текстуры. Например, на колчеданном месторождении Раммельсберг наблюдаются развальцованные полосчатые руды.

А. Н. Заварицкий, С. Н. Иванов и другие исследователи полосчатые руды колчеданных месторождений Урала также считают вторичными, образованными под действием динамометаморфизма, при котором произошло некоторое перемещение более пластичных сульфидов в краевые части залежей.

При полной перекристаллизации вещества могут возникать руды массивной текстуры, не отличимой по внешнему виду от массивной текстуры руд эндогенных месторождений.

Классификация важнейших текстур руд

В основу классификации текстур руд, согласно А. Г. Бетехтину, положены два признака: генетический и морфологический.

По генетическому признаку текстуры руд, как и рудные месторождения, разделяются на шесть групп: магматические, контактово-метасоматические, гидротермальные, выветривания, осадочные и метаморфогенные.

По морфологическому признаку они разделяются автором на четыре группы: однородные, удлиненные, округлые и неправильные. В каждой группе рассматривается по нескольку типов. Все разобранные выше текстуры могут быть сведены в следующую таблицу (табл. 11).

В каждой из групп рассматривается несколько типов текстур, различающихся между собой по морфологическому признаку. Здесь описаны только некоторые характерные типы, на самом же деле количество рудных текстур значительно больше. При углубленном изучении руд того или иного месторождения могут быть подмечены своеобразные текстурные формы, не нашедшие пока места в приведенной классификации.

Необходимо обратить внимание на то, что в различных генетических группах текстур повторяются иногда одни и те же формы срастаний. Например, массивная текстура указана в группах магматической, контактово-метасоматической и гидротермальной. Полосчатая текстура значится в группах магматической, гидротермальной и метаморфогенной. Друзовая текстура указана в группах контактово-метасоматической, гидротермальной, выветривания и т. д.

Таким образом, форма текстурного рисунка еще недостаточна для познания его генетической сущности. Текстура есть лишь один из элементов, характеризующих строение и генезис месторождения; изучение текстуры необходимо производить совместно с изучением геологических и минералогических особенностей месторождения.

Таблица 11

Классификация важнейших текстур руд (по С.А. Вахрамееву) А.Г. Бетехтину

	Геологические (генетические) группы						
Морфологические группы	магматические	контактово-метасоматические	гидротермальные	выветривания	осадочные	метаморфогенные
Однородные (равномерные)	Массивная Вкрапленная	Массивная Вкрапленная	Массивная Вкрапленная	Пористая Порошковатая		Массивная (переотложенная)
Неоднородные: Удлиненные (плоско-вытянутые)	Полосчатая (флюктуационная)	Слоистая (реликтовая)	Полосчатая, Жильная, Линзовая, *Крустификационная*		*Слоистая* Линзовидная	*Сланцеватая* Полосчатая Реликтовая
Неоднородные: Округлые	*Нодулярная*		Кокардовая Колломорфная	Концентрически-зональная *Конкреционная* Оолитовая Почковидная	Оолитовая Конгломератовая	Реликтовая
Неоднородные: Неправильные (прочие)	*Такситовая* (шлировая) Брекчиевидная	Пятнистая *Друзовая* Брекчиевидная	Пятнистая, Друзовая, Брекчиевидная, Брекчиевая	Корковая, Жеодовая, Друзовая, Ячеистая, Сталактитовая Петельчатая Органогенная (реликтовая)	Брекчиевая (обломочная), Органогенная (реликтовая)	*Плойчатая* Брекчиевая

Примечание. Для каждой генетической группы выделены курсивом типоморфные текстуры.

3. СТРУКТУРЫ РУД

Структуры руд обычно изучаются под микроскопом. Но в том случае, если руда имеет очень крупнозернистое строение (пегматиты), изучение ее структуры производится макроскопически в штуфах. Структуры руд существенно отличаются от структур горных пород. Эти различия выражаются в следующем:

1. Структура горной породы является характерным признаком, выдерживающимся обычно на значительном протяжении.

В рудах же структура может изменяться не только в пределах рудного тела, но и в пределах штуфа и даже части полированного шлифа, попадающей в поле зрения микроскопа.

2. Сульфиды руд являются менее устойчивыми минералами, чем силикаты горных пород. Поэтому иногда происходит полная перекристаллизация руды, и многие детали ее первоначального строения остаются неясными.

3. Большое разнообразие форм рудных зерен и резко выраженная неравномерность агрегатов.

4. Явления поляризации в рудах под микроскопом выражены менее отчетливо, чем в горных породах. Поэтому для выявления структур руд часто прибегают к методике травления, обычно не применяющейся при изучении структур горных пород.

Образование твердого кристаллического вещества может происходить различно:

1) путем отложения кристаллов из газообразных продуктов возгона;

2) путем кристаллизации из жидких расплавов или растворов;

3) путем перекристаллизации в твердом состоянии ранее отложенного кристаллического вещества;

4) путем перекристаллизации ранее отложенных коллоидных масс.

Образующиеся при этих процессах рудные минералы могут в дальнейшем подвергаться изменениям, выражающимся: а) в гипогенном или супергенном замещении и б) в механических деформациях.

Все эти процессы кристаллизации, перекристаллизации и изменения руд находят свое отражение в классификации структур руд, составленной по А. Г. Бетехтину (табл. 13, стр. 207).

ОПИСАНИЕ СТРУКТУР РУД

Структуры отложения (кристаллизации)

В эту группу объединяются структуры руд, образовавшиеся вследствие процессов кристаллизации из расплавленной магмы,

из гидротермальных или холодных растворов, а также возникшие при метасоматозе вмещающих пород.

Образование этих структур обусловливается кристаллизационными свойствами подвергающегося кристаллизации вещества: способностью кристаллизации и скоростью кристаллизации.

Способность кристаллизации — это свойство вещества давать то или иное число центров кристаллизации в единицу времени.

Чем выше способность кристаллизации вещества, тем более мелкозернистый агрегат будет получаться из него в процессе кристаллизации, и наоборот.

Скорость кристаллизации — это линейная скорость роста кристаллов в единицу времени.

Чем выше скорость кристаллизации, тем быстрее будут расти кристаллы и тем менее совершенны будут их кристаллографические формы. При незначительной скорости кристаллизации будут возникать правильные по форме и одинаковые по размерам кристаллы.

Кристаллизация веществ также во многом зависит от температуры и давления. Тамман показал, что способность кристаллизации и скорость кристаллизации зависят от степени переохлаждения жидкости: чем сильнее переохлаждена жидкость к моменту начала кристаллизации ее, тем большее число центров кристаллизации возникает в ней и тем большая скорость роста зародышей имеет место. При более сильных переохлаждениях эти свойства, достигнув максимума, начинают спадать (рис. 44).

Поэтому при незначительном переохлаждении жидкости будут иметь место явно кристаллически-зернистые агрегаты. Области, отвечающие максимуму кривых способности кристаллизации и скорости кристаллизации, будут характеризоваться тонкозернистыми или даже скрытокристаллическими структурами. Очень же большое переохлаждение вещества будет отвечать области гелей.

Подобная зависимость кристаллизационных свойств минералов наблюдается и от степени пересыщения растворов. Слабо пересыщенные, разведенные растворы дают крупные, совершенные кристаллы; более пересыщенные — мелкие кристаллы и тонкозернистые агрегаты; при резком пересыщении могут образовываться коллоиды.

Давление, по сравнению с температурой, играет меньшую, но все же существенную роль в процессе кристаллизации.

Повышение давления способствует образованию кристаллов; такова его роль, например, при перекристаллизации коллоидов. При понижении давления происходит удаление газо-

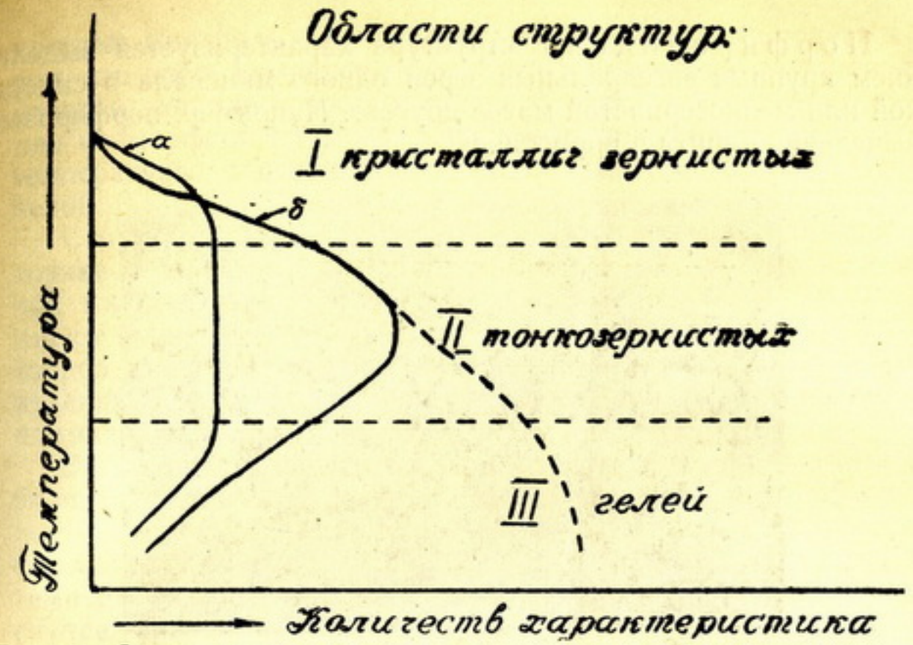


Рис. 44. Схема зависимости кристаллизационных свойств минералов от степени переохлаждения или пересыщения: а — скорость кристаллизации; б — способность кристаллизации.
(По А. Г. Бетехтину).

образных компонентов из раствора, что ведет к образованию скрытокристаллических или коллоидных масс.

Среди структур отложения различаются следующие типы.

Панидиоморфнозернистая структура—зерна минералов имеют весьма совершенную кристаллическую форму: эвгедральную или идиоморфную. В рудах эта структура встречается редко; в качестве примера можно указать на рассеянную вкрапленность хромита в дуните.

Гипидиоморфнозернистая структура — минералы с частично развитыми кристаллическими гранями имеют субгедральную или гипидиоморфную форму. Эту структуру можно часто наблюдать в рудах хромитовых и колчеданных месторождений (рис. 45).

Аллотриоморфнозернистая структура — неправильные по форме минералы, не имеющие кристаллических граней; форма зерен носит название ангедральной или ксеноморфной. Примеры этой структуры обычны в сульфидных рудах.

Как разновидность аллотриоморфнозернистой структуры следует отметить сидеронитовую структуру, наблюдающуюся в хромитовых и титано-магнетитовых рудах. В них рудный минерал (хромит, магнетит, ильменит) кристаллизуется позже силиката (оливина, пироксена) и образует неправильные, ксеноморфные выделения в промежутках зерен силиката, как бы цементируя последний.

Порфировидная структура характеризуется выделением крупных эвгедральных зерен одного минерала в сплошной или мелкозернистой массе другого. Например, порфировые выделения пирита в пирротине.

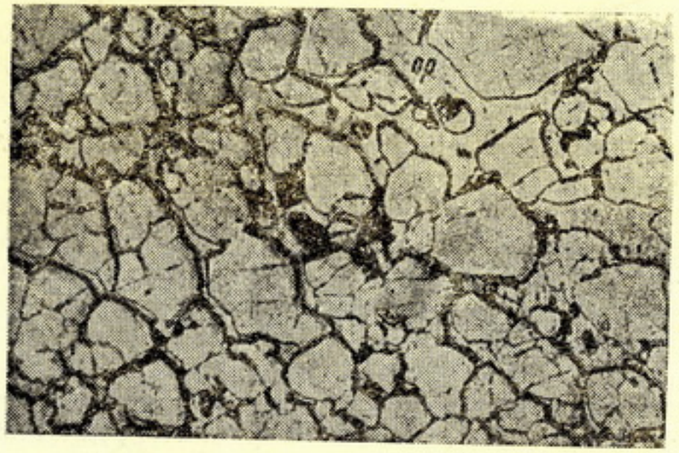


Рис. 45. Гипидиоморфнозернистая структура колчеданной руды.
$Р_у$ — пирит; $С_р$ — халькопирит.
Увеличение 20×. (По А. Г. Бетехтину).

Пойкилитовая структура характеризуется включениями мелких зернышек одного минерала в массе крупных кристаллов другого. Распределение этих мелких включений не подчиняется какой-либо закономерности. Примером пойкилитовой структуры может служить колчеданная руда, в которой в крупных кристаллах пирита наблюдаются мелкие зернышки халькопирита, сфалерита или теннантита.

К этому же типу можно отнести включения мельчайших кристаллов магнетита в сфалерите, с трудом различимые под микроскопом. Такая структура характерна для цинковых руд колчеданных месторождений Урала.

Скрытокристаллическая и гелевая структуры образуются при весьма значительном переохлаждении или при резком пересыщении рудоносных растворов, из которых выпадают скрытокристаллические и даже коллоидные массы. При последующих процессах метаморфизма коллоиды легко подвергаются перекристаллизации, а поэтому гелевые структуры редки в рудах. Примером может служить гелевая структура аурипигмента.

Структура распада твердых растворов

Образование этого типа структур происходит вследствие изменения физико-химических условий, существовавших в момент отложения руды. В новых условиях первоначальные сложные соединения становятся неустойчивыми и распадаются на более

простые минералы. По существу этот процесс заключается в том, что часть компонентов, которые в момент образования кристаллов входили в состав минерала в виде твердого раствора или изоморфной примеси, в процессе дальнейшего понижения температуры обособились в виде самостоятельных соединений.

Структуры распада твердых растворов представляют собой тонкие и закономерные прорастания минералов, наблюдаемые под микроскопом при сильных увеличениях. Эти структуры имеют большой научный интерес, так как распад твердых растворов для известных веществ происходит при некоторых определенных температурах, которые могут быть установлены с помощью экспериментов.

Экспериментальные исследования показывают, что для образования структур распада твердых растворов необходимо постепенное падение температуры уже после того, как образовалось твердое кристаллическое вещество. Резкое понижение температуры приводит к закалке твердого раствора; в этом случае при очень сильных увеличениях будет наблюдаться вполне однородное вещество.

В общем случае при образовании руд со структурами распада твердого раствора при охлаждении какого-либо рудного расплава можно выделить три стадии состояния вещества:

1) температура выше точки плавления — однородный жидкий расплав;

2) температура в пределах от точки плавления до точки распада — однородный твердый раствор;

3) температура ниже точки распада — тонкие закономерные сростки минералов.

Поскольку распад твердого раствора какой-либо пары минералов происходит в известном интервале температур, то нахождение этих структур в рудах может служить объективным критерием для суждения о температуре их образования. Следовательно, это будут своего рода структурно-минералогические термометры.

Закономерные срастания, напоминающие по внешнему виду структуры распада твердых растворов, могут образовываться и при других процессах, например при замещении. Поэтому очень важно знать критерии для отличия структур распада. Из таких отличительных признаков необходимо отметить:

1) включенные минералы, обладающие резкими, ровными границами;

2) уменьшение ширины пластинок в местах пересечения или соединения их в решетке;

3) включения минералов, обычно не связанные с границами зерен, трещинками и другими образованиями, способствующими замещению;

4) включения, часто представляющие собой отдельные кри-

сталлы в противоположность прожилкам, состоящим из многих кристаллов.

Ниже дается краткая характеристика важнейших структур распада твердых растворов.

Петельчатая структура образуется в том случае, когда один из минералов обособляется по периферии другого в виде тонких изогнутых жилок. Примером могут служить пирротино-пентландитовые руды Седбери. В этих рудах, кроме сравнительно крупных выделений пентландита, наблюдаются еще мельчайшие его выделения, равномерно распределенные в массе пирротина.

Температура распада твердого раствора пирротина и пентландита экспериментально определена Хевиттом в 425°.

Решетчатая структура возникает в том случае, когда один из минералов подчиняется кристаллографическим направлениям другого. Например, в титано-магнетитовых рудах при сильном увеличении (иммерсия 95× или 1/12а) можно наблюдать тончайшую решетку пластиночек ильменита, располагающегося по октаэдрической спайности магнетита. Распад твердого раствора магнетита и ильменита, по Рамдору, происходит при температуре 800°.

Другим примером является решетчатая структура распада борнита-халькопирита (рис. 46). Здесь вростки халькопирита располагаются по неясной октаэдрической спайности борнита в виде прямоугольной, или комбинированной треугольной, или шестиугольной решеток в зависимости от положения разреза. Температура распада твердого раствора борнита и халькопирита, по исследованию Д. П. Григорьева, зависит от количественных соотношений составляющих минералов: установлено, что при содержании халькопирита в руде 6% распад наступает при 320°, а при содержании его 12% — при 430°.

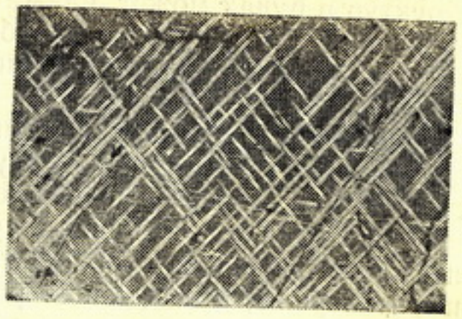


Рис. 46. Решетчатая структура распада твердого раствора борнита и халькопирита.
Борнит — основная серая масса; халькопирит — белые, тонкие пластинки. Увеличение 200×.

Пластинчатая структура характеризуется расположением пластинчатых вростков какого-либо минерала преимущественно в одном направлении в массе другого. Так, напри-

мер, в рудах одного из титано-магнетитовых месторождений при сильном увеличении (иммерсия 95× или 1/7а) наблюдаются тончайшие вростки пластинок гематита в зернах ильменита. Рамдор установил две генерации таких пластинчатых вростков гематита в ильмените и определил для одной из них температуру распада в 700°, а для другой — 500—600°.

Весьма интересны более крупные пластинчатые выделения кубанита в халькопирите. Они известны для магматических медно-никелевых месторождений, скарновых месторождений меди и др. Температура распада твердого раствора халькопирита и кубанита экспериментально определена Швартцем в 450°.

Эмульсионная структура характеризуется выделением мелких и мельчайших каплевидных зерен одного минерала в основной массе другого. При постепенном охлаждении твердого раствора вначале происходит образование грубодисперсных частиц, которые потом, в результате более резкого понижения температуры, фиксируются в виде эмульсионных равномерно распределенных частиц.

В качестве примеров эмульсионной структуры распада твердого раствора можно указать на эмульсию халькопирита в сфалерите, пирротина в сфалерите (рис. 47), халькопирита в станнине, осмистого иридия в платине.

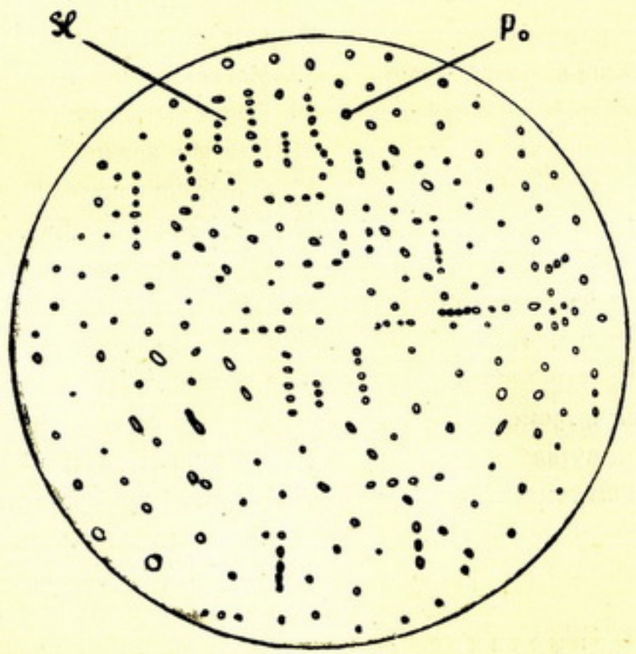


Рис. 47. Эмульсионная структура распада твердого раствора пирротина в сфалерите.
Белое — пирротин; темное — сфалерит. Увеличение 265×.

Если температура падает медленно и постепенно, произойдет миграция частиц в кристаллической решетке, что поведет к слиянию частиц и образованию пластиночек и жилочек, развивающихся по направлению спайности включенного минерала (рис. 48). В результате будет формироваться структура, переходная к пластической или решетчатой, которая очень часто наблюдается в рудах.

Руды, обладающие структурами распада твердых растворов, представляют собой настолько мелкие и тесные срастания, что они не могут быть разделены путем механического обогащения.

Обстоятельная исследовательская работа, посвященная изучению структур распада твердых растворов, была произведена Г. Швартцем (Schwartz G. Progress in the study of exsolution in ore minerals. Econ. Geol. № 5, 1942).

Ниже приведен список минералов, дающих структуры распада твердых растворов по Швартцу.

1. Алабандин-пирротин
2. Висмутин-аргентит
3. Висмутин-эмплекит
4. Борнит-халькозин
5. Борнит-халькопирит*
6. Борнит-линнеит
7. Касситерит-танталит
8. Халькозин-штромейерит
9. Халькопирит-кубанит*
10. Халькопирит-валлериит
11. Халькопирит-пирротин
12. Хромит-ильменит
13. Кубанит-пирротин
14. Фаматинит-халькозин
15. Галенит-пираргирит
16. Галенит-тетраэдрит
17. Галенит-штромейерит?
18. Гематит-рутил*
19. Ильменит-гематит*
20. Ильменит-пирофанит
21. Ильменит-гематит-рутил
22. Якобсит-гаусманит
23. Линнеит-миллерит
24. Магнетит-гематит
25. Магнетит-ильменит
26. Магнетит-пирофанит
27. Магнетит-рутил
28. Магнетит-шпинель
29. Магнетит-цинкит
30. Периклаз-магнезит
31. Платина-иридий
32. Пирротин-пентландит*
33. Серебро-дискразит
34. Сфалерит-халькопирит
35. Сфалерит-пирротин
36. Станнин-халькопирит
37. Станнин-кубанит
38. Станнин-сфалерит*
39. Станнин-тетраэдрит
40. Штромейерит-аргентит?
41. Танталорутил-ильменит
42. Теннантит-халькопирит

Примечание. Минерал основной массы написан первым, минерал вростков — вторым. Структуры, в которых каждый из минералов может быть и в виде основной массы и в виде вростков, отмечены звездочкой. В сомнительных случаях ставится вопросительный знак.



Рис. 48. Структура распада твердого раствора сфалерита и халькопирита. Пластинчатые и точечные обособления халькопирита (белые) располагаются по спайности сфалерита (темный). Увеличение 360×.

Структуры раскристаллизации коллоидов

Коллоидные вещества являются недостаточно устойчивыми в природе: с течением времени и при некоторых условиях они переходят в вещества кристаллические.

Согласно Ф. Чухрову, раскристаллизации коллоидов способствуют:

1. Повышение давления.
2. Повышение температуры в течение длительного времени. Например, при температуре 250—300° из геля кремнезема удалось получить кристаллы кварца.
3. Длительные механические сотрясения, вызывающие перекристаллизацию некоторых веществ. Так, из геля гидроокиси железа этим путем была получена смесь гематита и лепидокрокита.
4. Лучистая энергия радиоактивного и ультрафиолетового излучений.
5. Кристаллизационные свойства вещества. Здесь, кроме рассмотренных ранее понятий (способности кристаллизации и скорости кристаллизации), оказывает влияние еще «сила кристаллизации», т. е. способность новообразующегося минерала развивать собственные кристаллографические формы в условиях стесненной среды.

В процессе преобразования вещества коллоида в кристаллическое состояние возникает ряд промежуточных форм. Те минералы, которые получаются из гелей при переходе в кристаллическое состояние, называют м е т а к о л л о и д а м и.

В табл. 12 по Ф. В. Чухрову приведены некоторые коллоиды и образующиеся из них метаколлоиды.

Таблица 12

Коллоиды	Метаколлоиды
Опал $SiO_2 . nH_2O$	Халцедон, кварц SiO_2
Гидротроилит $FeS . nH_2O$	Пирит, марказит FeS_2, пирротин $Fe_n S_{n+1}$
Робертсонит $ZnS . nH_2O$	Вуртцит, сфалерит ZnS
Лимонит $FeO . OH . 3H_2O$	Гётит $FeO . OH$, гематит Fe_2O_3
Спорогелит $Al_2O_3 . H_2O$	Диаспор (бёмит) $Al_2O_3 . H_2O$

Из таблицы видно, что некоторые из метаколлоидов отличаются от коллоидов пониженным содержанием или отсутствием воды.

Раскристаллизация гелей выражается по существу в возникновении кристаллизационных центров и в последующей перегруппировке дисперсной фазы коллоида. Формы возникающих при этом минералов зависят как от скорости кристаллизации, так и от пространственного распределения центров кристаллизации.

Из гелей простого состава, дающих в результате раскристаллизации мономинеральные массы, нередко образуются радиальнолучистые агрегаты.

Остановимся кратко на некоторых типах структур перекристаллизации коллоидов.

Сферолитовая структура характеризуется скоплением мелких округлых выделений радиальнолучистого строения. Возникновение радиальнолучистого строения Ф. Чухров объясняет следующим образом.

Кристаллы, зародыши которых близко расположены друг от друга, могут расти лишь до момента соприкосновения кристаллических неделимых; в дальнейшем их рост может происходить лишь в направлении, перпендикулярном плоскости расположения зародышей, т. е. по радиусам и лучам от центра кристаллизации.

Сферолитовые и радиальнолучистые структуры наблюдаются у следующих минералов: пирита (рис. 49), марказита, вуртцита, аурипигмента, пирротина, гематита, гётита, псиломелана, малахита, смитсонита и некоторых других.

Гранобластическая структура образуется при перекристаллизации геля и характеризуется скоплением зерен, имеющих округлые или угловатые очертания.

Порфиробластическая структура характеризуется обособлением крупных зерен минералов среди основной массы мелких.

Пойкилобластическая структура характеризуется наличием крупных ксенобластических индивидов одного минерала, содержащих мелкие идиобласты другого минерала.

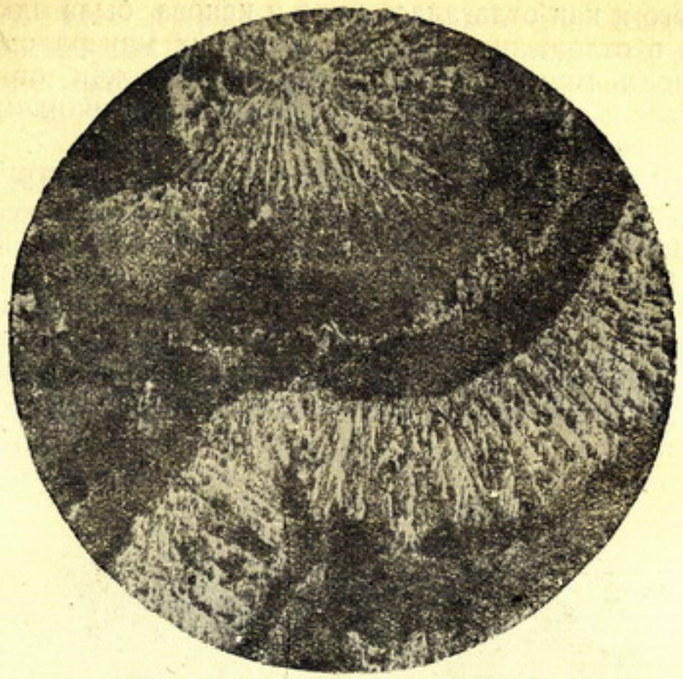


Рис. 49. Радиальнолучистое строение пирита. Увеличение 50×.

Структуры замещения (коррозионные)

Структуры замещения имеют весьма широкое распространение в рудах как эндогенных, так и экзогенных месторождений. Процесс замещения может проявляться как при первичном отложении руд на месте вмещающих пород (замещение пород рудой), так и после первоначального формирования руды, за счет изменения ранее отложенных минералов (замещение руды рудой).

Замещение определяется как растворение одного или группы минералов при одновременном отложении в этом месте другого минерала или группы их. Растворение и отложение протекают совместно, процесс не сопровождается изменением объема.

Если замещающий минерал принимает присущие ему кристаллические ограничения, то его называют метакристом

В принятой нами классификации к структурам замещения относятся лишь минеральные срастания, которые обладают ясно выраженным узором замещения или разъедания (коррозии). Не в каждом месторождении, образовавшемся путем замещения, наблюдаются описываемые структуры. Например, в контактово-метасоматических месторождениях иногда наблюдаются лишь структуры отложения (кристаллизации), а от структур замещения не остается и следа.

Изучение структур замещения в рудах имеет большое генетическое значение. Это дает возможность иногда установить,

за счет чего и как отлагалась руда и какова была последовательность в отложении рудных и жильных минералов. Последовательность минералообразования зависит как от состава рудных масс и вмещающих пород, так и от физико-химических условий течения процесса.

Рассмотрим наиболее характерные примеры структур из группы замещения.

Структура разъедания (коррозии) характеризуется проникновением одного минерала в другой, в результате чего замещаемый минерал образует очень неправильные по форме зерна с неровными, зазубренными краями и бухтоподобными стенками. Эта структура имеет большое распространение в рудах сульфидных месторождений (рис. 50).



Рис. 50. Коррозионная структура замещения пирита сфалеритом.
Белое — пирит; серое — сфалерит.
Увеличение 40×.
(По С. Иванову).

В начальные стадии замещения корродированные минералы мало изменяют свою первоначальную форму и часто обладают изометричными выпуклыми или вогнутыми очертаниями. Вопрос о последовательности выделения минералов в этом случае решается легко. При глубоко зашедшем процессе замещения корродированный минерал принимает крайне неправильную форму, напоминающую ксеноморфное зерно. Порядок выделения минералов в этом случае определить трудно. Решить этот вопрос иногда удается по секущим прожилкам, по замещению вдоль границ зерен и по спайности, по густораспоженным остаткам замещения и другим признакам.

Структура пересечений характеризуется наличием жилок минерала замещающего в минерале замещаемом. Эти жилки обладают обычно неправильно ограниченными стенками, которые в свою очередь часто непараллельны между собой.

Структура остатков от замещения характеризуется содержанием в разъеденном зерне реликтовых масс, обычно скоцентрированных в середине зерна. Ориентировка этих остатков (реликтов) сохраняется общая.

Скелетная структура встречается редко. Она образуется в тех случаях, когда процесс замещения минерала идет от центра к периферии; наружные грани кристалла при этом сохраняются, образуя кристаллический скелет зерна. Эта структура характерна для пирита и арсенопирита, реже для жильных минералов (рис. 51).



Рис. 51. Скелетная структура замещения пирита сфалеритом.
Белое — пирит; серое — сфалерит.
Увеличение 60×.

Графическая структура характеризуется тесным взаимопрорастанием двух минералов, один из которых образуется за счет замещения другого. Например, срастания борнита и халькозина, галенита и аргентита и др.

Решетчатая структура замещения получается в случае проникновения минерализованного раствора вдоль пересекающихся направлений спайности замещаемого минерала. В отличие от решетчатой структуры распада твердого раство-

ра пластинки замещающего минерала распределяются неравномерно, приурочиваясь к трещинам и границам зерен; кроме того, здесь не наблюдается сужения пересекающихся пластиночек и полосок. Примером ее может служить структура замещения магнетита гематитом, образующаяся в мартитовых рудах железорудных месторождений (рис. 52).

Цементная структура является результатом замещения цемента песчаников сульфидами рудоносных растворов. Особенно благоприятны для замещения известковистые песчаники, на месте карбонатного цемента которых отлагаются сульфиды. В медистых песчаниках Казахстана наблюдаются мелкие изометричные зерна кварца, сцементированные борнитом и халькопиритом.

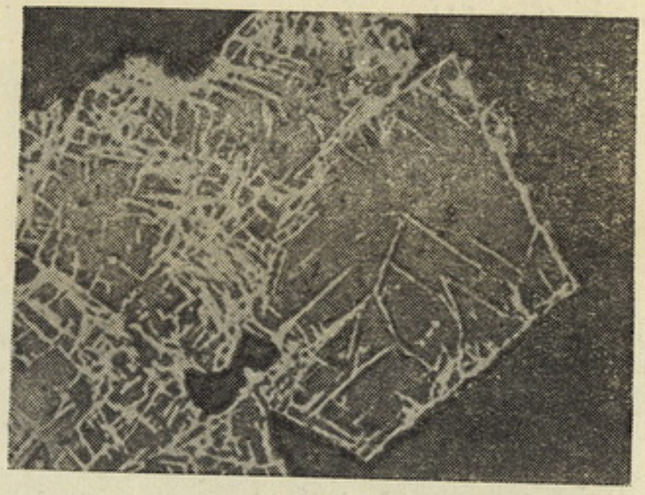


Рис. 52. Решетчатая структура замещения магнетита гематитом. В отличие от решетчатой структуры распада гематит приурочен к трещинкам и границам зерен.
1 — магнетит; 2 — гематит: 3 — нерудный минерал.
Увеличение 265×. (По В. Глазковскому).

Структуры давления (метаморфические)

Под влиянием механических деформаций и, вероятно, при повышенной температуре происходит существенное изменение руд. Сульфиды и некоторые окислы, являющиеся главными составляющими минералами руд, представляют собой малоустойчивые образования, легко подвергающиеся молекулярным перегруппировкам, чем руды существенно отличаются от горных пород, сложенных относительно стойкими силикатами.

Результат механической деформации в рудах в значительной степени зависит от величины давления и от свойств минерала, подвергающегося деформации. Хрупкие минералы растрескиваются и дробятся, мягкие и пластичные изгибаются и сминаются — они как бы приспосабливаются к новым условиям.

Если метаморфизм достигает большой силы, то происходит полная или частичная перекристаллизация руды с изменением не только ее структуры, но и минералогического состава. В таких нацело перекристаллизованных рудах часто не сохраняется никаких следов, указывающих на условия их первичного формирования.

Таким образом, понятие о структурах давления может иметь очень широкий смысл и применяться к рудам различных генетических групп, в разной степени подвергшихся метаморфизму.

Структуры руд описываемой группы разделяются на следующие три типа.

Структуры дробления (катакластические) характерны для твердых и хрупких минералов, таких, как пирит, арсенопирит, хромит, касситерит и др. В результате дробления появляются трещины и остроугольные осколки минералов (рис. 53). Иногда в результате дробления образуются более или менее одинаковые по размерам осколки (гранокластическая структура). Иногда же крупные трещиноватые зерна какого-либо хрупкого минерала погружаются в мелкозернистую массу, состоящую из мелких осколков этого же минерала (порфирокластическая структура).

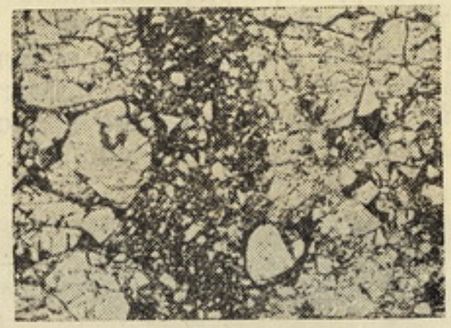


Рис. 53. Структура дробления хромита.
Белое — хромит; черное — нерудные минералы.
Увеличение 20×.

Структуры смятия образуются в результате действия давления на мягкие и пластинчатые минералы. Так, например, в сфалерите и халькопирите после травления выявляются изогнутые двойниковые полоски или своеобразные зоны смятия. В галените структура смятия прекрасно видна и без травления, она выделяется вследствие весьма совершенной спайности этого минерала. Структуры смятия для стибнита и молибденита хорошо наблюдаются в поляризованном свете при скрещенных николях, они выражаются обычно в сильном изгибании двойниковых полосок.

Структуры перекристаллизации образуются в результате более интенсивного метаморфизма (давление и

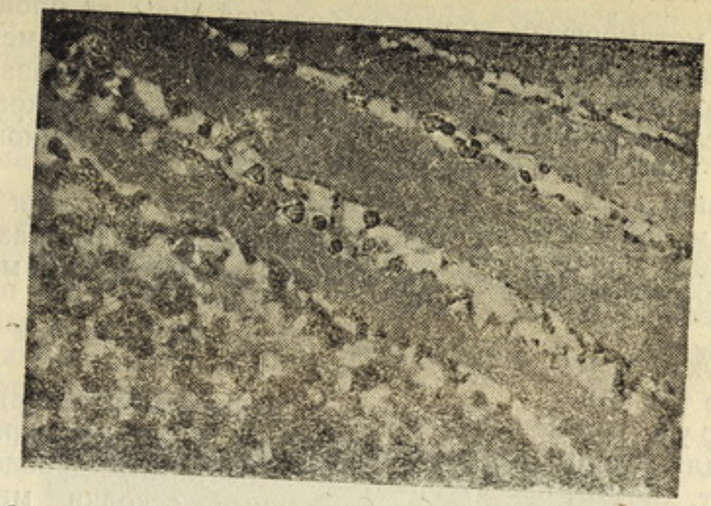


Рис. 54. Структура перекристаллизации крупнозернистого антимонита (1) в мелкозернистый (2), наблюдаемая в поляризованном свете. Увеличение 75×.

(По А. Г. Бетехтину).

температура). Они, вероятно, имеют широкое распространение в рудах, но наблюдаются только в редких благоприятных случаях. Так, например, перекристаллизация крупнозернистого антимонита в тонкозернистый наблюдается под микроскопом в поляризованном свете в виде узких параллельных полосок (рис. 54). Т. Н. Шадлун описывает и иллюстрирует микрофотографией случай перекристаллизации колломорфного пирита в пирит кристаллически-зернистый (рис. 55). При структурном



Рис. 55. Структура перекристаллизации колломорфного пирита (серое) в кристаллически-зернистый пирит (белое). Увеличение 100×.

(По Т. Н. Шадлун).

травлении халькопирита и сфалерита нередко выявляется чередование крупнозернистых и мелкозернистых (тонкозернистых) агрегатов, причем образование последних происходит, вероятно, за счет перекристаллизации первых.

Таблица 13

Классификация важнейших структур руд

I группа—структуры кристаллизации	II группа—структуры распада твердых растворов	III группа—структуры перекристаллизации (коллоидов)	IV группа—структуры коррозионные	V группа—структуры давления
1. Панидиоморфнозернистая	1. Петельчатая	*1. Сферолитовая и радиальнолучистая*	*1. Разъедания*	*1. Дробления*
2. Гипидиоморфнозернистая	*2. Решетчатая*	*2. Гранобластическая*	*2. Пересечений*	2. Смятия
3. Аллотриоморфнозернистая	3. Пластинчатая	3. Порфиробластическая	*3. Остатков от замещения*	3. Перекристаллизации
4. Сидеронитовая	*4. Эмульсионная*	4. Пойкилобластическая	4. Скелетная	
5. Порфировидная			5. Графическая	
6. Пойкилитовая			6. Решетчатая	
7. Скрытокристаллическая и гелевая			7. Цементная	

Примечание. Курсивом выделены структурные типы, имеющие максимальное распространение.

4. СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРЕН

В ряде случаев структуры руд непосредственно под микроскопом наблюдать невозможно. Это объясняется тем, что иногда зерна минерального агрегата тесно соприкасаются и тогда границы между ними при полировке затушевываются. Кроме того, структуры могут быть не обнаружены из-за аморфной пленки, которая получается при процессе полирования и покрывает тонким слоем поверхность минералов; аморфный материал нередко заполняет и границы между отдельными зернами.

В таких случаях структура руды, неразличимая под микроскопом в обыкновенном свете, иногда выступает в поляризованном свете при скрещенных николях. Но в большинстве случаев и поляризованный свет не выявляет структуры, так как часть рудных минералов являются слабо анизотропными и имеется большое количество изотропных минералов. Поэтому

более надежным средством для выявления таких скрытых структур является травление.

Реактив, выявляющий скрытую, или так называемую внутреннюю, структуру, прежде всего растворяет аморфную пленку и материал, выполняющий трещинки, после чего ясно выступают *границы между отдельными зернами*. Дальнейшее действие реактива связано уже с векториальностью минеральных зерен. Различно ориентированные в кристаллографическом направлении срезы минералов травятся реактивом с различной скоростью. Поэтому после травления в течение известного времени одни зерна в полированном шлифе протравятся сильно и будут выглядеть под микроскопом темными, а другие протравятся слабо и будут казаться светлыми. Это выявит *структуры агрегатов*, рассмотренные нами в предыдущей главе.

Действие реактива на отдельные зерна минералов выявляет неоднородность их строения.

Строение кристаллического зерна обусловливается наличием двойников, иногда полисинтетических, трещин спайности и зонального строения в пределах отдельного зерна минерала. Рассмотрению строения кристаллических зерен и уделяется основное внимание в настоящей главе.

Метод травления, применяемый для выявления внутренних структур, несколько отличен от метода диагностического травления. В первом случае протравливают более значительные площади минерала или путем наложения отдельных крупных капель реактива, или путем сплошного травления всей поверхности полированного шлифа. При этом время действия реактива не постоянно, как при диагностическом травлении (1 мин.); в некоторых случаях для выявления структуры бывает достаточно 5—10 сек., в других же случаях травят несколько минут. Средства травления для выявления внутренних структур очень разнообразны; определенного стандартного набора реактивов не существует; для многих минералов подобраны специальные травители.

Кроме жидких реактивов, для травления иногда употребляют реактивы газообразные, например пары брома, пары хлора (от царской водки) и др. В этом случае полированный шлиф помещают на некоторое время над отверстием флакона, содержащего соответствующий реактив. В некоторых случаях применяется электролитическое травление, которое производят следующим образом. На полированный шлиф помещают каплю кислоты (50%-ный раствор HCl или H_2SO_4); у основания капли стальной иглой, соединенной с положительным полюсом батарейки (от карманного фонарика), касаются минерала; отрицательный полюс соединяется с платиновой проволочкой, которой касаются вершины капли.

Структурное травление обычно выявляет одновременно и внутреннюю структуру агрегата и строение кристаллического

зерна. Для наблюдения структур агрегатов при структурном травлении употребляются слабые увеличения—объективы 3,7× (№ 1) или 9× (№ 3), а для структур отдельных зерен сильные—объективы 21×, 40× (№ 5, 6).

Для выявления хорошего структурного рисунка требуется соблюдение трех основных условий:

1. Поверхность минерала, подвергающегося травлению, должна быть тщательно доведена на тонком минутнике (120- и 240-минутник) и затем отполирована до зеркального блеска крокусом или магнезией. В противном случае при структурном травлении выявятся заполированные борозды и царапины, которые могут затемнить и исказить структурный рисунок.

Далеко не в каждом произвольном участке полированного шлифа имеется показательная внутренняя структура, которую целесообразно выявить исследователю. Но так как эту интересную структуру мы не можем в большинстве случаев видеть до травления, то ее приходится искать путем травления многих участков полированных шлифов.

3. Определение экспозиции при структурном травлении имеет, как и в фотографии, большое значение. Следует путем опыта найти требуемое время травления.

При продолжительном травлении очень разбавленными реактивами могут возникнуть так называемые фигуры травления, похожие на те, которые возникают на естественных гранях кристаллов. Чрезмерно концентрированные растворы могут вызвать образование пятнистых или петельчатых рисунков даже в пределах одного кристаллического зерна.

Если среди испытуемого минерала находятся включения или прожилки другого минерала, весьма легко травящегося, то вокруг этих включений испытуемый минерал может не протравиться.

Если в массе реактива к полированной поверхности минерала пристанут газовые пузырьки, то минерал под ними не протравится, и можно сделать ложный вывод об округлых «включениях» нетравящегося минерала.

Изучение внутренних структур руд преследует те же цели, что и изучение текстур и структур руд; оно полезно в практике механического обогащения руд и облегчает изучение генезиса месторождений.

Например, путем структурного травления можно выявить истинные размеры зерен минералов, тесно соприкасающихся между собой. Структурное травление иногда выявляет в рудах механические деформации, а также реликты первоначального колломорфного строения позже перекристаллизованных минеральных агрегатов. Зональное строение многих минералов позволяет судить об условиях их отложения из растворов. Изучение двойников (например, в сфалерите) позволяет иногда

определить пространственную ориентировку рудных зерен, возникшую под влиянием стресса.

Ниже приводится краткое описание строения кристаллических зерен некоторых рудных минералов и указываются средства их выявления.

ОПИСАНИЕ СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРЕН ОТДЕЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ[1]

1. Галенит. Внутренняя структура галенита, как минерала изотропного, выявляется только травлением. Для этой цели употребляются следующие реактивы:

1) HCl 1 : 1 — электролитическое травление, ток 4—6 в.

2) 75—85%-ный раствор HNO_3 + 15—25%-ный раствор спирта (96—99°); раствор должен быть свежеприготовленным; время травления 2—10 сек.

3) HNO_3 1 : 1; время травления 20—30 сек.

Травление происходит более интенсивно по (111), чем по (100).

В результате травления выявляется, кроме зернистой структуры агрегата, зональное строение отдельных зерен (рис. 56), а также включения аргентита, самородного серебра и других минералов, обычно невидимых до травления.

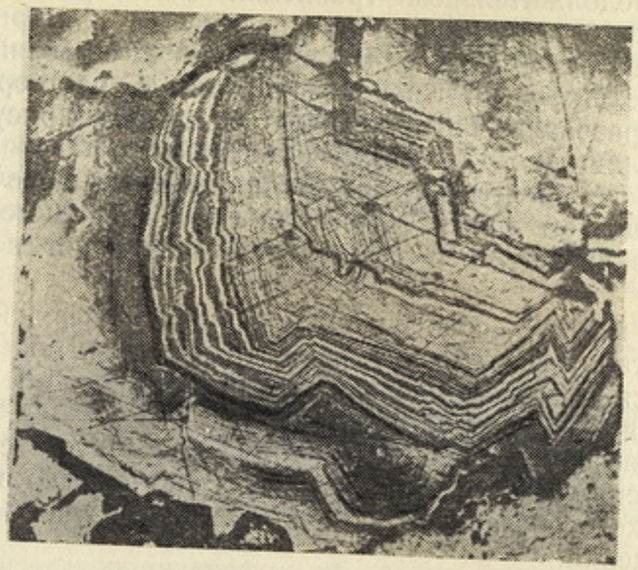


Рис. 56. Зональное строение галенита, выявленное травлением HNO_3 1 : 1. Увеличение 50×. (По Г. Шнейдерхену).

Сфалерит. Внутреннюю структуру сфалерита иногда можно заметить под микроскопом и без травления, но ее видно очень плохо. Для структурного травления сфалерита применяются следующие реактивы:

[1] Минералы расположены в порядке обычной классификации: сульфиды, сульфосоли, бисульфиды, окислы.

1. Кислый раствор перманганата. Этот реактив служит для структурного травления многих минералов. Способ его приготовления следующий: заготавливаются в отдельных флаконах $KMnO_4$ (насыщенный раствор) и H_2SO_4 (1 : 5); перед употреблением смешивают на стекле каплю того и другого. Время травления 10—30 сек. Коричневый осадок, получающийся на минерале, смывают водой или стирают ваткой.

2. Царская водка позволяет очень быстро выявить структуру сфалерита следующим образом: полированный шлиф подносится на несколько секунд к отверстию склянки с царской водкой и затем сразу же просматривается под микроскопом.

3. HI (концентрированная) является прекрасным протравителем для сфалерита.

В результате травления обнаруживаются:

1) двойники по (111) и (211), часто полисинтетические сростания (рис. 57);

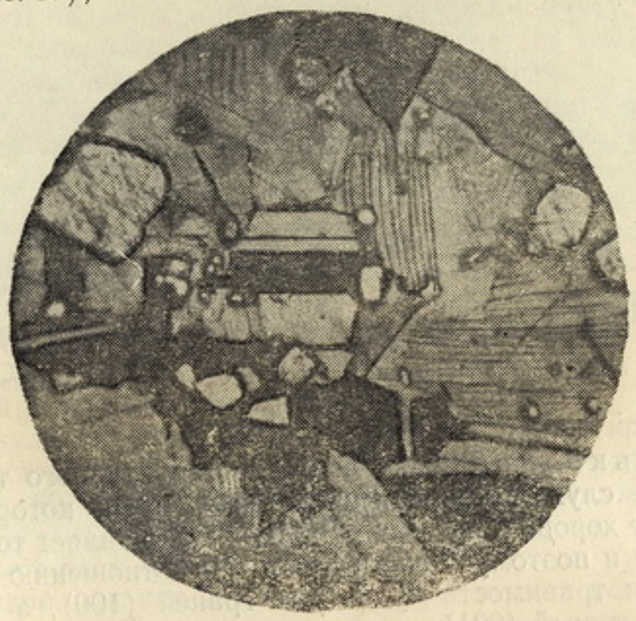


Рис. 57. Двойники и спайность сфалерита, выявленные травлением $KMnO_4 + H_2SO_4$. Увеличение 65×.

2) различные микродеформации (рис. 58);

3) спайность || (110) (выявляется очень хорошо);

4) зональное строение (выявляется редко).

3. Антимонит. Сильно анизотропный минерал, и поэтому его внутреннюю структуру можно часто наблюдать в поляризованном свете при скрещенных николях.

Лучший реактив для структурного травления — концентрированная KOH; через 1—3 сек. каплю и осадок удаляют и наблюдают результаты (не перетравливать!).

Чаще всего выявляются довольно крупные двойники, выступающие на плоскостях ⊥ (010)—(001), и реже тонкие пла-

стинчатые сростки. Зональное строение зерен антимонита является широко распространенным. Выявившаяся спайность по (010) наблюдается обычно в виде одной системы коротких жирных линий. Получить хорошее травление антимонита нелегко, так как мешают абразивные борозды и трещины, резко выступающие при травлении. Поэтому при изготовлении полированных шлифов антимонита для травления следует пользоваться лишь мелкозернистыми абразивами и соблюдать все правила предосторожности.



Рис. 58. Двойники и микросброс в сфалерите, выявленные травлением в парах царской водки.
Вдоль линии микросбросов наблюдается перекристаллизация сфалерита в мелкозернистый агрегат.
Увеличение 150×.

4. Халькозин. Реактивом для структурного травления халькозина служит концентрированная HNO_3, которая в 3—10 сек. дает хороший результат. KCN 1 : 5 выявляет только границы зерен и поэтому менее удобен. По отношению к HNO_3 наибольшая травимость будет для граней (100), а наименьшая — для граней (001).

В результате травления выявляется структура агрегата и в пределах отдельных зерен — спайность.

Наиболее совершенная спайность ‖ (001), ясная ‖ (010) и неясная ‖ (100). Вытравливаются одна, две или три системы различно направленных линий.

5. Пирротин является сильно анизотропным минералом, и нередко его внутренняя структура выступает в поляризованном свете при скрещенных николях. Кроме того, пирротин в полированных шлифах быстро окисляется на воздухе, и это также позволяет иногда различать его структуру.

Реактивы для структурного травления пирротина следующие:

1) HCl 1 : 1 — электролитическое травление; время действия 10—30 сек.

2) Иодистоводородная кислота HI.

В результате можно наблюдать, кроме структуры агрегата, двойники и деформации.

Зональное строение зерен и спайность очень редки.

Для пирротина различают две полиморфные модификации:

а) гексагональную, устойчивую при температуре ниже 138° и

б) ромбическую, устойчивую при температуре выше 138°.

Известные в природе образования пирротина, по данным рентгенометрических исследований, обычно принадлежат к гексагональной модификации.

Переход первоначальной ромбической модификации в гексагональную выражается появлением не совсем правильного пластинчатого внутреннего строения пирротиновых зерен. А. Г. Бетехтин предполагает, что при температуре выше 280° пирротин переходит в минерал, близкий к троилиту, что выражается его способностью легко протравливаться HCl и HNO_3 с выявлением сложных двойниковых прорастаний.

6. Халькопирит. Структуру халькопирита можно выявить лишь травлением, что достигается применением следующих реактивов:

1) $KMnO_4$ (насыщенный раствор) + KOH (40%-ный), т. е. щелочной раствор перманганата, свежеизготовленный; время травления 1—5 мин. Травление довольно слабое.

2) HNO_3 концентрированная + $KClO_3$ кристаллическая — в каплю кислоты добавляют крупинку бертолетовой соли.

3) H_2O_2 (30%-ная) + NH_4OH (25%-ный). Этот свежеизготовленный реактив наиболее надежен.

В результате травления обычно выявляются, кроме структуры агрегатов, двойники ‖ (111) и деформации отдельных зерен (рис. 59). Зональное строение и спайность не выявляются.

7. Блеклые руды. Структуру блеклых руд выявить очень трудно, так как это изотропные и весьма устойчивые к химическим реактивам минералы.

Иногда структура у тетраэдрита выявляется $KMnO_4$ (концентрированный) + KOH + H_2O_2 (30%-ная). Реактив должен быть свежеизготовленным; время травления 10—60 сек.

В результате иногда выявляется сложное зональное строение зерен тетраэдрита.

8. Никелин. Внутреннюю структуру агрегата этого минерала хорошо видно в поляризованном свете при скрещенных николях, но внутреннюю структуру зерен следует выявлять травлением. Прекрасный результат дает кислый раствор перманганата ($KMnO_4 + H_2SO_4$).

В результате наблюдаются зональное строение отдельных зерен и редко двойникование.

9. Пирит. Наиболее распространенный из сульфидов в рудах. Изотропный. Строение зерен можно выявить лишь травлением азотной кислотой или кислым раствором перманганата. Кроме того, рекомендуется электролитическое травление с HCl.

С. Н. Иванов и П. Я. Ярош предложили методику электролитического травления пирита аммиаком при действии постоянного тока в 70—100 в. Ток можно получить через выпрямитель от городской осветительной сети. Пирит в полированном шлифе покрывают каплей 30%-ного аммиака, у основания капли касаются минерала стальной иглой, которая соединена с анодом. Вершины капли касаются платиновой проволочкой, соединенной с катодом. Время травления 10—20 сек.



Рис. 59. Внутренняя структура халькопирита, выявленная травлением щелочным раствором перманганата.
Увеличение 200×.

При травлении пирит обычно выявляет зональное строение (рис. 60, 61). Можно получить удовлетворительные результаты при травлении пирита концентрированной HNO_3, с добавкой порошка флюорита CaF_2.

В некоторых случаях травление пирита позволяет выявить его первоначальное колломорфное строение, невидимое в полированных минеральных агрегатах. Иногда в пирите при травлении выявляются механические деформации и очень редко двойники.

10. Кобальтин. Структуру этого минерала можно выявить травлением $KMnO_4+H_2SO_4$. Выявляется двойниковое строение, а иногда и структуры дробления (катаклаз). Зональная структура, в отличие от шмальтина, не наблюдается.

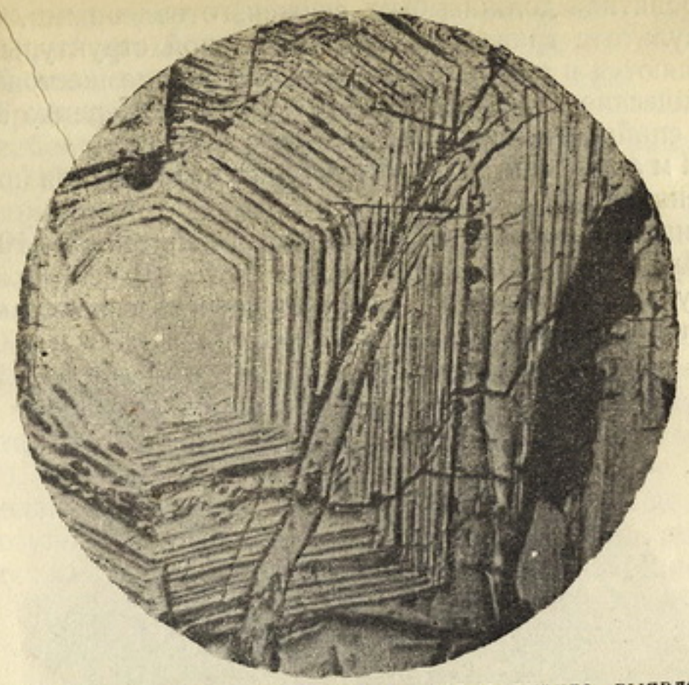


Рис. 60. Зональная внутренняя структура зерна пирита, выявленная электролитическим травлением с аммиаком.
Увеличение 100×. (По С. Иванову).



Рис. 61. Зональная внутренняя структура агрегата зерен пирита, выявленная электролитическим травлением с аммиаком.
Увеличение 50×. (По С. Иванову).

11. Арсенопирит. Для структурного травления арсенопирита применяются:

1) Щелочной раствор перманганата ($KMnO_4 + KOH$); время травления 10—60 сек; часто образующийся коричневый осадок легко растворим в концентрированной HCl.

2) Щелочной раствор перекиси водорода ($H_2O_2 + KOH$).

Оба реактива должны быть свежеизготовленными.

В результате травления, кроме обычной структуры агрегата, выявляются в отдельных зернах тончайшие шестоватые полисинтетические двойники по (110) и (101). Нередко выступает ясная спайность по (110).

12. Шмальтин. Для структурного травления шмальтина применяют:

1. Концентрированную HNO_3; время действия 5—10 сек.
2. $KMnO_4 + H_2SO_4$; время действия 5—10 сек.

В результате травления выявляется очень сильно выраженная зональность (рис. 62).



Рис. 62. Зональная внутренняя структура шмальтина, выявленная травлением.
Увеличение 180×. (По Г. Шнейдерхену).

13. Касситерит. Обычные средства травления на касситерит не действуют, он травится лишь водородом в момент выделения. Травление выполняется следующим образом: в плоскодонную чашечку помещают вогнутую цинковую пластинку и наливают HCl 1 : 5; полированный шлиф помещают над пластинкой на пути выделяющихся пузырьков. Время травления 5—25 мин. В результате этой реакции восстановления зерна касситерита покрываются слоем металлического олова (его хорошо видно в косом свете). Этот слой растворяют в HNO_3 и наблюдают структуру. Обычно это крупные простые двойники, иногда наблюдаются деформации. Зональная структура выступает редко.

14. Магнетит. Строение зерен магнетита можно выявить только травлением. Для этой цели употребляются:

1) Дымящаяся HCl; время действия 1—2 мин.
2) Бромистоводородная кислота HBr.

Способность граней растворяться от действия кислот: (100) > (111) > (110).

В результате травления выявляются двойники, что очень характерно для метаморфогенных месторождений.

Зональная структура иногда выступает в магнетитах контактовых месторождений.

15. Хромит. Изотропный, химически стойкий минерал, на который все обычные средства травления не действуют. Структурное травление разработано автором и К. Г. Дмитриевым.

Состав реактива: $KClO_4$ (2 г) + H_2SO_4 (40 см³) + H_2O (10 см³).

Травление сплошное, при кипячении от 30 мин. до 2 час.

В результате травления выявляется спайность по (111) в виде двух или трех систем пересекающихся линий (рис. 63).

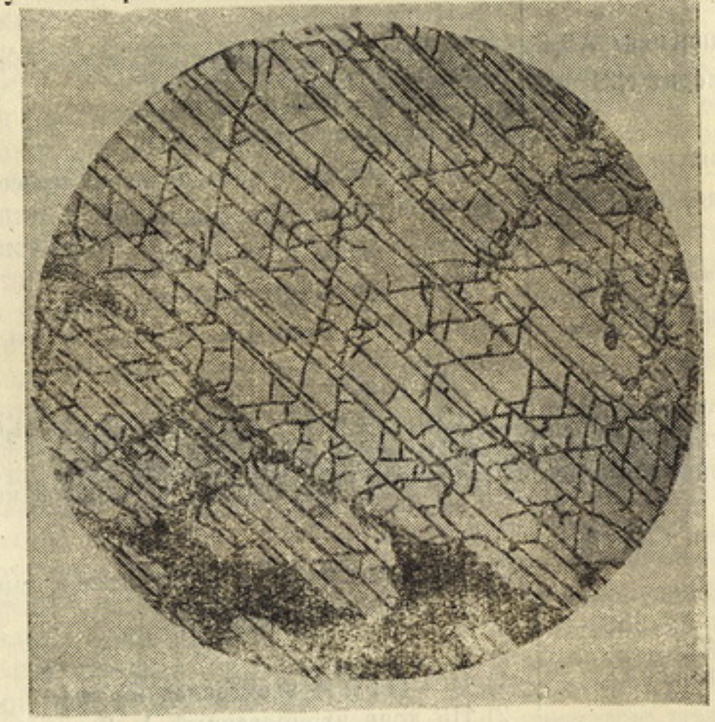


Рис. 63. Спайность травления в хромите, выявленная при кипячении в смеси $KClO_4 + H_2SO_4$
Увеличение 400×.

Реагенты для структурного травления

В таблице 14 приводятся сведения о реагентах для структурного травления не описанных здесь минералов (по Бетехтину).

Таблица 14

Минералы	Реагенты
Медь Cu	1) В парах смеси: 1 ч. HCl+1 ч. CrO_3 (50%-ный); 10—15 сек.
Серебро Ag	2) H_2O_2 (30% - ная) + NH_4OH (немного)
	1) В парах смеси: 1 ч. HCl + 1 ч. CrO_3
	2) HI концентрированная.
	3) H_2O_2 (30 % - ная) + NH_4OH
Золото Au	1) Царская водка
	2) Смесь 1 ч. HCl +1 ч. CrO_3
Платина Pt	3) Смесь: царская водка + CrO_3
	1) Царская водка
Висмут Bi	2) Смесь: HCl + CrO_3; 10—15 мин.
	1) HI; 1 сек.
Аурипигмент AS_2S_3	2) HNO_3; 1—2 сек.
Миллерит NiS	KOH (разбавленная); несколько минут
	1) В парах HBr
Леллингит $FeAs_2$	2) HNO_3 концентрированная
Герсдорфит NiAS	HNO_3 концентрированная; несколько минут
	1) HNO_3 концентрированная
Ульманит NiSbS	2) HBr концентрированная
Кубанит $CuFe_2S_3$	HNO_3 концентрированная
	1) В парах смеси: 1 ч. HCl + 1 ч. CrO_3
Борнит Cu_5FeS_4	2) NH_4OH + несколько капель H_2O_2 (30 %-ная)
Энаргит Cu_3AsS_4	I в KI (10 ч. J + 1,2 ч. KJ + 50 см³ H_2O)
Бурнонит $CuPbSbS_3$	KOH (20 % - ная).
	HBr (60 % - ный раствор в уксусной кислоте); 2—5 сек.
Станнин Cu_2FeSnS_4	1) HNO_3 1:1
	2) 1 ч. $KMnO_4$ + 1 ч. KOH; осадок смывается
Пираргирит-прустит Ag_3SbS_3—Ag_3AsS_3	HJ концентрированная
Гематит Fe_2O_3	1) HCl (1 : 1) + электрический ток
	2) HF концентрированный; 1—2 сек.
Манганит $Mn_2O_3 \cdot H_2O$	HF концентрированный; 30 сек.—несколько минут.
Гаусманит Mn_3O_4	1) HF концентрированный; 30 сек.—несколько минут.
	2) 1 ч. H_2SO_4 + 1 ч. H_2O_2 (30 % - ная).

Примечание. Для минералов: аргентит, реальгар, висмутин, лентландит, киноварь, группа линнеита, ильменит, вольфрамит удовлетворительных реагентов не найдено.

5. О ГЕНЕТИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ ТЕКСТУР И СТРУКТУР РУД.

Изучение текстур и структур руд имеет важное научное значение. Выясняя взаимоотношения зерен минералов или минеральных агрегатов, слагающих руды, мы можем восстановить историю формирования руд и их последующих изменений при различных геологических процессах. Нередко удается выяснить физико-химические условия, существовавшие в момент отложения руд.

Постараемся пояснить сказанное конкретными примерами.

Размеры зерен минералов и степень идиоморфизма, их форм проливают свет на кристаллизационные свойства формирующихся минеральных масс. Например, крупнокристаллические минеральные агрегаты являются показателем невысокой способности кристаллизации вещества, редкого расположения центров кристаллизации и, наоборот, мелкозернистые массы являются показателем высокой способности кристаллизации и сгущения центров кристаллизации. Правильные кристаллографические очертания рудных зерен есть продукт медленной кристаллизации вещества из растворов или расплавов; при быстрой же кристаллизации вещества возникают неправильные по форме, ксеноморфные зерна.

Подобно этому минеральные вещества, выпавшие из сильно переохлажденных или пересыщенных растворов, имеют тонкозернистые или даже скрытокристаллические структуры, а вещества, выпавшие из разведенных или умеренно переохлажденных растворов, обладают ясно выраженной зернистостью.

С другой стороны, при очень резком пересыщении растворов происходит выпадение минерального вещества в коллоидном состоянии.

Закономерные тонкие прорастания минералов, образующих структуры распада твердых растворов, представляют явный показатель одновременного образования каждого из минералов, слагающих такую структуру. Кроме того, структуры распада твердых растворов определенных пар минералов дают указание о температуре процесса распада первоначально однородного минерального вещества.

Структуры замещения, определяющиеся явно коррозионными формами, бухтоподобными заливами, пересечениями, остатками от замещения и проч., отчетливо показывают, что минерал замещаемый является более ранним, а минерал замещающий—более поздним. Структуры замещения позволяют также установить отдельные фазы минерализации и их последовательность.

Руды, обладающие колломорфными и гелевыми структурами, несомненно образовались путем отложения вещества из коллоидных растворов (рис. 37, 38).

Колломорфное строение особенно характерно для месторождений, формирующихся в близповерхностных условиях при незначительном давлении. Для более же глубинных месторождений повышенное давление будет способствовать перекристаллизации вещества и переходу колломорфных образований в зернистые агрегаты.

Например, А. Г. Бетехтин (1953) описывает случай перекристаллизации сульфидного геля сложного состава в хорошо образованные кристаллы раммельсбергита (рис. 64).



Рис. 64. Сгустки геля сложного состава (серое), обросшие хорошо образованными кристалликами раммельсбергита (белое). Черное — кварц. Увеличение 70×. (По А. Г. Бетехтину).

Г. Ф. Червяковский для одного из колчеданных месторождений Урала показывает переход колломорфных образований пирита в кристаллически-зернистые агрегаты (рис. 65).

Признаки коллоидного происхождения руд наблюдаются не только среди рудных минералов — сульфидов и окислов, но и среди жильных минералов.

Нередки случаи, когда в призальбандовых участках кварцевых жил наблюдается загрязнение зернистой кварцевой массы посторонними веществами в виде тонких, слабо окрашенных, концентрически расположенных полос. Эти реликтовые текстурные особенности должны быть отнесены также к типичным колломорфным образованиям. Нами они наблюдались в золото-кварцевых жилах одного из месторождений Восточного Забайкалья (рис. 66).

Изучение текстур руд может пролить свет на глубину формирования месторождений.

Мы уже указывали, что колломорфные текстуры более характерны для месторождений малых или умеренных глубин.

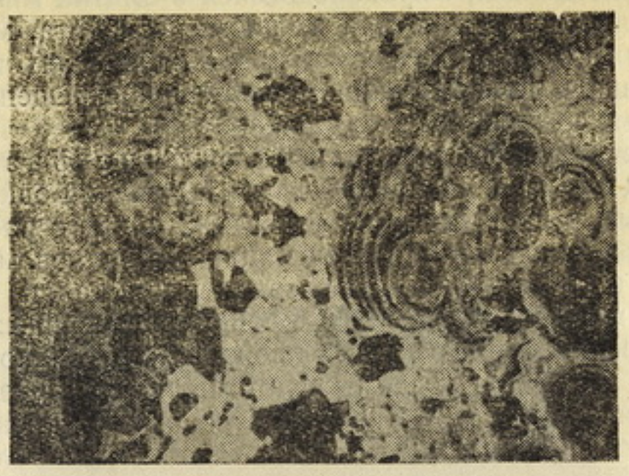


Рис. 65. Колломорфные образования и кристаллически-зернистые агрегаты пирита. Одно из колчеданных месторождений Урала. Увеличение 51×. (По Г. Ф. Червяковскому).



Рис. 66. Колломорфное строение зальбандовой части золотокварцевой жилы одного из месторождений Восточного Забайкалья. Натуральная величина.

На незначительную глубину образования руд указывают также текстуры крустификационная, кокардовая, друзовая. Все эти текстуры образуются путем выполнения минеральным веществом открытых полостей или трещин, которые, естественно, могут существовать лишь при небольшом давлении, господствующем на малых глубинах.

Структуры давления являются явным показателем механических деформаций, которым подвергались минеральные вещества. Эти деформации могут быть как хрупкими, выражающимися в дроблении зерен твердых минералов (пирита, арсенопирита, хромита, магнетита),

так и пластическими, выражающимися в смятии мягких минералов (сфалерита, пирротина, галенита, стибнита, молибденита). Эти пластические деформации мы наблюдаем или путем исследования в поляризованном свете при скрещенных николях или путем структурного травления.

Важное значение имеет наблюдение различных генераций, т. е. разновозрастных выделений одного и того же минерала в процессе кристаллизации данного раствора.

Формы проявления этих генераций минералов могут быть различны: колломорфные образования и кристаллы, сплошные зернистые массы и вкрапления хорошо образованных кристаллов, тонкозернистые агрегаты и прожилки кристаллов и т. д. Например, для Дарасунского золото-полиметаллического месторождения часто наблюдаются полоски крупнокристаллического арсенопирита среди массы его тонкозернистого строения (рис. 67).



Рис. 67. Полоски крупнокристаллического арсенопирита среди массы тонкозернистого строения. Темная масса слева — боковая порода, а справа — жильный кварц. Протравлено азотной кислотой.
Увеличение 3×.

(По А. Г. Бетехтину).

А. Г. Бетехтин (1953) объясняет появление многочисленных генераций минералов многократным возобновлением одних и тех же или близких по своему характеру химических реакций, в результате которых и происходило прерывистое отложение из раствора минерального вещества.

Изучение текстур и структур руд нередко позволяет нам установить необычные и весьма интересные особенности процесса формирования руд. Они

обстоятельно разобраны А. Г. Бетехтиным в работе 1953 г. «О формировании руд в жильных гидротермальных месторождениях».

Интересен случай оседания свернувшейся дисперсной фазы в виде шариков на поверхности зерен или кристаллов минералов. На микрофотографии руды одного из свинцовых месторождений Средней Азии, изученного Т. Н. Шадлун, мы наблюдаем необычную последовательность выделения минералов: гранат—галенит—шарики гематита—кварц (рис. 68).

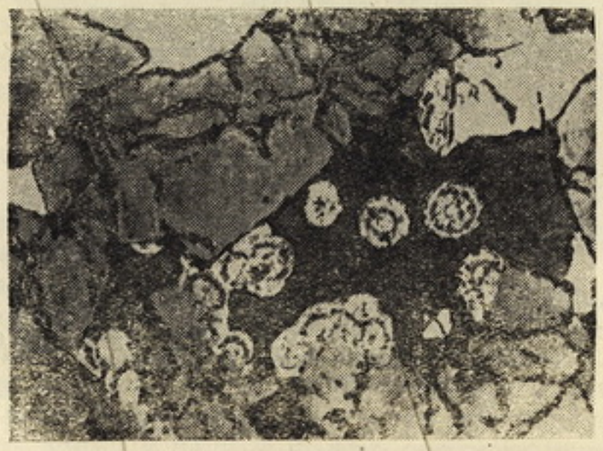


Рис. 68. Шарики гематита (белое) в кварцевой массе (темносерое). Окружающий агрегат (серый) представлен гранатом. Справа, вверху и слева галенит (белый).
Увеличение 140×. (По Т. Н. Шадлун).

А. И. Тишкин описывает оригинальный случай образования эндогенного, т. е. первичного, гётита в баритовых жилах (рис. 69).

Изучение текстур и структур руд позволяет осветить процессы метаморфизма в рудах.

Проблема метаморфизма рудных месторождений с особой остротой была поставлена А. Н. Заварицким в связи с детальным изучением колчеданных месторождений Урала.

А. Г. Бетехтин (1953 г.) указывает, что при процессах метаморфизма происходит существенная перегруппировка вещества в твердом состоянии с образованием минералов уже в иной последовательности. Поэтому в рудах, претерпевших метаморфизм, мы, изучая возрастные соотношения минералов, устанавливаем отнюдь не последовательность их выделения из растворов, а лишь последовательность их образования при процессах перекристаллизации. Приведем некоторые примеры. Так, для одного из колчеданных месторождений Урала наблюдаются пирротиновые руды с прожилками, сложенными сидеритом, магнетитом и пиритом. Все эти минералы парагенетически

тесно связаны между собой. Образование сидерита и магнетита можно объяснить за счет реакции пирротина с более поздним метаморфизующим раствором, протекавшим по трещинкам.



Рис. 69. Колломорфные выделения гипогенного гётита (белое) в кристалле барита (темносерое). Черные и темносерые пустотки округлой формы образовались на месте газовых включений.
Увеличение 70×. (По А. И. Тишкину).



Рис. 70. Агрегат зерен хромита (светлосерый) среди серпентинита (темный). По периферии зерен хромита и вдоль по трещинкам ясно видны следы его метаморфизации в виде более светлых каемок и полосок.
Одно из хромитовых месторождений Урала.
Увеличение 50×.

Из раствора извлекались ионы $[CO^3]^{-2}$ с образованием сидерита, а также ионы кислорода, шедшие на образование магнетита. При этом процессе происходило освобождение серы, которая пошла на образование вторичного пирита.

Другой пример — это широко развитые процессы метаморфизма хромитовых руд в связи с процессами серпентинизации вмещающих пород. Метаморфизм зерен хромшпинелидов выражается в появлении темных кайм и полос, видимых под микроскопом в проходящем свете или в виде зернистых и более светлых каемок и полосок, наблюдаемых под микроскопом в отраженном свете ~~(рис. 70)~~.

Метаморфизм этих руд обусловлен окислением двухвалентного железа и нарушением кристаллической структуры хромшпинелида.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают всего разнообразия текстур и структур руд, ~~и позволяют расшифровать далеко не все процессы истории формирования руд и их последующих изменений.~~

Тщательное изучение руд в забоях, в штуфах, в приполированных образцах, микроскопические исследования полированных шлифов и прозрачных шлифов руд — все это вместе взятое позволит каждому исследователю при внимательной и вдумчивой работе расшифровать многие интересные структуры и установить новые и ценные факты, проливающие свет на генезис месторождений.

ГЛАВА XVI

ЗАМЕРЫ И ПОДСЧЕТЫ РУДНЫХ ЗЕРЕН ПОД МИКРОСКОПОМ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В предыдущих главах были рассмотрены признаки, которые служат для определения минералов и дают возможность установить качественный минералогический состав руды. Но, кроме того, необходимо знать размеры зерен минералов и их количественные взаимоотношения, что очень важно в практике механического обогащения руд.

Установив количественные взаимоотношения минералов, можно путем расчета определить и содержание полезного элемента в руде, т. е. произвести для нее количественный минералогический анализ.

В некоторых случаях такие расчеты имеют большое практическое значение; они дополняют химические анализы и показывают распределение какого-либо элемента (металла) по различным минералам.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНИКОВ РУДНЫХ ЗЕРЕН

Определение поперечников зерен минералов под микроскопом производится несколькими методами. Просто и достаточно точно это можно выполнить с помощью окуляр-микрометра. Последний представляет собой круглую стеклянную пластинку, на которой нанесена шкала размером в 1 см, разделенная на 100 частей. Эта пластинка вкладывается между линзами окуляра; ее положение должно быть таким, чтобы она хорошо была видна под микроскопом. Регулировка видимости шкалы производится путем небольшого перемещения верхней линзы окуляра.

С помощью окуляр-микрометра измеряется не объект, а его изображение в фокальной плоскости окуляра, поэтому предварительно для каждого увеличения потребуется определение цены деления окуляр-микрометра.

Определение цены деления окуляр-микрометра производится с помощью объект-микрометра, представляющего собой стеклянную пластинку со шкалой в 2 мм, разделенной на 200 частей. Объект-микрометр устанавливается на столике микроскопа и рассматривается через окуляр (лучше в проходящем свете). Обе шкалы совмещаются. Цена одного деления шкалы объект-микрометра равна 0,01 мм; цена деления шкалы окуляр-микрометра вычисляется следующим образом.

Если, например, при объективе 9× (№ 3) получилось, что 20 делений шкалы окуляр-микрометра заняли 26 делений шкалы объект-микрометра, т. е. 0,26 мм, то одно деление шкалы окуляр-микрометра будет равно $\frac{0{,}26}{20} = 0{,}013$ мм, что и является ценой его деления при объективе 9× (№ 3).

Таким же путем производят определение цены деления окуляр-микрометра и при работе с другими объективами.

Поперечники зерен сначала измеряются в делениях окулярной шкалы; полученный результат умножается на цену ее деления, и получаются размеры в миллиметрах.

Для каждого минерала следует произвести несколько десятков измерений поперечников зерен и установить путем вычисления размеры минимальных, максимальных и средних зерен.

За неимением окуляр-микрометра грубые измерения можно произвести с помощью кусочка миллиметровой бумаги; один миллиметр ее обычно разделен точками на четыре части. Подкладывая полоску миллиметровки на полированный шлиф в поле зрения микроскопа, можно непосредственно измерить поперечник зерна с точностью до 0,1 мм.

Наиболее точные линейные измерения (с точностью до 0,0001 мм) под микроскопом можно произвести с помощью винтового окуляр-микрометра.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

Существуют три метода количественных определений минералов в полированных шлифах под микроскопом: площадной, линейный и точечный.

Площадной (планиметрический) метод

Этот метод основан на том положении, что количественные отношения между площадями минералов в шлифе равны отношениям объемов этих минералов.

Измерения производятся с помощью окуляра-сеточки. Он состоит из стеклянной пластинки с нанесенной на нее сеткой, разделенной толстыми линиями на четыре квадрата по сто клеточек в каждом. Эта пластинка устанавливается, как и окуляр-микрометр, в фокальной плоскости окуляра.

Подсчет для руды с равномернозернистой структурой производится следующим образом.

Выбирают на площади полированного шлифа участок в 1—2 см^2 и обводят его в виде квадрата цветной тушью. Устанавливают полированный шлиф на столике микроскопа и передвигают его с помощью координатных салазок. Закрепляют столик. Наблюдают через окуляр-сеточку первое поле зрения микроскопа. Считают, сколько клеточек приходится на какой-нибудь минерал, части клеточек объединяют в целые на глаз. Затем считают число клеточек, приходящееся на второй, третий и другие минералы, если это требуется. Записывают результаты. Передвигают полированный шлиф с помощью салазок так, чтобы граница нового предназначенного к подсчету квадрата совпала с границей старого.

Производят такие же замеры для тех же минералов во втором поле. Потом наблюдают третье, четвертое и другие поля, пока не пройдут всю линию от края до края очерченного квадрата. После этого производят наблюдение и замеры по всем полям второй линии, потом третьей, четвертой, и так до тех пор, пока не покроют всю предназначенную к подсчету площадь. Расстояния между линиями должны быть равны ширине квадрата окуляра-сеточки.

Если структура руды неравномернозернистая, то подсчет производят для отдельных полей, разбиваемых в шахматном порядке.

Для каждого полированного шлифа подсчет следует произвести для 10—20 полей, что обеспечит, согласно наблюдениям и вычислениям В. Н. Лодочникова, точность 1—1,5%.

Время, затрачиваемое для замера, составляет около 40 мин. для одного минерала в полированном шлифе.

По окончании замеров суммируются результаты для каждого из минералов. Затем вычисляется площадь каждого минерала в процентах, считая за 100% всю площадь полированного шлифа, покрытую окуляром-сеточкой. Полученные числа будут соответствовать объемному процентному содержанию минералов в руде.

Линейный метод

Линейный метод основывается на том положении, что поперечники зерен минералов при большом числе замеров пропорциональны площадям минералов, а площади, как это указано выше, пропорциональны их объемам.

Измерения в этом случае производятся с помощью окуляр-микрометра. Полированный шлиф устанавливают в салазках и наблюдают первое поле зрения. Замеряют длину отрезков (в делениях окуляр-микрометра) для одного или нескольких минералов. Потом полированный шлиф передвигают с помощью салазок вперед или назад на длину шкалы окуляр-микрометра и замеряют длину отрезков минералов во втором поле, затем в третьем и т. д., пока не пройдут всю первую линию. После этого передвигают полированный шлиф вправо или влево на расстояние, несколько меньшее среднего поперечника рудных зерен, и производят подсчет для ряда полей второй линии. Потом переходят к третьей и четвертой линиям, и так до тех пор, пока не покроют всю площадь, предназначенную для подсчета. Для достижения точности в 1,0—1,5% достаточно произвести замеры в 10—20 полях.

По окончании измерения суммируют величину отрезков для каждого минерала и вычисляют процентное содержание его в руде.

Линейный метод проще площадного и не уступает ему по точности, поэтому в практике ему отдается предпочтение.

Подсчеты по линейному методу могут быть механизированы путем применения специальных приборов. А. А. Глаголев (1941) дает описание ряда приборов для линейного метода: объект-микрометр, интеграционный столик, электроинтегратор и роторинтегратор и др. В электроинтеграторе ВИМС полированный шлиф, помещенный в координатные салазки, плавно перемещается на столике микроскопа. С салазками связан прерыватель тока таким образом, что число прерываний тока пропорционально величине передвижения шлифа. При помощи переключателя ток направляется в счетчик регистратора, подсчитывающего число прерываний тока. Время, затрачиваемое для подсчета с помощью электроинтегратора для одного полированного шлифа (при 1000 линейных отрезков), составляет лишь около 20 мин.

Подробные описания этих приборов и порядка работы на них интересующиеся найдут в указанной книге А. А. Глаголева.

Точечный метод

Определение содержания минералов в шлифе по точечному методу, предложенному А. А. Глаголевым, производится так.

На площади полированного шлифа равномерно распределяют большое количество точек наблюдений и подсчитывают число точек, попавших на каждый минерал. Это число точек будет пропорционально площадям минералов, а следовательно, и их объемам. Вероятная погрешность, которая получается при

таких определениях, зависит от числа взятых точек и выражается следующей формулой:

$$\delta = 0{,}67 \sqrt{\frac{A\,(100 - A)}{n}} \qquad (9)$$

где: δ — вероятная погрешность; n — общее число точек; A — процентное содержание компонента (минерала).

Ниже приведены погрешности, вычисленные по этой формуле при n = 1000:

A	δ	A	δ
1 и 99 . . .	0,21	30 и 70 . . .	0,96
10 » 90 . . .	0,63	40 » 60 . . .	1,04
20 » 80 . . .	0,84	50 . . .	1,06

Следовательно, при 1000 точек наблюдений погрешность подсчета не превысит 1,1%. Поэтому 1000 точек достаточно для обычного подсчета содержания минерала в руде.

При меньшем числе точек наблюдений погрешность значительно возрастает. Так, например, при A = 50% будем иметь:

n	1000	500	100	10
δ	1,06	1,50	6,7	10,6

Последнее обстоятельство необходимо иметь в виду при подсчете минералов, содержание которых в руде незначительно. На каждый минерал в этом случае будет приходиться мало точек, и поэтому относительная погрешность возрастет.

Практически подсчет минералов в шлифе производится следующим образом. Полированный шлиф укрепляют на столике микроскопа в координатных салазках и подвигают его скачками на расстояния, равные среднему поперечнику рудных зерен. При каждом положении полированного шлифа отмечают на бумаге, какой минерал приходится на кресте нитей окуляра. Просмотрев первую линию и зарегистрировав условными значками все минералы на ней, переходят ко второй линии, отстоящей от первой на расстояние, равное среднему поперечнику рудных зерен и т. д. По окончании просмотра намеченной площади суммируют количество точек, пришедшееся на каждый минерал, и вычисляют процентное содержание его в руде.

А. А. Глаголев при малом содержании компонента рекомендует так называемый метод полей, при котором пользуются сетчатым окуляром. Благодаря этому на поле зрения микроскопа как бы накладывается сетка, имеющая обычно 400 узлов. Эти пересечения (узлы) и используются в качестве точек для подсчета. Точки, попавшие на определяемый минерал во всех полях, суммируют, а общее число точек в шлифе определяют, умножая число узлов сетки на число полей. Разделив первую величину на вторую и помножив на 100, получают процентное содержание минерала в шлифе. При методе полей подсчет 20000 точек займет всего лишь 30—40 мин.

Большое преимущество точечного метода подсчета зерен минералов в шлифе заключается в том, что его можно производить при помощи прибора, называемого пуш-интегратором.

Пуш-интегратор, изобретенный А. А. Глаголевым в 1931 г., в простейшем виде состоит из салазок, служащих для передвижения шлифа и имеющих на одном из микрометренных винтов передаточно-регулирующее приспособление и регистратора, предназначенного для подсчета и суммирования точек наблюдения, приходящихся на каждый минерал.

В 1934 г. ВИМСом была выпущена партия пуш-интеграторов, а в 1937 г. более усовершенствованные приборы были изготовлены заводом «Геологоразведка».

Описание пуш-интеграторов разных конструкций и указания для работы с ними можно найти в упоминавшейся книге А. А. Глаголева (1941).

Основные правила пользования пуш-интегратором следующие.

Наблюдатель, в зависимости от того, какой минерал находится на пересечении нитей окуляра, нажимает на тот или иной клавиш прибора. При этом полированный шлиф передвигается на столике микроскопа, что регистрируется на соответствующем колесе счетчика. На пересечение нитей попадает другая точка полированного шлифа. Соответственно минералу, который находится в этой точке, снова нажимают другой клавиш и шлиф передвигается автоматически дальше. Интервал, на который перемещается полированный шлиф, может регулироваться специальным винтом в зависимости от размера зерен. По окончании подсчета назначенной площади полированного шлифа записываются показания счетчика для каждого минерала, и потом вычисляется процентное содержание его в руде. Работа производится быстро. Анализ полированного шлифа (1000—1500 точек) занимает не более 20—30 мин.

Заводом «Русские самоцветы» выпущен в последние годы прибор для подсчетов под микроскопом — интеграционный столик модели «ИСА». Этот счетный прибор предназначен для одновременного анализа шести компонентов с общей длиной измеряемой линии в 90 мм (рис. 71).

На панели (14) столика установлен препаратоводитель с шлифом или полированным шлифом.

Интеграционный столик дает возможность производить исследования микроскопических препаратов в проходящем и в отраженном свете при разных увеличениях.

Столик состоит из основания (11), на котором смонтированы все детали прибора. На основании прикреплены направляющие (12), в которых помещены салазки (13) с панелью (14). Маховичком (10) производится возврат объекта в исходное положение после прохода и измерения одной линии.

Маховичок (8) служит для пропуска породы исследуемого объекта.

Маховичок (7) предназначен для перевода объекта на следующую измеряемую линию.

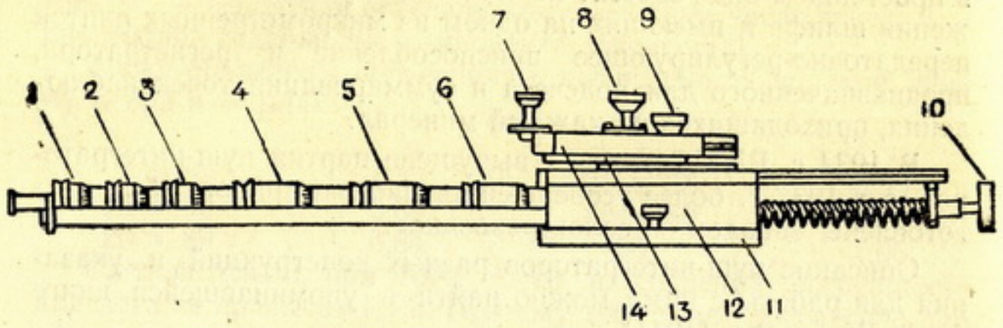


Рис. 71. Интеграционный столик для подсчетов под микроскопом модели «ИСА».
1—6—отсчетные барабанчики; 7 — маховичок для перевода объекта на следующую линию; 8 — маховичок для пропуска породы; 9 — винт для крепления; 10 — маховичок для возврата породы в исходное положение; 11 — основание столика; 12 — направляющие; 3 — салазки; 14 — панель. Уменьшено в 3 раза.

Отсчетные барабанчики (1—6) перед началом работы устанавливаются на нулевое положение.

Интеграционный столик позволяет производить определение процентного содержания минералов в горных породах и в рудах, а также компонентов в продуктах механического обогащения руд. Столик подходит к поляризационным микроскопам заводов «Русские самоцветы» и «Прогресс».

Количественные определения на глаз

В практике минераграфических исследований часто производят быстрые, грубые определения на глаз содержания в руде того или иного минерала. Погрешность при этих определениях достигает 5—10%. При большом количестве полированных шлифов погрешности компенсируются и средние цифры получаются удовлетворительные. Так, например, по одному из колчеданных месторождений автором было определено на глаз содержание медных минералов в 284 полированных шлифах. По этим данным было вычислено содержание меди в руде, которое получилось равным 1,57% (весовых). Среднее содержание меди, полученное по данным химического опробования, для той же части месторождения составляет около 1,50%.

Такие количественные определения занимают немного времени, но дают полезный материал для характеристики руды. Рекомендуется их производить для каждого просматриваемого полированного шлифа.

Метод сравнения

Этот метод предложен автором настоящего руководства. При работе этим методом сравнивают видимое под микроскопом количество минералов в каком-либо поле зрения с эталонными кружками, на черном фоне которых имеется определенное количество белых фигурок. Путем сравнения нетрудно найти ближайший по содержанию эталон и таким путем установить количество минерала в руде.

Эталонные кружки для сравнения приведены на рис. 72.

Изготовление таких эталонных кружков несложно и может быть выполнено каждым исследователем. Из кружка белой бумаги вырезается сектор с дугой окружности, равной $\frac{360°\cdot n}{100}$, где n будет 1, 3, 5, 10, 15...%. Полученный белый сектор разрезается ножницами на фигурки, которые наклеиваются на черный кружок такого же размера, как и белый.

Метод сравнения может принести большую пользу для начинающих, которые обычно переоценивают содержание минералов в руде, особенно при их малых процентных количествах (рис. 72, а и б).

С течением времени приобретается необходимый навык и исследователь начинает оценивать количественные соотношения на глаз достаточно удовлетворительно.

4. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛА В РУДЕ

(Количественный минералогический анализ)

Вышеописанные методы определения количественных соотношений минералов дают возможность определить содержание того или иного минерала в руде в объемных величинах или в объемных процентах. Для вычисления процентного содержания металла в руде требуется определение весового процентного содержания минерала в полированном шлифе.

Вычисление весового процентного содержания минерала в руде производится по следующей формуле:

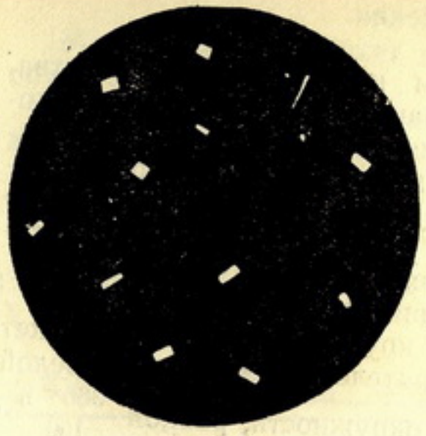
$$g_k = \frac{100\, n_k d_k}{n_1 d_1 + n_2 d_2 + \ldots + n_k d_k}, \qquad (10)$$

где g_k — весовое процентное содержание данного минерала;

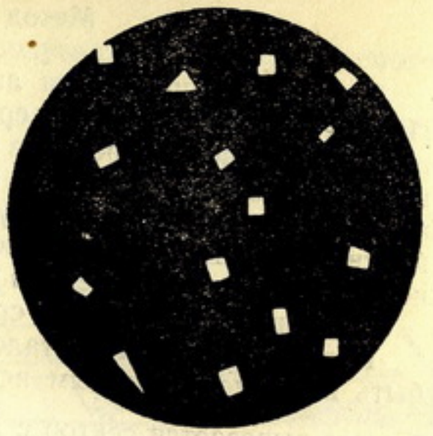
n_k — площадь этого минерала, или длина отрезков его, или число точек на нем;

d_k — удельный вес этого минерала[1];

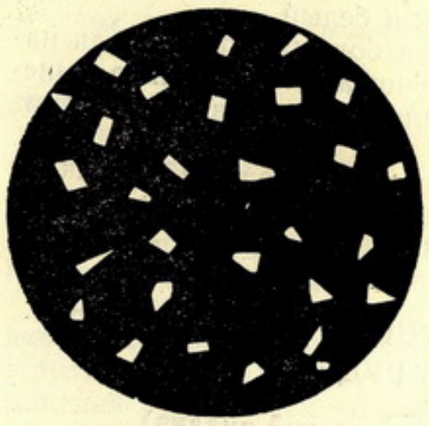
[1] d определяется по справочнику.



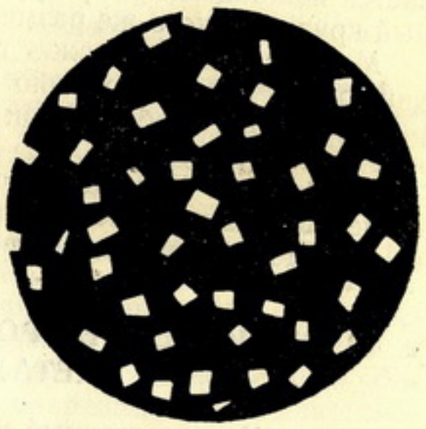
а (1 %)



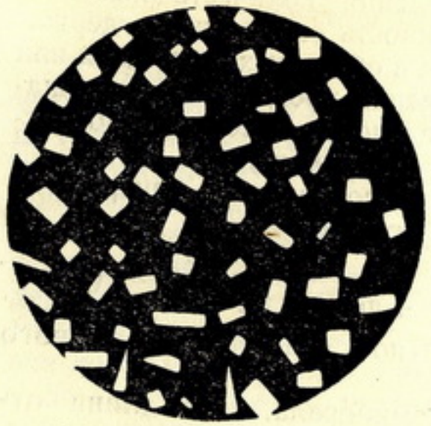
б (3%)



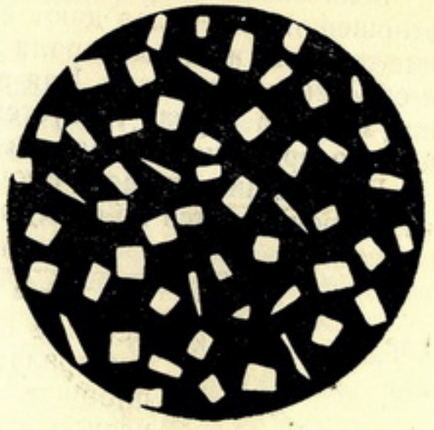
в (5%)



г (10 %)

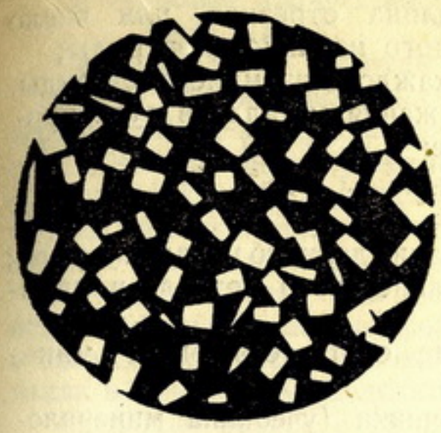


д (15 %)

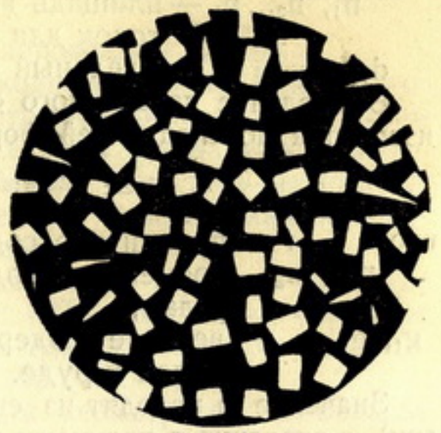


е (20%)

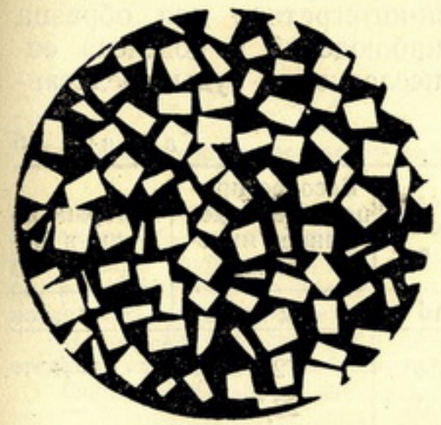
Рис. 72. Иллюстрации к сравнительному методу определения количества минералов в полированных шлифах. Процентное содержание белых фигурок на черном фоне показывают цифры у каждой фигуры.



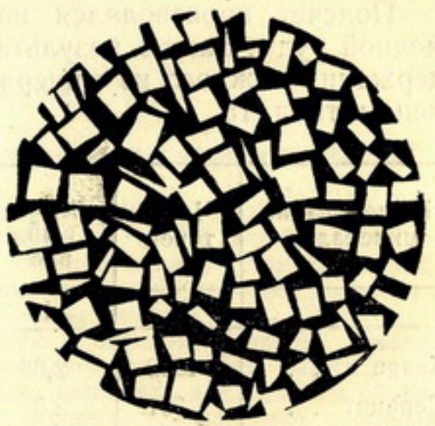
ж (25 %)



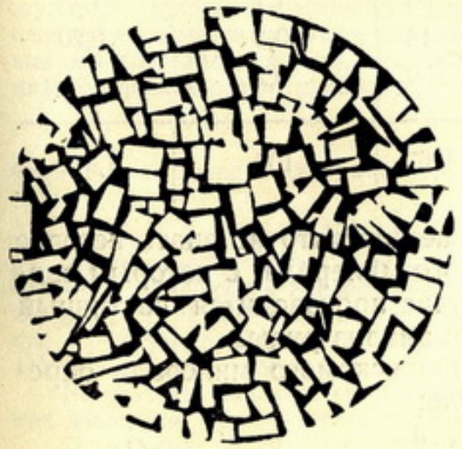
з (30 %)



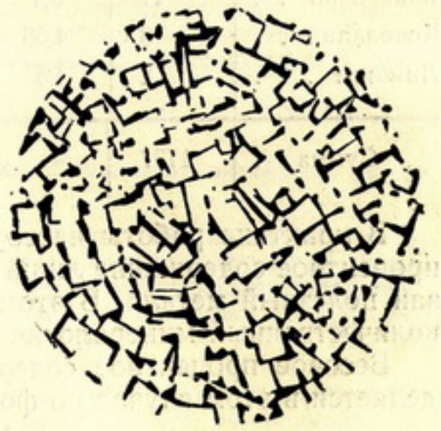
и (40%)



к (50%)



л (70%)



м (90%)

n_1, $n_2 \ldots n_k$ — площадь или длина отрезков, или число точек для каждого из минералов руды;

d_1, d_2 . . d_k — удельный вес каждого из минералов руды.

Вычисление процентного содержания металла в руде производится по следующей формуле:

$$r = \frac{m_1 g_1 + m_2 g_2 + \ldots}{100}. \qquad (11)$$

где r — процентное содержание данного металла в руде;

m_1, m_2 — процентное содержание этого металла в минералах;

g_1, g_2 . . — весовое содержание соответствующих минералов в руде.

Значение m находят из справочника (учебника минералогии), а значение g получают из формулы (10).

Приводим пример вычисления содержания металла в руде.

Подсчет производился на пуш-интеграторе для образца медной руды. Запись результатов наблюдений и подсчета содержания каждого из минералов исследуемой руды представлена в табл. 15.

Таблица 15

Наименование минералов	Число точек	Удельный вес	Число точек × уд. вес	Весовое процентное содержание минерала	Содержание меди в %
	n	d	nd	g	r
Кварц	1342	2,65	3546	72,8	—
Серицит . . .	391	2,8	1095	22,3	—
Пирит	28	5,0	140	2,7	—
Халькозин . .	11	5,7	63	1,7	1,24
Ковеллин . . .	3	4,65	14	0,3	0,20
Лимонит . . .	2	4,5	9	0,2	—
Сумма . .	1777	—	4867	100	1,44

В практике работы часто бывает достаточно знать весовое процентное содержание лишь одного минерала, с которым связан полезный металл. В этом случае производится частичный количественный минералогический анализ руды.

Весовое процентное содержание искомого минерала определяется в этом случае по формуле:

$$g_k = \frac{100\, n_k\, d_k}{nd} \qquad (12)$$

где n_k — площадь или длина отрезков, или число точек, приходящихся на минерал;

d_k — удельный вес минерала;

n — общее количество точек на всей площади полированного шлифа;

d — удельный вес руды в полированном шлифе.

Таким образом, при частном количественном минералогическом анализе требуется определить экспериментальным путем еще одну величину — удельный вес руды для данного полированного шлифа. Это определение может быть выполнено в несколько минут путем гидростатического взвешивания полированного шлифа на лабораторных весах.

Чтобы получить искомое содержание металла в руде остается вычисленное по формуле (12) содержание минерала в весовых процентах умножить на процентное содержание металла в минерале и разделить на 100.

Подробно вопрос о погрешности геометрических методов анализа разбирается в третьей части книги А. А. Глаголева 1941).

УПРАЖНЕНИЯ

Определение размеров зерен минералов с помощью окуляр-микрометра

Предварительно нужно определить цену деления окуляр-микрометра с помощью объект-микрометра (2 мм, разделенные на 200 частей). Наблюдения следует производить в отраженном или проходящем свете при окуляре, в котором обычно помещается микрометр. Нужно добиться видимости последнего путем передвижения верхней линзы окуляра.

Далее следует совместить объективную и окулярную шкалы, сделать отсчет и из пропорции вычислить искомую цену деления (см. выше).

Определение цены деления необходимо повторять для каждого объектива. На практических занятиях можно ограничиться наиболее ходовыми объективами — 9× (№ 3), 3,7× (№ 1), 40× (№ 6). После определения цены деления окуляр-микрометра можно перейти к измерению в делениях окулярной шкалы поперечников зерен какого-нибудь рудного минерала; следует произвести не менее 10 замеров. Умножением полученного значения на цену деления определяются минимальный, максимальный и средний размеры зерен в миллиметрах.

Определение содержания минерала в руде с помощью линейного метода

Сначала в полированном шлифе под микроскопом нужно определить рудные минералы. Затем в микроскопе устанавливается окуляр с микрометром и измеряются поперечники зерен рудных минералов последовательно для ряда полей, видимых под микроскопом. В зависимости от крупности зерен измерение производится при объективе 3,7× (№ 1) или 9× (№ 3); с более сильными объективами работа затруднительна.

Результаты наблюдений и последующий расчет процентного содержания минерала рекомендуется записывать по следующей форме (табл. 16).

Процентное содержание металла в руде легко вычислить, зная содержание минерала в руде в весовых процентах, путем умножения этой величины на процентное содержание металла в минерале. Рекомендуется произвести определение процентного содержания металла в медноколчеданной руде для меди, цинка и мышьяка.

Таблица 16

Наблюдаемое поле зрения	Отрезки зерен минералов в делениях окулярной шкалы					
	пирит	халькопирит	сфалерит	теннантит	нерудные	сумма
1-е поле	n^1_p	n^1_c	n^1_s	n^1_t	n^1_g	100
2-е поле	n^2_p	n^2_c	n^2_s	n^2_t	n^2_g	100
3-е поле и т. д. .	n^3_p	n^3_c	n^3_s	n^3_t	n^3_g	100
Сумма отрезков .	n_p	n_c	n_s	n_t	n_g	n
Удельный вес . .	d_p	d_c	d_s	d_t	d_g	
Сумма отрезков × уд. вес	$n_p d_p$	$n_c d_c$	$n_s d_s$	$n_t d_t$	$n_d d_g$	nd
Содержание минерала в объемных %	$\frac{n_p}{n}100$	$\frac{n_c}{n}100$	$\frac{n_s}{n}100$	$\frac{n_t}{n}100$	$\frac{n_g}{n}100$	
Содержание минерала в весовых %	$\frac{n_p d_p}{nd}100$	$\frac{n_c d_c}{nd}100$	$\frac{n_s d_s}{nd}100$	$\frac{n_t d_t}{nd}100$	$\frac{n_g d_g}{nd}100$	

ГЛАВА XVII

ОРГАНИЗАЦИЯ И УЧЕТ РАБОТЫ ПО МИНЕРАГРАФИЧЕСКОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ РУД

Минераграфические исследования, ставящие своей основной задачей изучение вещественного состава и структур руд, должны производиться одновременно с всесторонним изучением рудного месторождения.

1. ОЗНАКОМЛЕНИЕ С МЕСТОРОЖДЕНИЕМ И ОТБОР ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ознакомление с месторождением производится путем его осмотра, геолого-минералогической документации и последующей обработки материалов полевых наблюдений.

Образцы нужно отбирать так, чтобы они характеризовали руду по простиранию, падению и мощности залежи. Обязательно нужно взять образцы с контактов и из вмещающих пород, что следует делать даже в том случае, если в этих местах на глаз не видно рудных минералов. Места, из которых взяты образцы, следует зарисовывать. При зарисовке необходимо обращать внимание на строение рудной залежи, на текстуры руд, на возрастные взаимоотношения минеральных агрегатов. Элементы залегания как самой залежи, так и замеченных нарушений в ней (плоскости отдельности, зеркала скольжения, сдвиги или сбросы и пр.) должны быть замерены горным компасом.

Кроме такого систематического отбора образцов руд, нужно брать отдельные образцы, выделяющиеся по своему минералогическому составу или содержащие редкие, малоизвестные минералы.

2. МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Макроскопическое изучение образцов заключается в описании их внешнего вида, текстуры, определении примерного минералогического состава, наблюдении явлений динамометаморфизма, экзогенных изменений руды. В некоторых случаях макроскопически производится определение некоторых физических свойств руды: испытание на магнитность со стрелкой и определение удельного веса образцов путем их гидростатического взвешивания.

Для лучшего освещения текстур руд и для выявления возрастных соотношений минеральных агрегатов следует изготовить ряд полированных штуфов. Для последних отбирают характерные образцы размером 6×9, 9×12 см или больше, цементируют их канифолью или бакелитом, а потом последовательно пришлифовывают с наждаком, доводят с минутником и отполировывают на сукне. Такие образцы тщательно описываются, зарисовываются или фотографируются. Иногда их подвергают травлению.

Далее из макроскопически определенных образцов производится отбор части их для изготовления полированных шлифов для микроскопического исследования в отраженном свете и шлифов для исследования в проходящем свете.

Количество полированных шлифов, необходимое для изучения руд какого-либо месторождения, различно и зависит от размеров месторождения, его генетической природы, степени разведанности и изученности и т. д.

В общем, в наиболее благоприятных случаях достаточно проработать коллекцию в 80—100 образцов и отобрать из них 30—40 образцов для микроскопического исследования.

При отборе образцов руд для микроскопического исследования следует руководствоваться конкретной задачей исследования, объемом работы, средствами и сроком ее выполнения. Необходимо позаботиться о том, чтобы отобранные для микроскопического исследования образцы могли охватить пространственно месторождение возможно шире и чтобы они представляли все типы руд промышленной классификации.

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИРОВАННЫХ ШЛИФОВ РУД

Качество полированных шлифов во многом определяет успех всей работы по минераграфическому исследованию руд. Исследователь должен следить за работой мастера при полировке и шлифовке образцов и давать ему указания.

При получении изготовленных полированных шлифов следует проверить их под микроскопом.

Полированные шлифы должны быть хорошо сцементированы, обладать зеркально-гладкой верхней поверхностью,

иметь умеренный рельеф и отвечать стандарту по своим размерам. Если эти требования не выполнены, то полированные шлифы должны быть возвращены мастеру для исправления.

Полученные от мастера полированные шлифы монтируются с помощью воска или пластилина на стеклах, края которых лучше сделать матовыми для соответствующих надписей тушью или чернилами. Следует поставить эмалевые пятна сбоку самих полированных шлифов для их нумерации.

Смонтированные полированные шлифы рекомендуется хранить вместе с этикетками в картонных коробках или деревянных ящиках с гнездами и оберегать их от загрязнения и сырости.

Кроме обычных полированных шлифов, следует изготовить некоторое количество безрельефных полированных шлифов, без которых нельзя обойтись при изучении включений мягких минералов (золота) в твердых (в пирите). Изготовление безрельефных полированных шлифов — сложная и трудоемкая работа, требующая специальной аппаратуры, особых абразивных материалов и высокой квалификации мастера. Обычно эта работа выполняется самим исследователем.

4. МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РУД

Перед микроскопическим исследованием полированных шлифов в отраженном свете нужно провести следующую подготовительную работу.

Для записи результатов наблюдений под микроскопом нужно иметь специальную рабочую тетрадь. Записывать наблюдения нужно по определенной форме, например, по приведенному ниже образцу (табл. 17).

Форма подклеивается к развернутой обложке тетради так, чтобы она выдавалась слева. На левых листах тетради пишутся краткие ответы на вопросы формы. Правый лист сохраняется для более подробных индивидуальных описаний. Начинающий должен, придерживаясь этой формы, определить каждый из наблюдаемых им под микроскопом минералов и всю руду в целом. По мере приобретения опыта определение распространенных минералов будет производиться по их внешнему виду, и для них будут заполняться только некоторые графы. Опытному работнику приведенная форма записи будет нужна только при систематическом определении неизвестного минерала.

Минераграфические исследования проводятся в следующем порядке:

1. Производится определение минералов по физическим признакам: отражению, твердости, цвету, отношению к поляризованному свету и внутренним рефлексам. По этим признакам ряд рудных минералов может быть определен сразу.

Таблица 17

Форма отчета при минераграфическом изучении образца

Месторождение, № образца, место взятия

Минералы рудные			Минералы сопровождающие	Зарисовки и дополнительные записи
Минералогический состав	Количественный состав в % по объему			
	Показатель отражения			
	Твердость			
	Отношение к поляризованному свету			
	Цвет			
	Внутренние рефлексы			
	Другие физические признаки			
	Диагностическое травление (положительные реакции)			
Структуры, текстуры	Размеры зерен (максимальные, средние, минимальные) в мм			
	Форма зерен			
	Внутреннее строение зерна			
	Структура			
	Текстура			
	Возрастные соотношения минералов			

"_____" _____ 195__ г.

Подпись _____

2. Если указанных пяти физических признаков для определения минерала недостаточно, то проверяются магнитность и электропроводность минерала. В случае надобности проводится диагностическое травление. Злоупотреблять травлением не стоит, так как оно портит полированный шлиф. Если потребуется, нужно провести поверочную микрохимическую реакцию.

По найденным признакам минерал определяется с помощью минераграфических таблиц.

3. После установления минералогического состава руды производятся замеры поперечников рудных зерен с помощью окуляр-микрометра.

4. Определяется количество рудных минералов в процентах по объему в исследуемом полированном шлифе путем оценки на глаз или путем подсчета с помощью окуляр-микрометра или пуш-интегратора.

5. Производится травление для выявления внутренней структуры. Места как структурного, так и диагностического травления отмечаются кружочком с соответствующим номером на контуре полированного шлифа, изображенном в рабочей тетради на правых листах. Под этим номером необходимо записать реактив, время и результат травления.

6. Устанавливаются текстуры и структуры руды. Выявляется внутренняя структура в поляризованном свете или с помощью травления.

Далее описываются взаимоотношения минералов между собой (срастания, включения, секущие жилки, каймы обрастания и пр.) и делаются выводы о последовательности выделения минералов.

Изучается структура распада твердых растворов. Выясняется, нет ли реликтов колломорфного строения минералов, указывающих на коллоидный характер рудоносных растворов. Изучаются явления метаморфизма в рудах, выражающиеся в дроблении, смятии и перекристаллизации минералов.

7. По окончании микроскопического определения минералов в полированном шлифе в нем выбираются характерные участки для микрофотографирования или зарисовки (конечно, если такие участки имеются). Эти места отмечаются в тетради на контуре полированного шлифа.

Практика показывает, что на полное изучение полированного шлифа руды уходит времени в два раза больше, чем на полное изучение шлифа горной породы.

По окончании микроскопического изучения полированных шлифов руд в отраженном свете следует провести изучение шлифов руд под микроскопом в проходящем свете. Это исследование имеет целью более точное определение прозрачных (нерудных) минералов, всегда присутствующих в каждой руде. Эти определения ведутся обычным петрографическим методом.

Последним этапом микроскопического исследования руд являются производство зарисовок и микрофотографирование характерных и показательных участков. Избранные места для зарисовок и фотографирования, кроме фиксации в тетради, отмечаются на полированных шлифах тушью. Для этого под микроскопом, с помощью чертежного перышка, ставятся тушью (лучше красной) четыре небольшие точки на окружности видимого на полированной поверхности светового пятнышка. В микроскопе мы увидим тогда касательные к полю зрения увеличенные точки туши, которые не закрывают избранного нами кадра.

Изготовление иллюстраций рекомендуется делать в заключительном этапе работы, так как к этому времени уже известны характерные особенности исследуемой руды.

5. СВОДКА ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

По окончании микроскопических наблюдений необходимо дать сводку данных произведенного исследования. Для этого составляются сводные рабочие таблицы, в которых указывается изменение вещественного состава руд по трем направлениям рудного тела. Необходимо также подытожить данные о составе и структурах руд по отдельным типам или сортам. Следует сделать сводку размеров рудных зерен и вычертить кривые гранулометрического состава руд.

Необходимо разобраться в разнообразных типах текстур и структур руд, выяснить последовательность выделения минералов и осветить процессы замещения и метаморфизма руд.

В сводном отчете по минераграфическому исследованию должны быть освещены следующие основные вопросы:

1. Краткие сведения о геологических условиях залегания месторождения и его морфологических особенностях.
2. Минералогический состав руд. Сводная таблица всех рудных и сопровождающих минералов и краткое описание каждого из них.
3. Текстуры и структуры руд. Общий обзор текстур и структур. Возрастные соотношения минералов и минеральных агрегатов.
4. Классификация руд. Сорта и типы руд, устанавливаемые на основе химического опробования и минераграфического исследования.
5. Характеристика каждого типа руды с точки зрения качественного и количественного минералогического состава, текстуры и структуры.
6. Характер пространственного распределения типов руд на месторождении.

7. Предпосылки к механическому обогащению руд.
8. Некоторые данные по вопросу генезиса месторождения.

6. ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕБНОЙ МИНЕРАГРАФИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Ниже приводится перечень необходимой аппаратуры, коллекций, реактивов и наглядных пособий для проведения занятий по минераграфии с группой студентов в 25 человек.

АППАРАТУРА

1. Минераграфические поляризационные микроскопы модели МП-4 завода «Русские самоцветы» или МИН-6 с наборами объективов и окуляров	25	шт.
2. Осветительные лампы с трансформаторами, связанные с опак-иллюминаторами микроскопов или независимые от них	25	»
3. Минераграфические поляризационные микроскопы модели МП-5 или МП-3 завода «Русские самоцветы» с наборами объективов и окуляров.	3	»
4. Осветительные лампы с трансформаторами, связанные с опак-иллюминаторами микроскопов	3	»
5. Прессы для монтировки шлифов	12	»
6. Рисовальные аппараты типа Аббе	12	»
7. Камеры для микрофотографирования	2	»
8. Сравнительная камера Иностранцева	2	»
9. Микрофотометр с чувствительным селеновым фотоэлементом и зеркальным гальванометром	1	»
10. Дощечки, обтянутые сукном или замшей, для протирания полированных шлифов	25	»
11. Стальные и медные иглы для определения твердости и иглы для взятия проб при микрохимическом анализе	50	»
12. Приборы для определения электропроводности	2	»
13. Чувствительные магнитные стрелки	25	»
14. Электросверло для взятия микропроб при микрохимическом анализе	2	»
15. Прибор для электролитического травления (выпрямитель переменного тока и платиновые электроды)	2	»
16. Вольтова дуга (для светового травления и других целей).	1	»
17. Небольшой полировальный станок для восстановления потускневших и затравленных полированных шлифов	1	»
18. Батареи аккумуляторов на 12 в.	6	»
19. Препаратоводители (координатные салазки)	25	»
20. Пуш-интеграторы А. А. Глаголева для количественного минералогического анализа	12	»
21. Приборы для химического испытания полированных шлифов по методу отпечатков	6	»

УЧЕБНЫЕ КОЛЛЕКЦИИ

1. Набор обычных и безрельефных полированных шлифов руд в количестве 8—10 шт.	12	компл
2. Наборы прозрачных полированных шлифов из 3 шт. (хромита, сфалерита, куприта)	12	»
3. Полированные шлифы из титано-магнетита для наблюдения с масляной иммерсией	25	»

4. Наборы полированных шлифов—эталонов отражения из 8 минералов каждый . . . . . 12 компл.
5. Наборы полированных шлифов для изучения двуотражения 12 »
6. Наборы полированных шлифов—эталонов цвета из 9 минералов . . . . . 12 »
7. Наборы полированных шлифов для изучения внутренних рефлексов из 9 минералов . . . . . 12 »
8. Наборы полированных шлифов для изучения явления анизотропии из 9 минералов . . . . . 12 »
9. Полированные шлифы для определения твердости иглами 50 шт.
10. Полированные шлифы для определения твердости по светлой линии . . . . . 50 »
11. Полированные шлифы для изучения магнитности . . 50 »
12. Наборы полированных шлифов для изучения электропроводности из 8 минералов . . . . . 6 компл.
13. Полированные шлифы для самостоятельного травления минералов . . . . . 50 шт.
14. Полированные шлифы для микрохимических анализов . 50 »
15. Полированные шлифы для самостоятельного минераграфического определения минералов . . . . . 50 »
16. Наборы полированных шлифов по структурам руд: отложения, распада твердых растворов, раскристаллизации коллоидов, замещения, давления; в каждом наборе по 4—6 полированных шлифов . . . . . 30 наб.
17. Наборы полированных шлифов для изучения строения кристаллических зерен из 8—10 минералов . . . . . 6 компл.
18. Наборы полированных шлифов для изучения тонких текстурных срастаний из 8—10 образцов . . . . . 6 »
19. Наборы штуфов и пришлифованных образцов руд по текстурам руд: эндогенных, экзогенных и метаморфогенных месторождений . . . . . 18 наб.
20. Коллекция эталонных полированных шлифов руд важнейших минералов по химическим элементам: железа, марганца, хрома, титана, меди, цинка, свинца, серебра, золота и платины, никеля, кобальта, вольфрама, олова, молибдена, ртути, сурьмы, мышьяка, висмута. В каждом наборе по 4—8 полированных шлифов . . . . . 19 »
21. Наборы полированных шлифов из различных руд для контрольного определения, в среднем из 3 штук каждый . . 25 »

Материалы (реактивы и др.)

1. Вата и марля в баночках для протирания оптики микроскопов . . . . . 25 наб.
2. Флаконы с кедровым маслом для иммерсии . . . 12 шт.
3. Флаконы с авиационным бензином для смывания кедрового масла . . . . . 12 »
4. Сукно высшего качества (бильярдное) для полирования 2 м.
5. Зеленый крокус и окись алюминия для полирования, по 1 кг каждого . . . . . 2 кг.
6. Воск или мастика для монтировки полированных шлифов 1 »
7. Стекла 50×25 мм для монтировки полированных шлифов и для микрохимического анализа . . . . . 2000 шт.
8. Деревянные или картонные коробки размером 25 × 12 и 13 × 10 см с крышками, на 9 и на 4 гнезда каждая, для хранения полированных шлифов . . . . . 200 кор.
9. Стеклянные пипетки (глазные капельницы) . . . . 50 шт.
10. Стеклянные палочки и трубочки

11. Стаканчики на 100 см³ для промывания пипеток и палочек при травлении . . . . . 50 шт.
12. Фильтровальная бумага . . . . . 100 лист.
13. Наждачная бумага для подтачивания игл при определении твердости . . . . . 20 »
14. Подпилочки трехгранные маленькие . . . . . 12 »
15. Наборы реактивов для микрохимического анализа на 12 элементов . . . . . 6 наб.
16. Наборы реактивов во флаконах для диагностического травления из 7 реактивов . . . . . 12 ком.
17. Наборы растворов солей для микрохимических испытаний на 12 элементов . . . . . 6 наб.
18. Наборы реактивов для испытания по методу отпечатков на 10 элементов . . . . . 6 »

НАГЛЯДНЫЕ ПОСОБИЯ

1. Большая настенная таблица «Минераграфическое определение рудных минералов по их физическим признакам» . . 1 шт.
2. Большая настенная таблица «Рудные минералы, их формулы и распространение» . . . . . 1 »
3. Увеличенные фотографии (18 × 24 см) в рамках под стеклом типичных структур руд: кристаллизации, распада твердых растворов, раскристаллизации коллоидов, замещения, давления . . . . . 5 рам.
4. Увеличенные фотографии (18 × 24 см) строения кристаллических зерен . . . . . 1 рам.
5. Настенная таблица классификации текстур руд . . 1 шт.
6. Настенная таблица классификации структур руд . . 1 »
7. Настенная таблица схемы рудного микроскопа модели МП-4 завода «Русские самоцветы» с пояснениями . . . 1 »
8. Настенная таблица «Схема комбинированного опак-иллюминатора» . . . . . 1 »
9. Настенная схема осветителя к опак-иллюминатору . . 1 »
10. Настенная таблица «Кривые дисперсии отражательной способности» . . . . . 1 »
11. Настенная таблица—кривая для нахождения показателя отражения по углу поворота николя . . . . . 1 »
12. Настенная таблица микрофотометра с камерой Иностранцева . . . . . 1 »
13. Увеличенные фотографии (12 × 12 см) в рамках под стеклом иллюстраций к сравнительному методу определения количества минералов под микроскопом . . . . . 2 рам.
14. Схема минераграфического изучения образца . . . 1 таб.

Для организации лаборатории на 25 мест потребуется помещение площадью около 80 м².

ГЛАВА XVIII

КРАТКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУД

Изучение вещественного состава руд и пород, слагающих месторождения полезных ископаемых, имеет важное значение и в познании генезиса месторождений и в установлении свойств руд, подвергающихся механическому обогащению и металлургической переработке.

Изучение вещественного состава руд производится в настоящее время самыми разнообразными методами исследования: изучение руд по внешним признакам макроскопически и с помощью бинокуляра; применение паяльной трубки; химические методы исследования — качественный анализ, микрохимический анализ, капельный анализ, метод отпечатков, пленочные реакции окрашивания; метод растирания порошков; микроскопические методы исследования — минераграфия и применение петрографического микроскопа; изучение естественных шлихов минералов и искусственных продуктов дробления минеральных масс; иммерсионный метод; спектральный анализ качественный и количественный; рентгено-структурный анализ; люминесцентный анализ; физико-химические методы исследования, внедряемые ВИМСом,— диэлектрическая проницаемость (электродиализ), электрохимическая сепарация на ртутном катоде, определение РН суспензии минералов и др.; термический анализ тонкодисперсных минеральных масс; исследования в электронном микроскопе; изучение изотопов свинца; исследование газовожидких включений в минералах.

В настоящей книге нами рассмотрен достаточно подробно минераграфический метод исследования, являющийся основным методом изучения вещественного состава руд. Кроме того, мы кратко рассмотрели специальные методы химического исследования руд: микрохимический анализ, метод отпечатков и применение пленочных реакций.

Шлиховой метод исследования подробно разбирается в специальных руководствах, из которых отметим работу Е. В. Копченовой (1951) и М. Н. Чуевой (1950).

По спектральному анализу руд и минералов имеется хорошее руководство А. К. Русанова (1948).

Краткое описание люминесцентного, рентгено-структурного, спектрального и термического анализов приведено в курсе минералогии А. Г. Бетехтина (1951).

По методу растирания порошков имеется работа П. М. Исакова (1953).

Иммерсионный метод рассматривается в руководствах Г. В. Бокия (1948) и Н. И. Наковника (1948).

Мы ставим своей задачей кратко охарактеризовать новейшие методы исследования вещественного состава руд и пород, недостаточно еще освещенные в литературе, но внедряющиеся в настоящее время в практику исследовательских работ советскими учеными.

Ниже приводятся основные сведения об электронном микроскопе, исследовании газовожидких включений в минералах, физико-химических методах ВИМСа и об исследованиях изотопов свинца.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

Электронный микроскоп для изучения минералов стал применяться лишь в самое последнее время. Схема электронного микроскопа показана на рис. 73, 74. На пути потока электронов помещается исследуемый объект, проходя через который электроны рассеиваются и только часть их фиксируется объективной линзой. Яркость изображения отдельных элементов исследуемого объекта уменьшается с увеличением его толщины и плотности. Изображение может быть видимо на флюоресцирующем экране или оно фиксируется с помощью фотографической пластинки.

Современные электронные микроскопы дают первичное увеличение на негативе от 4000 до 8000 раз. При получении позитивных отпечатков можно получить увеличение в 20000—40000 и даже до 100 000 раз. Такое сильное увеличение позволяет видеть частицы величиной до одной тысячной доли микрона, что дает возможность наблюдать крупные молекулы.

Для исследования в электронном микроскопе непрозрачных объектов изготовляют из коллодия или других веществ так называемые реплики—отпечатки поверхности образца.

Электронный микроскоп для изучения форм нахождения тонкодисперсного золота был применен в Уральском филиале Академии наук А. А. Ивановым (записки Всес. минер. об-ва, вып. 3, 1951). На основании произведенного исследования

золотоносных пиритов автор пришел к выводу о том, что золото в пиритах находится в виде механической примеси, образуя близкие к изометричным частицы размерами от нескольких микрон до 10^{-6} см (рис. 75, 76). Далее, этот исследователь установил, что в кристаллическую решетку пирита золото в виде электрически нейтральных атомов входить не может.

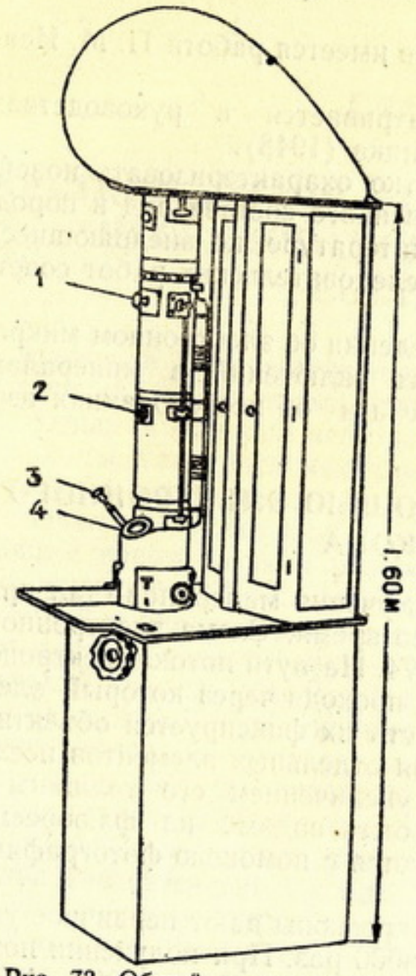


Рис. 73. Общий вид магнитного электронного микроскопа (схема).

1 — люк для смены образцов; 2 — наблюдение промежуточного изображения; 3 — световой микроскоп; 4 — наблюдение конечной картины.

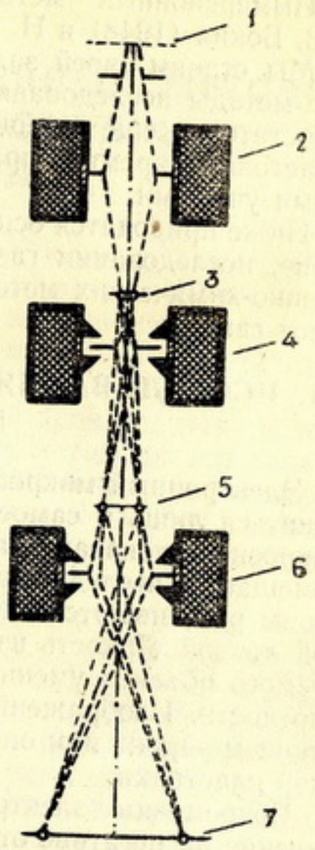


Рис. 74. Схема действия магнитного, просвечивающего электронного микроскопа (по Ю. Кушнир).

1 — электронная пушка; 2 — конденсорная линза; 3 — предмет; 4 — объективная линза; 5 — промежуточное изображение; 6 — проекционная линза; 7 — окончательное изображение.

Электронный микроскоп с 1950 г. успешно применяется в лабораториях ВСЕГЕИ для исследования минералов глин и коры выветривания.

Методика и результаты этих исследований описаны М. Ф. Викуловой. Последней применялся электронный микро-

скоп ГОИ, с помощью которого получались отпечатки с увеличением до 35000 раз.

Препараты для исследования приготовлялись по методу суспензий, который позволяет быстро получить из глин суспензию с размером части 0,001 мм. Суспензия из сцементированных глинистых пород — аргиллитов (опок, бокситов) — получается путем предварительного растирания породы с водой в ступке.

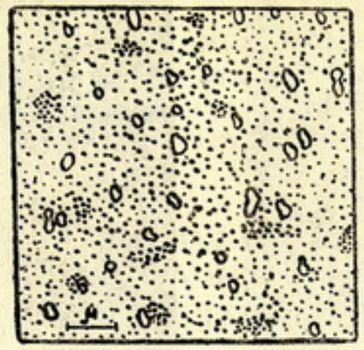


Рис. 75. Пирит Березовского месторождения с золотом. Снимок с коллодиевой реплики в электронном микроскопе.
Увеличение 5000×.
Серое — пирит; белые пятнышки — золото.
(По А. Иванову).

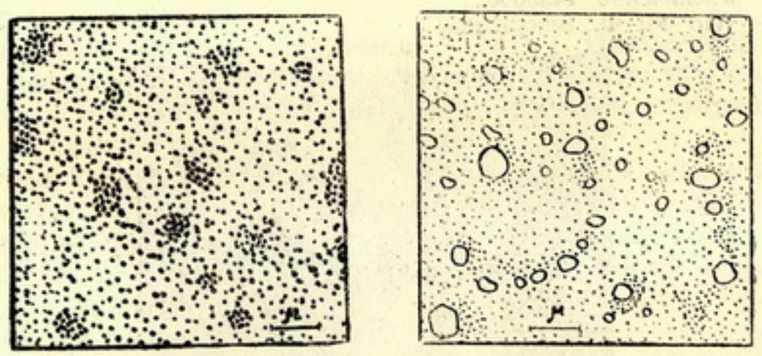


Рис. 76. Синтетический пирит. Снимок с коллодиевой реплики в электронном микроскопе. Слева — незолотоносный. Справа — золотоносный.
Увеличение 7000×. (По А. Иванову).

Электронный микроскоп позволяет получить морфологическую характеристику тонкодисперсных минералов глин, на основании чего легко отнести исследуемую глину к одной из трех основных групп: каолинитовой, гидрослюдистой или монтмориллонитовой.

Кроме того, этим путем устанавливаются в глинах минералы-примеси: галлуазит, монтмориллонит, каолинит, кварц, кристобаллит, разновидности гидрослюд, опал, полыгорскит.

На прилагаемых к сему микрофотографиях, заимствованных из работы М. В. Викуловой, показаны каолинитовая су-



Рис. 77. Каолинитовая сухарная глина. Каолинит (К) — округлые частицы, пирит (П) — квадратные. Снимок в электронном микроскопе. Увеличение 14000×. (По М. Ф. Викуловой).



Рис. 78. Галлуазит под электронным микроскопом. Увеличение 14000×. (По М. Ф. Викуловой).

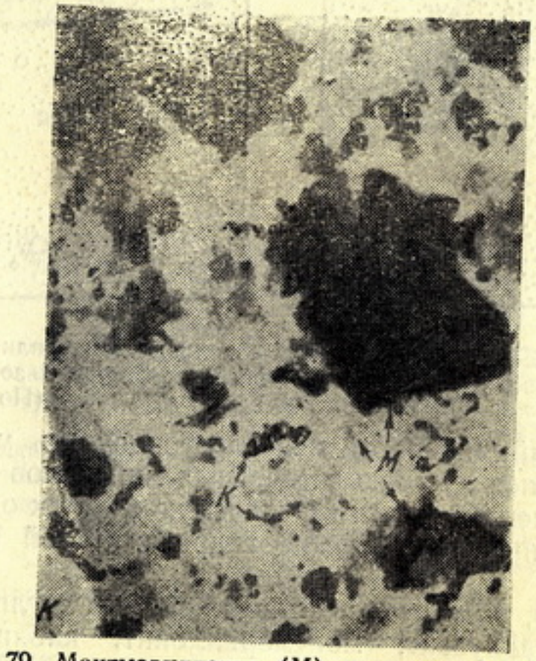


Рис. 79. Монтмориллонит (М) и кристаллоболит (К) под электронным микроскопом. Увеличение 16000×. (По М. Ф. Викуловой).

харная глина (рис. 77), галлуазит (рис. 78), монтмориллонит (рис. 79).

Электронографический анализ позволяет расшифровать структуру глинистых минералов и тем самым осветить условия их образования.

Вследствие простоты изготовления препаратов для исследования электронная микроскопия является более совершенным методом определения глин, чем термический, рентгеновский и химический анализы.

Применение электронного микроскопа для исследования вещественного состава месторождений полезных ископаемых обещает большие возможности в части изучения пылевидных фракций и тонко-дисперсных систем (глин, бокситов, силикатных никелевых руд и др.).

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ ПО ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЬКАМ В ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЯХ

Впервые жидкими включениями в минералах заинтересовался А. П. Карпинский. Он произвел исследования жидких включений в кристаллах аметиста, доказал, что эти включения являются углекислотой и сделал первую попытку определить по этим включениям давление и температуру образования аметиста.

Далее этот метод был применен в 1933 г. Ньюхаузом, который исследовал жидкие включения в 13 образцах прозрачного сфалерита месторождения Миссури и установил температуру их образования от 115° до 135°.

Большую исследовательскую работу в этом направлении провел Н. П. Ермаков («Советская геология», 1944 № 1), разработавший специальную аппаратуру для этого метода и выполнивший не одну сотню определений температур образований прозрачных минералов.

Сущность метода пузырьков заключается в следующем.

Выпиливается и отполировывается тонкая пластинка из минерала, содержащего жидкие включения. Пластинка эта помещается на столике микроскопа или бинокулярной лупы и подвергается медленному нагреванию. Это нагревание производится до момента исчезновения газовых пузырьков в жидких включениях. Температура, при которой произойдет исчезновение пузырьков, и должна отвечать температуре образования данного минерала.

По Н. П. Ермакову наиболее вероятный путь образования пузырьков и причины их уничтожения нагреванием таковы. Маточный гидротермальный раствор, заполнивший образованные при кристаллизации поры, при охлаждении должен сократиться в объеме в большей степени, чем объем самих пор. Раз-

ница в степени уменьшения объема капельки жидкости и вмещающей поры в твердом минерале даст при охлаждении вакуум, быстро заполняющийся парами жидкости, образующей пузырек. Естественно, что чем более была нагрета жидкость, тем больше сокращался потом ее объем и тем большие размеры должен был иметь пузырек газа (пара) в ней.

Искусственное нагревание кристалла приводит к увеличению его объема и объема находящихся в нем пор. Однако, маточная жидкость в порах увеличивается в объеме более интенсивно. Это вызывает постепенное уменьшение газовых пузырьков, увеличение давления в них и конденсацию пара.

В момент, когда при нагревании объем капельки жидкости и объем вмещающей ее поры уравниваются, пузырек газа совершенно исчезает, и этот момент фиксирует былую температуру маточного раствора, захваченного в виде включений в минерале (рис. 80).

Результаты измерения Н. П. Ермаковым температур образования оптических минералов месторождения Куликолон приведены в таблице 18.

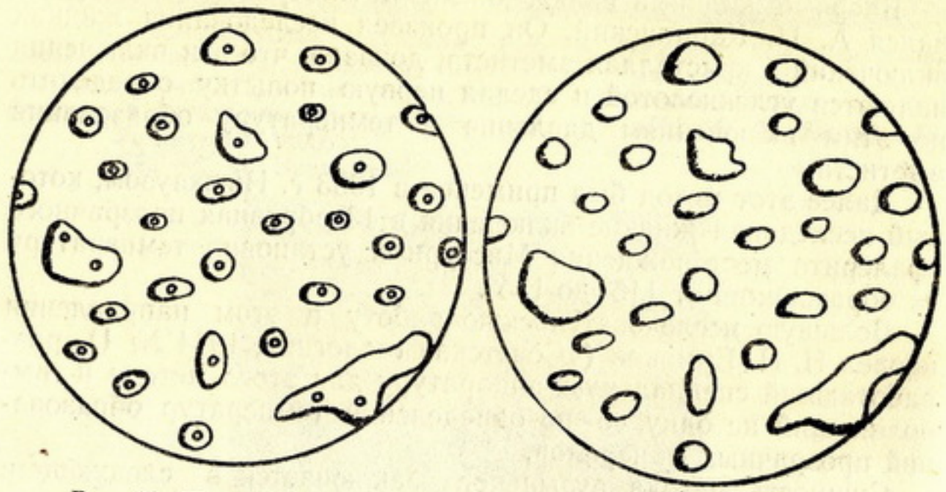


Рис. 80. Жидкие включения в минералах (по Н. П. Ермакову).
Слева — содержащие газовые пузырьки (до нагревания минерала).
Справа — лишенные газовых пузырьков (после нагревания минерала).

Таблица 18

Минералы	Колебания температур	Средняя температура	Число измерений
Барит	119—152	138	15
Флюорит	101—136	122	41
Кальцит	89—108	101	4

3. О ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА РУД

Разнообразные современные методы исследования, разработанные физиками и физико-химиками, с успехом применяются и для исследования минерального сырья. У нас в Союзе эти исследования выполняются в ВИМСе под руководством доктора геолого-минералогических наук Е. В. Рожковой.

Большое значение в этих методах имеет использование электрических свойств минералов, применение электрохимии, учения о концентрации водородных ионов и др.

Приведем основные понятия о двух методах ВИМСа: электродиализе и определении pH суспензии минералов.

Электродиализ

Метод электродиализа был предложен знаменитым русским почвоведом К. К. Гедройцем (1933) и широко применяется в практике почвоведов.

Для исследования вещественного состава минерального сырья метод применен в лаборатории ВИМСа Е. В. Рожковой. Последней совместно с М. В. Серебряковой составлено «Руководство по применению электродиализа для изучения горных пород, руд и минералов» (1953).

Приведем основные понятия о методе из этого руководства. Сущность метода такова.

При электродиализе применяются две полупроницаемые перегородки (мембраны, диафрагмы), которые разделяют сосуд на три отделения. В крайних отделениях помещаются платиновые электроды. Полупроницаемые перегородки изолируют продукты электролиза и вносят в них существенные изменения. При электродиализе кислота и щелочь, образующиеся вследствие разложения соли в крайних камерах прибора, в основном не проникают в среднее пространство, поэтому концентрация электролита здесь уменьшается и к концу процесса в среднем отделении содержится лишь вода.

Водную суспензию исследуемого вещества помещают в среднюю камеру электродиализатора между полупроницаемыми перегородками и подвергают воздействию постоянного электрического тока. Переходящие в раствор соединения и поглощенные основания уходят в виде ионов за пределы перегородок, направляясь под действием электрического тока к противоположно заряженным электродам, где они и собираются в специальных камерах.

В лаборатории ВИМСа применялся электродиализатор типа Паули, схема которого показана на рис. 81. Источниками тока могут служить как аккумуляторы, так и ламповые выпрямители, питающиеся от осветительной сети. Электрический ток

должен быть напряжением около 300 вольт, силой около 1,5 ампера.

Электродиализ в практике исследования минерального сырья может служить для разрешения следующих задач:

1) Изучение степени подвижности редких и цветных металлов, входящих в состав примесей осадочных горных пород (например, очистка бентонитовых глин, существенно состоящих из монтмориллонита).

2) Изучение миграции элементов, входящих в состав породообразующих минералов в условиях, имитирующих природный процесс выветривания (например, электродиализ серпентинита и выяснение условий выноса из него никеля).

3) Определение относительной растворимости минералов в условиях близких к природным (например, выяснение значительно большей растворимости церуссита сравнительно с галенитом).

Определение pH суспензии минералов

Метод описан В. Н. Карюкиной (1953).

Минералы в большинстве случаев являются солями различных по силе кислот и оснований. Взаимодействуя с окружающей средой, минералы изменяют начальную концентрацию ее водородных ионов в зависимости от входящих в состав минералов катионов и анионов. В этом и заключается принципиальная основа метода.

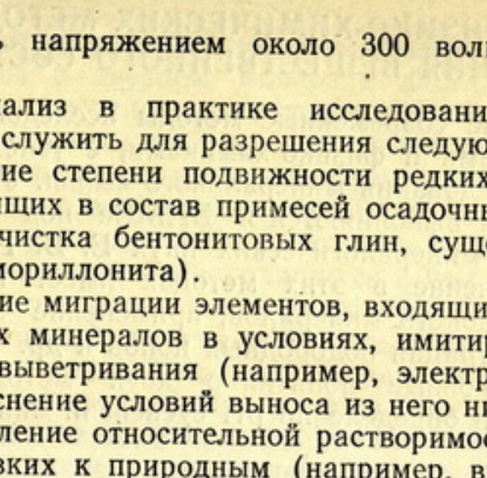


Рис. 81. Схема электродиализатора Паули.
1 — электродные камеры; 2 — средняя камера; 3 — мембрана; 4 — вешалка; 5 — трубка, подводящая жидкость; 6 — электрод; 7 — кран; 8 — трубка для стока электродной жидкости; 9 — резиновая пробка.

В лаборатории ВИМСа разработан колориметрический метод, основанный на применении универсального индикатора и

светофильтров, предложенных Г. А. Ланским (1952). Чувствительность индикатора высокая, определяющаяся в 0,2 pH. Индикатор и светофильтры позволяют измерять pH в интервале от 4,0 до 7,8. Окраска индикатора меняется следующим образом: при pH=4 — красный, с увеличением pH последовательно — оранжевый, желтый, зеленый, синий.

В качестве стандартной шкалы для сравнения цветов употребляются окрашенные пленки, цвет которых в точности имитирует окраски индикаторов.

Для приготовления суспензии употребляется дистиллированная вода, освобожденная от углекислоты кипячением и имеющая значение pH = 6,4—6,6. Для суспензии берут один и тот же объем вещества (порошка минерала) путем отмеривания его в круглом отверстии d = 2 мм латунной пластинки толщиной 0,5 мм. К порошку минерала прибавляют 5 капель дистиллированной воды и растирают в агатовой ступке 3 минуты. После растирания прибавляют к суспензии одну каплю индиктатора и быстро переливают содержимое в тигель, где дают осадку отстояться в течение 3 минут. После этого окраску раствора сравнивают со светофильтрами, пользуясь белым фоном крышечки от тигля.

Приведем значения величины pH для некоторых минералов, определенные в лаборатории ВИМСа колориметрическим методом.

Минерал	pH	Минерал	pH
1. Алунит	4,4—4,8	10. Гарниерит	7,8
2. Англезит	4,6—4,8	11. Галлуизит	6,6—6,8
3. Ангидрит	6,6—6,8	12. Кальцит	9,4—9,5
4. Апатит	7,6—7,8	13. Магнезит	9,7—10,1
5. Барит	6,2—6,6	14. Родонит	7,8
6. Вольфрамит	5,6—5,8	15. Топаз	5,8—7,0
7. Гюбнерит	6,2—6,6	16. Хромит	6,4—6,6
8. Доломит	9,6—10,1	17. Шеелит	6,2—6,6
9. Каолинит	6,6—6,8		

Несомненными достоинствами метода являются простота оборудования, быстрота анализа, незначительное количество вещества для анализа и возможность применения метода не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

4. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ СВИНЦА

Определение изотопов свинца и других элементов — это новейший метод исследования, имеющий важное значение в геологии, геохимии и в области учения о месторождениях полезных ископаемых.

Сущность метода освещена в статье акад. А. П. Виноградова «Геохимия изотопов» (1954).

Обычный свинец является смесью четырех изотопов Pb^{204}, Pb^{206}, Pb^{207} и Pb^{208}. Три последних изотопа накапливаются в породах в результате радиоактивного распада соответственно U^{238}, U^{235} и Th^{232}. Для исследовательских целей представляют интерес изотопы Pb^{206} и Pb^{207}.

Содержание Pb^{206} и Pb^{207} в природном свинце закономерно изменяется. Чем раньше свинец был отделен от породы и тем самым изолирован от U и Th, тем меньше он содержит Pb^{206} и Pb^{207}, и наоборот. Таким путем был определен возраст геологических образований Земли (в миллионах лет) от 25 (начало альпийской эпохи) до 3000 (конец нижнеархейской эпохи).

А. И. Тугаринов (1954) показал значение различий изотопического состава свинца в рудных месторождениях. Он указал на вполне реальную возможность определения возраста нескольких близких по времени и условиям образования месторождений, относящихся к одной рудной провинции или разделение нескольких генераций руд одного месторождения. Например, сравнение данных изотопического состава свинца месторождений Джоплин (Миссури) указывает на существование по крайней мере двух разновременных генераций руд, образовавшихся с перерывом в несколько миллионов лет.

Для некоторых свинцовых месторождений Средней Азии установлено этим методом более позднее образование скарновых месторождений сравнительно с гидротермальными.

В пределах полиметаллических месторождений Алтая установлены два различных изотопических состава свинца, которые позволяют говорить о двух стадиях рудообразования, разделенных длительным геологическим периодом.

Для месторождений медистых песчаников Джезказгана путем изучения изотопов свинца установлен древний возраст, отвечающий архею. Это позволяет сделать предположение об образовании месторождения осадочным путем за счет размыва древних толщ.

Приведенные примеры показывают, что изучение изотопов свинца в рудных месторождениях позволяет освещать некоторые генетические вопросы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ф. И. Микроскопические исследования руд в отраженном свете НХТИ, 1930.
2. Адамс, Колони, Ньюхауз и др. Критерии возрастных соотношений рудообразующих минералов. ОНТИ, 1934.
3. Аршинов В. В. Поляризованный свет и его применение. Госгеолиздат, 1945.
4. Бетехтин А. Г. О текстурах и структурах руд. «Проблемы советской геологии», № 9, 1934.
5. Бетехтин А. Г. Классификация текстур и структур руд. Изв. Акад. наук СССР, 1937.
6. Бетехтин А. Г. О структурном травлении полированных шлифов. Тр. Ин-та геол. наук АН СССР, вып. 41, 1941.
7. Бетехтин А. Г. О минераграфии. Изв. Акад. наук СССР, серия геол., № 6, 1945.
8. Бетехтин А. Г. и Радугина Л. В. Определение рудных минералов под микроскопом, ОНТИ, 1933.
9. Бетехтин А. Г. О процессах формирования руд в жильных гидротермальных месторождениях. Статья из сборника «Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях». Изд. Акад. наук СССР, 1953.
10. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. Госгеолиздат, 1951.
11. Беренс Г. и Клеи П. Микрохимический анализ. НКТП, 1928.
12. Бокий Г. В. Иммерсионный метод. МГУ, 1948.
13. Вахромеев С. А. О структурном травлении хромитов при минераграфических исследованиях. «Минеральное сырье», № 1, 1934.
14. Вахромеев С. А. Отражательная способность рудных минералов и ее измерение с помощью отечественной аппаратуры. Тр. Горно-геол. ин-та УФАН, вып. 14, 1948.
15. Вахромеев С. А. Руководство к практическим занятиям по минераграфии. Ч. 1. Изд. СГИ, 1941.
16. Вахромеев С. А. Руководство по минераграфии. Госгеолиздат, 1950.
17. Викулова М. Ф. Электронно-микроскопическое исследование глин. Госгеолиздат, 1952.
18. Виноградов А. П. Геохимия изотопов. Изв. Акад. наук, серия геол. 1954, № 3.
19. Волынский И. С. Система таблиц-решеток для определения рудных минералов в полированных шлифах. Изв. Акад. наук СССР, серия геол., 1939, № 3.
20. Волынский И. С. Краткое руководство по минералогическому анализу с помощью пуш-интегратора системы А. Глаголева, ОНТИ, 1934.
21. Волынский И. С. Определение рудных минералов под микроскопом. Госгеолиздат, т. I и II, 1947 и т. III, 1949.
22. Волынский И. С. О взаимозависимости оптических свойств рудных минералов. Исследование минерального сырья. ВИМС, Госгеолиздат, 1955.

23. Глаголев А. А. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. Госгеолиздат, 1941.
24. Глаголев А. и Готман Я. Новый метод микроскопического анализа рудных концентратов. «Минеральное сырье», № 2, 1933.
25. Глазковский В. А., Доливо-Добровольский В. В. Оценка текстурных и структурных особенностей руд. Металлургиздат, 1946.
26. Григорьев Д. П. Борнит-халькопиритовые прорастания как признак условий минералообразования. Зап. Мин. об-ва, № 2, 1946.
27. Доливо-Добровольский В. В., Глазковский В. А. Изучение вещественного состава руд в целях обогащения. Металлургиздат, 1946.
28. Ермаков Н. П. Исследования минералообразующих растворов. Изд-во Харьковского гос. унив-та им. А. М. Горького, 1950.
29. Заварицкий А. Н. Описательная петрография, КУБУЧ, 1929.
30. Иванов С. Н. Новые данные о генезисе колчеданных месторождений Среднего Урала. Изв. Акад. наук СССР, серия геол. № 1, 1943.
31. Иванов А. А. Электронно-микроскопический метод в исследовании рудных минералов. Записки Всес. мин. об-ва, № 3, 1951.
32. Исаков П. М. Качественный анализ руд и минералов методом растирания порошков. Госгеолиздат, 1953.
33. Карюкина В. Н. Определение pH суспензии минералов. Госгеолиздат, 1953.
34. Копченова Е. В. Минералогический анализ шлихов. Госгеолиздат, 1951.
35. Коренман И. М. Краткое пособие по качественному микрохимическому анализу. ОНТИ, 1935.
36. Масленицкий И. Н. Автоматическая полировка рудных шлифов. Сообщение Ленинградского Механобра, № 4, ОНТИ, 1939.
37. Минералы СССР. Т. II (статьи А. Бетехтина, Т. Шадлун, Ф. Чухрова и др.). Акад. наук СССР, 1940
38. Наковник Н. И. Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам. Госгеолиздат, 1948.
39. Орсель Ж. Измерение отражательной способности рудных минералов при помощи фотоэлементов (перевод И. С. Волынского). ОНТИ, 1936.
40. Радугина Л. В. Исследование прозрачных рудных минералов в отраженном свете. Сборник методических работ по микроскопическому исследованию руд. ОНТИ, 1936.
41. Ринне Ф. и Берек М. Оптические исследования при помощи поляризованного микроскопа. Перевод с немецкого под редакцией А. Пескова и А. Шубникова. ОНТИ, 1947.
42. Русанов А. К. Спектральный анализ руд и минералов. Госгеолиздат, 1948.
43. Рожкова Е. В. Новые методы исследования минералов руд и горных пород. Тезисы доклада совещания по минералогии и геохимии. Москва, 1954.
44. Рожкова Е. В., Серебренникова М. Б. Руководство по применению электродиализа для изучения горных пород, руд и минералов. Госгеолиздат, 1953.
45. Смирнов С. С. Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, 1936.
46. Самсонов И. Ф. Улучшение качества полированных шлифов. «Минеральное сырье», № 2, 1937.
47. Титов Л. Г. Микроскопы, их принадлежности и применение. Госмашметиздат, 1934.
48. Тугаринов А. И. О геологическом значении различий изотопического состава свинца в свинцоворудных месторождениях. Тезисы докладов совещания по минералогии и геохимии, Москва, 1954.
49. Цукерман Л. И. Руководство по микрофотографии для минералогов и петрографов. ОНТИ, 1936.
50. Чухров Ф. В. Коллоиды в земной коре. Акад. наук СССР, 1936.

51. Шадлун Т. Н. О колломорфных структурах руд месторождения Яман-Касы на Южном Урале. Зап. Всес. минер. об-ва, № 3—4, 1942.
52. Юшко С. А. Методы изучения руд в отраженном свете. ОНТИ, 1934 и Госгеолиздат, 1949.
53. Юшко С. А. Применение метода отпечатков в минераграфии. Изв. Акад. наук СССР, серия геол., № 3, 1939.
54. Юшко С. А. Новые методы минералогического исследования окисленных руд. Госгеолиздат, 1953.
55. Ярош П. Я. Опыт изготовления безрельефных полировок в горно-геологическом институте УФАН. Тр. горно-геол. ин-та УФАН, вып. 14, 1948.
56. Blanchard R. and Boswell P. Status of leached outcrops investigation. Eng. and Min. Journ. 1928, № 7.
57. Boswell P. and Blanchard R. Cellular structure in limonite. Econ. Geol., 1929, № 8.
58. Dawy W. and Farnham C. Microscopic examination to ore minerals, 1920.
59. Donnay J. Thinned polished Sections. Econ. Geol., 25, 1930.
60. Ramdohr P. Die Erzmineralien und ihre Verwachsungen, 1950.
61. Schneiderhöhn H. Anleitung zur mikroskopischen Bestimmung und Untersuchung von Erzen und Aufbereitungsproducten besonders im auffallenden Licht. Berlin, 1922.
62. Schneiderhöhn H. und Ramdohr P. Lehrbuch der Erzmikroskopie. Erster und zweiter Bände. Berlin, 1931, 1934.
63. Schneiderhöhn H. Erzmikroskopisches. Praktikum. Stuttgart, 1952.
64. Short M. Microscopic determination of the ore minerals. 2-d. ed. U. S. Geol. Survey Bull., 1914, 1940
65. Schwartz G. Progress in the study of exsolution in ore minerals. Econ. Geol., № 5, 1942.
66. Uytenbogaardt W. Tables for microscopic indentification of ore minerals, 1951.
67. Van der Veen R. Mineragraphie and ore deposition, vol. 1, 1925.
68. Vanderwilt J. Improvements in the polishing of ores. Econ. Geol., vol. 23, 1928.
69. Wachromeiew S. A. Erzmikroskopie. VEB. Verlag technik Berlin, 1954.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5
Глава I. Минераграфический микроскоп 10
1. Общие сведения 10
2. Описание минераграфических микроскопов 10
3. Устройство и применение опак-иллюминатора 17
4. Осветительные устройства 20
5. Объективы и окуляры 23
Упражнения 27
Глава II. Изготовление полированных шлифов руд 30
1. Общие сведения 30
2. Аппаратура и материалы для шлифования и полирования 31
3. Важнейшие операции по изготовлению полированных шлифов 33
4. Частные случаи изготовления полированных шлифов . . 36
5. Изготовление безрельефных полированных шлифов . . 37
6. Прозрачные полированные шлифы 40
Упражнения 40
Глава III. Изготовление фотографий и зарисовок под микроскопом 43
1. Основы микрофотографии в отраженном свете . . . 43
2. Приборы для зарисовок под микроскопом 46
Упражнения 47
Глава IV. Диагностические признаки рудных минералов . . . 49
1. Общие сведения 49
2. Основы кристаллооптики абсорбирующих кристаллов . . 50
Глава V. Отражательная способность и двуотражение . . . 54
1. Основные понятия и теоретические предпосылки . . . 54
2. Приборы для измерения показателя отражения рудных минералов 58
Упражнения 64
Глава VI. Цвет рудных минералов 66
1. Основные понятия 66
2. Условия, влияющие на восприятие цвета рудных минералов 67
3. Методы определения цвета рудных минералов . . . 68
Упражнения 71
Глава VII. Внутренние рефлексы 73
1. Основные понятия 73

2. Условия наблюдения цвета внутренних рефлексов и цвета порошка 74
Упражнения 75
Глава VIII. Исследования в поляризованном свете при скрещенных николях 76
1. Основные понятия и теоретические предпосылки . . . 76
2. Аппаратура для наблюдения 78
3. Методика наблюдений 79
4. Возможные источники ошибок 82
Упражнения 83
Глава IX. Твердость 84
1. Общие сведения 84
2. Методы определения твердости 84
3. Источники ошибок и практические советы 91
Упражнения 92
Глава X. Магнитность и электропроводность 94
1. Магнитность 94
2. Электропроводность 95
Упражнения 98
Глава XI. Диагностическое травление 100
1. Общие сведения 100
2. Световое травление 100
3. Набор реактивов и принадлежности для химического травления 101
4. Явления, происходящие при травлении 103
5. Методика травления 104
6. Источники ошибок и практические советы 105
Упражнения 107
Глава XII. Микрохимические испытания 108
1. Основные понятия 108
2. Аппаратура и принадлежности 109
3. Методика работы 110
4. Описание важнейших микрохимических испытаний . . . 114
5. Качественные химические испытания по методу отпечатков 118
6. Пленочные реакции 122
Упражнения 123
Глава XIII. Таблицы минералов 125
1. Введение 125
2. Методика определения рудных минералов под микроскопом в отраженном свете 126
Сводные таблицы для определения рудных минералов 129
Глава XIV. Краткое описание минералов, вошедших в таблицы . 140
Глава XV. Текстуры и структуры руд 173
1. Введение 173
2. Текстуры руд 174
3. Структуры руд 191
4. Строение кристаллических зерен 207
5. О генетическом значении текстур и структур руд . . . 219

Глава XVI. Замеры и подсчеты рудных зерен под микроскопом . 226
1. Основные понятия 226
2. Определение поперечников рудных зерен 226
3. Определение количественных соотношений рудных минералов 227
4. Вычисление процентного содержания металла в руде . . 233
Упражнения 237
Глава XVII. Организация и учет работы по минераграфическому исследованию руд 239
1. Ознакомление с месторождением и отбор образцов для исследования 339
2. Макроскопическое изучение образцов 240
3. Изготовление полированных шлифов руд 240
4. Микроскопическое исследование руд 241
5. Сводка данных исследования и составление отчета . . 244
6. Организация учебной минераграфической лаборатории . 245
Глава XVIII. Краткий обзор современных методов исследования вещественного состава руд 248
1. Исследования с помощью электронного микроскопа . . 249
2. Метод определения температуры кристаллизации минералов по газовым пузырькам в жидких включениях . 253
3. О физико-химических методах исследования вещественного состава руд 255
4. Метод определения изотопов свинца 257
Литература 259

4

Замеченные опечатки и исправления

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
1	2 сверху	горнометаллургических	горнометаллургических и строительных
7	23 снизу	opacue	ore
8	13 сверху	1954	1945
	17 сверху	свойства	семейства
9	после 3 сверху	Добавить абзац: „Хорошая книга, представляющая полный и ценный справочник, издана в 1955 г. в Берлине: Ramdohr P. Die Erzmineralien und ihre Verwachsungen“.	
12	3 снизу	За поляризатором помещено матовое стекло (5)	Перед поляризатором помещено матовое стекло (5), а за поляризатором...
19	19 снизу	рис. 5	рис. 7
39	рис. 12	2 3 4	1 2 3
79	8 снизу	за нвтервалом	с интервалом
114	18 сверху	$C_2H_2O_2$	$C_2H_3O_2$
121	6 снизу	Sn Cl_2	$SnCl_2$
127	13 снизу	анимонит	антимонит
130	1 снизу	зин	Халькозин
133	3 снизу	Брейтгуптит	Брейтгауптит
134	8 сверху	Виттихенит 43	Виттихенит 34
144	1 сверху	Sb_2S_3	Sb_2O_3
197	2 снизу	Белое...темное	Po...Sl
198	6 сверху	пластической	пластинчатой
205	11 снизу	пластинчатые	пластичные
218	16 сверху	AS_2S_3	As_2S_3
	20 сверху	NiAS	NiAsS
	23 сверху	убанит	Кубанит
	26 сверху	1 в Kl	Jв KJ
251	Подпись к рис. 75	Серое—пирит	Точечки—пирит